



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

SOOJUSÜLEKANDEVIISIDE ANALÜÜS JA SOOJUSVOOLU MÕÕTMINE

ANALYSIS OF HEAT TRANSFER METHODS AND MEASUREMENT OF HEAT
FLOW

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Märten Kuusk

Üliõpilaskood: 154952MAHB

Juhendaja: Lauri Kütt, professor

Tallinn, 2019

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” 201.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Märten Kuusk

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Soojusülekandeviiside analüüs ja soojusvoolu mõõtmine

Kuupäev: 21.05.2019

48 lk

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja: professor Lauri Kütt

Sisu kirjeldus:

Lõputöö eesmärk on analüüsida soojusülekandeviise paraboolpeegli päikesekollektori kiirguse vastuvõtja vähendatud mudeli näitel. Lõputöö käigus projekteeritakse ja ehitatakse vähendatud mudel päikesekollektori kiirguse vastuvõtjast ning seejärel uuritakse mudeli soojuskadusid. Tulemusi võrreldakse varasemalt teistsuguste põhimõtetega ehitatud mudeli tulemustega ning põhjendatakse erinevusi. Töös kirjeldatakse soojusülekanDEMehhanisme ja isolatsiooni põhimõtteid. Lisaks selgitatakse mudeli modelleerimist ning põhjendatakse vastuvõtja materjalide, soojuskatse teostamiseks vajalike elektroonikaseadmete ning mõõtmisel kasutatavate komponentide valikut. Kirjeldatakse ka vastuvõtja mudeli ehitamise protsessi ning selgitatakse soojuskadude leidmist.

Mudeli modelleerimiseks kasutatakse programmi *Solidworks*. Materjalide valikul arvestatakse erinevate materjalide soojusjuhtivuse, elektriliste omadute, temperatuuri taluvuse ja töötlemise võimalustega ning elektroonikaseadmete puhul mõõteanduritega ühildumisega. Mudeli ehitamiseks kasutatakse Tallinna Tehnikaülikooli laboratooriumeid ja nendes asuvaid masinaid ja tööriistu. Soojuskaod arvutatakse kirjandusest leitavate valemite abil.

Lõputöö tulemusel valmib vähendatud mudel päikesekollektori kiirguse vastuvõtjast, mida saab potentsiaalselt kasutada Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudis käimasolevas paraboolpeegli päikesekollektori projektis.

Märksõnad: soojusülekanne, konvektsioon, soojusjuhtivus, soojuskiirgus, soojusisolatsioon, soojuskadu, päikesekollektor, modelleerimine

ABSTRACT

<i>Author:</i> Märten Kuusk	<i>Type of the work:</i> Bachelor Thesis
<i>Title:</i> Analysis of Heat Transfer Methods and Measurement of Heat Flow	
<i>Date:</i> 21.05.2019	48 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor of the thesis:</i> Professor Lauri Kütt	
<p><i>Abstract:</i></p> <p>The aim of the thesis is to analyze heat transfer methods using a reduced model of solar collector radiation receive as an example. During the thesis a reduced model of solar collector radiation receive is designed and built and then heat losses due to heat transfer are found. The results are compared with the results of a model built previously with different principles and these differences are justified. The work describes heat transfer mechanisms and the principles of insulation. In addition, modeling is explained and the choice of receiver materials, electronic devices needed to perform a thermal test and components used for measurement is explained. The process of constructing the receiver model is also described and the finding of heat loss is explained.</p> <p>Solidworks software is used for modeling. The choice of materials takes into account the thermal conductivity, electrical properties, temperature endurance and handling capabilities of the various materials and, in the case of electronic devices, compatibility with the measuring sensors. Machinery and tools located in the laboratories of the Tallinn University of Technology are used to build the model. Heat losses are calculated using formulas found in the literature.</p> <p>As a result of the graduation thesis, a reduced model of the solar collector radiation receiver is created, which can potentially be used in the Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics ongoing solar collector project with a parabolic mirror.</p>	
<i>Keywords:</i> template, requirements, graduation, formatting of the thesis, abstract.	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Märten Kuusk, 154952
Õppekava, peeriala: MAHB, Mehhatroonika
Juhendaja(d): Professor, Lauri Kütt, 6203806

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Soojusülekandeviiside analüüs ja soojusvoolu mõõtmine

(inglise keeles) Analysis of Heat Transfer Methods and Measurement of Heat Flow

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Soojusülekandeviiside mõõtmise põhimõtete tutvumine
2. Soojusülekandeviiside intensiivsuse mõõtmine erinevatel temperatuuristsenaariumidel
3. Soojusülekandeviiside rolli määramine isolatsiooniga ja avatud struktuuris

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1	Alusandmete läbitöötamine	15.03
2	Modelleerimise teostamine ja mudeli ehitamine	15.04
3	Mõõtmine, tulemuste analüüs ja soojusparameetrite arvutamine	28.04
4	Töö esmase versiooni valmimine ja juhendajale saatmine	05.05
5	Töö lõpliku versiooni valmimine	20.05

Töö keel: Eesti

Lõputöö esitamise tähtaeg: "21." mai 2019. a

Üliõpilane: Märten Kuusk

Juhendaja: Lauri Kütt

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE.....	3
ABSTRACT	4
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	5
EESSÕNA.....	7
SISSEJUHATUS	8
1. SOOJUSÜLEKANNE	10
1.1 Soojusülekandeviisid.....	10
1.1.1 Soojusjuhtivus	10
1.1.2 Konvektsioon.....	11
1.1.3 Soojuskiirus.....	11
1.2 Soojusisolatsioon ja soojuskadude minimeerimine.....	12
2. MUDELI MODELLEERIMINE JA MATERJALIDE VALIK	15
2.1 Mudeli kirjeldus	15
2.2 Mudeli modelleerimine	17
2.3 Materjalide valik	19
2.3.1 Mudeli konstruktsiooni materjalid.....	19
2.3.2 Mudeli vastuvõtjalati materjalid	20
3. SOOJUSKATSE TEOSTAMINE JA TULEMUSTE ANALÜÜS.....	26
3.1 Eeltöö	26
3.1.1 Süsteemi kütmise põhimõtted	26
3.1.2 Temperatuuri mõõtevahendite valik	28
3.1.3 Tutvumine katseseadmetega	30
3.1.4 Mudeli ehitamine	31
3.2 Mõõtmiste teostamine	34
3.3 Mõõtetulemuste analüüs.....	36
KOKKUVÕTE	42
SUMMARY	44
KASUTATUD KIRJANDUS.....	46

EESSÕNA

Bakalaureusetöö kirjutamise mõtte soojusülekandeviiside analüüsist ja soojusvoolude mõõtmisest arenes välja minu juhendaja igapäevase töö käigus Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudis. Lõputöö aluseks on instituudis käimasolev parabolpeegliga päikesekollektori projekt ning minu ülesandeks on uurida, katsetada ja analüüsida päikesekollektori vastuvõtja soojusnäitajaid. Lõputöö antud päikesekollektori projektiga seotud teemal on hea võimalus projekti edasi arendamiseks ja samas ka päikesekollektori uurimiseks ja praktiliseks katsetamiseks.

Soovin tänada oma juhendajat Lauri Kütt'i kiirete ja heade näpunäidete ning bakalaureusetöö valmimisele kaasa aitamiseks panustatud aja eest.

SISSEJUHATUS

Tänapäeval on taastuenergia kasutamine aktuaalne ning pidevalt katsetatakse ja luuakse uusi alternatiivseid elektrienergia tootmise ja salvestamise lahendusi. Päikesekollektorite puhul ei ole päikese soojusenergiat rakendavad tehnoloogiad veel nii laias kasutuses, kui on fotogalvaanilised elemendid, mis muundavad valgusenergia otse elektrienergiaks. Küll aga on soojusenergiat rakendavad tehnoloogiad mõnel puhul energiaefektiivsemad kui fotogalvaanilised elemendid. Käesolevas töös analüüsitakse soojusülekandeviise soojusenergiat rakendava päikesekollektori kiirguse vastuvõtja mudeli näitel.

Lõputöö käigus projekteeritakse ja ehitatakse vähendatud mudel päikesekollektori kiirguse vastuvõtjast ning seejärel arvutatakse soojuskatse abil mudeli soojuskaod. Vastuvõtja ülesandeks on anda võimalikult palju soojusenergiat edasi termoelektrilisele elemendile, millega saab elemendi mooduli vastaspoolte piisavalt suure temperatuuride erinevuse abil elektrienergiat toota. Seega on ehitatava mudeli eesmärk võimalikult hästi soojust hoida, sest sellisel juhul on temperatuuri erinevus mooduli vastaspooltel suurim ja seega suurim ka toodetava elektrienergia kogus. Mudeli soojuskadusid võrreldakse varasemalt teistsuguste põhimõtetega ehitatud mudeli tulemustega ning selgitatakse erinevusi.

Töö esimeses jaotises kirjeldatakse soojusülekanDEMehhanisme ja isolatsiooni põhimõtteid. Teises jaotises selgitatakse mudeli modelleerimist programmiga *Soldiworks* ning põhjendatakse vastuvõtja materjalide valikut lähtuvalt materjalide soojusjuhtivusest, elektrilistest omadustest, temperatuuri taluvusest ja töötlemisvõimalustest. Materjalide valimise käigus teostatakse soojuskatse, mille puhul kuumutatakse erinevaid materjale ning vaadatakse, kas need peavad kuumusele vastu. Sobivate materjalide valimine on oluline, sest vastuvõtja peab olema võimeline taluma kõrgeid temperatuure ning positiivse ja negatiivse laenguga vastuvõtja osad tuleb üksteisest isoleerida.

Kolmandas jaotises kirjeldatakse soojuskatse teostamiseks vajalike elektroonikaseadmete ning mõõtmisel kasutatavate komponentide valikut, mudeli ehitamise protsessi ning soojuskadude leidmist. Mudeli ehitamiseks kasutatakse Tallinna Tehnikaülikooli laboratooriumeid ja nendes asuvaid masinaid ja tööriistu. Soojuskadude leidmiseks teostatakse katsed, mille käigus kuumutatakse mudelit elektrilise kütteseadme abil kindla võimsusega ning samal ajal mõõdetakse temperatuuri kollektori vastuvõtja erinevates punktides. Seejärel analüüsitakse mõõtetulemusi ning määratakse erinevate soojusülekandeviiside intensiivsused kirjandusest leitavate valemite abil. Lõpetuseks võrreldakse saadud tulemusi 2018. aastal ehitatud teistsugustele põhimõtetele

tugineva vastuvõtja mudeliga ning tuuakse välja ehitatud mudelite erinevused ja tulemuste erinemise eeldatavad põhjused.

1. SOOJUSÜLEKANNE

Üks kehade vastastikmõju ilminguid on energiavahetus. Süsteem ja ümbritsev keskkond võivad energiat vahetada kahes vormis: energia võib kanduda üle töö kujul, mis kutsub esile kas süsteemiväliste parameetrite muutuse või kehade ümberpaiknemise ruumis; energia võib kanduda üle soojusülekandega ehk energia läheb soojemalt kehalt jahedamale kehale otse, kas kehade vahetu kokkupuute või termilise kiirguse vahendusel ilma, et süsteemivälised parameetrid muutuksid [1]. Järgnevalt vaadeldakse lähemalt soojusülekanne.

Soojusülekanne on energiaülekanne soojuse näol ühest kehast või süsteemist teise. Tavaliselt toimub soojusülekanne soojusvahetuspinna vahendusel või kehasiseselt. Mida suurem on süsteemide temperatuurivahe, seda intensiivsem on soojusülekanne. Kui temperatuurivahe puudub, siis ei saa kehade vahel olla ka soojusülekanne. Soojusülekanne protsess ei kulge hetkeliselt, vaid vajab alati teatud ajakulu. Soojusvahetust ajaühikus kirjeldab süsteemi sisenev või sellest väljuv soojushulk, milleks on soojusvool. Ühest keskkonnast teise suunduv soojusvool on üle kogu soojusvahetuspinna arvestatud soojusvoolude summa. Soojusvool soojusvahetuspinna ühiku kohta antuna kannab aga nimetust soojusvoog. Soojusvoog on kirjeldatav vektorsuurusena, millel on arväärtus ja suund [1].

1.1 Soojusülekandeviisid

On olemas kolm soojusülekandeviisi: soojusjuhtivus, konvektsioon ja soojuskiirgus. Eeltoodud soojusülekandeviisid võivad esineda üksikult või kombineeritult ehk liitsoojusülekanadena. Kõik soojusülekandeviisid nõuavad temperatuuri vahe olemasolu ja iga ülekandeviisi puhul kandub soojus kõrgema temperatuuriga keskkonnast madalama temperatuuriga keskkonda [2].

1.1.1 Soojusjuhtivus

Soojusjuhtivuse puhul kandub energia kokkupuute teel suurema energiaga osakestelt madalama energiaga osakestele. Soojust juhivad tahked, vedelad ja ka gaasilised kehad. Gaasis ja vedelikus põhjustab soojusjuhtivuse molekulide omavaheline kokkupõrge ja difusioon [2]. Tahkise soojusjuhtivus on seotud vabade elektronide liikumisega ja molekulide vibratsiooniga kristallvõres. Viimased nähtused ilmnevad eriti metallide soojusjuhtivuses [1].

Soojusvoo tekkimise eeldus on erinev temperatuur keha eri punktides, sest soojusjuhtivuse tõttu kehas esinev soojusvool vajab temperatuurigradiendi [1]. Aine soojusjuhtivuse võrdetegur λ on pinnaühikut ajaühikus läbiv soojushulk temperatuurigradiendi ühiku kohta. Soojusjuhtivuse võrdetegur sõltub aine agregaatolekust, poorsusest, temperatuurist ja veel mõnest ainele

iseloomulikust füüsilisest suurusest. Soojusjuhtivus kirjeldab keha soojuslähilaskvust ja väljendub soojusjuhtivusteguri kaudu. Mida suurem on aine soojusjuhtivustegur, seda paremini juhib aine soojust. Madala soojusjuhtivusteguriga aine on halb soojusjuht, kuid hea isoleermaterjal [1].

Soojusjuhtivuse kiirus keskkonna kaudu sõltub keskkonna geometriast, selle paksusest ja materjalist ning samuti temperatuuri erinevusest kogu keskkonna osade vahel. Mida paksem on isolatsioon, seda väiksem on soojuskadu [2].

1.1.2 Konvektsioon

Konvektsioon seisneb vedeliku või gaasi liikumisega kaasnevas soojuse levimises entalpiaülekanne näol kõrgema temperatuuriga piirkonnast madalama temperatuuriga piirkonda. Konvektiivne soojusülekanne eeldab vedeliku või gaasi liikumist, selle osakeste ümberpaiknemist ja segunemist ruumis. Energia kandub konvektsiooni puhul vooluna üle ühtaegu nii konvektsiooni kui ka juhtivuse teel. Konvektsiooniga kaasneb soojusjuhtivus, sest vedeliku liikudes on eri temperatuuriga osakeste omavahelisest kontaktist tingitud energiaülekanne paratamatu [1]. Konvektsiooni nimetatakse sunniviisiliseks konvektsiooniks, kui vedelik või gaas on sunnitud voolama üle pinna väliste vahenditega, nagu ventilaator, pump või tuul. Seevastu konvektsiooni nimetatakse loomulikuks ehk vabaks konvektsiooniks, kui vedeliku liikumine on tingitud ülestõstejõududest, mis on tingitud tiheduse erinevustest, mis omakorda tulenevad vedeliku või gaasi temperatuuri muutlikkusest antud süsteemis [2].

Vedeliku või gaasi liikumine intensiivistab soojusülekannet, tõhustades kuumemate ja külmemate mahuosade kokkupuudet ning ergutades sel viisil soojusjuhtivust nende vahel. Soojusülekanne konvektsiooni teel on alati intensiivsem kui molekulaarse soojusjuhtivuse vahendusel [1]. Seega isolatsiooni silmas pidades tuleb tähelepanu pöörata rohkem konvektsiooni tõttu tekkivale soojuskaole. Konvektsiooni soojuskaotamiseks isolatsioonisüsteemis tuleb konvektsiooni nähtus elimineerida ning üks võimalus selleks on tekitada süsteemis vaakum. Et konvektsiooni soojusülekannet arvutada, tuleb teha mõõtmised vaakumiga ja ilma vaakumita [2].

1.1.3 Soojuskiirgus

Kui soojusülekanne toimub elektromagnetlainetena ehk footonide abil, siis nimetatakse soojusülekannet soojuskiirguseks [3]. Kiirgus on aine poolt elektromagnetlainete footonite kujul eralduv energia aatomite või molekulide elektroniliste konfiguratsioonide muutuste tulemusena. Kiirgussoojusülekanne on soojusülekannetest kiireim ning erineb oma olemuselt varem käsitletud soojusjuhtivusest ja konvektsioonist. Kui soojusjuhtivus ja konvektsioon saavad toimuda ainult kehadevahelise kontakti olukorras, siis kiirgussoojusülekanne ei vaja kehade kokkupuudet ega ka

materiaalset eraldavat keskkonda nende vahel. Kiirgussoojus levib ruumis üksteisest eraldatud kehade vahel ka siis, kui seal valitseb absoluutne vaakum [2]. Lisaks toimub erinevalt soojusjuhtivusest ja konvektiivsest soojusülekandest kiirgussoojusvahetus termilise tasakaalu olukorras isegi siis, kui kehadel on võrdne temperatuur. Eelmainitud juhul loovutab kiirgav keha energiat süsteemi niisama palju, kui ta seda neelab [1].

Soojuskiirguse levik on üldjoontes kahejärguline. Esmalt muundub keha vastuvõetav kiirgusenergia kehasiseseks energiaks, millele järgneb kiirguse levimine ruumis. Seega koosneb kiirgussoojusülekanne kehade vahel kolmest üksteisele järgnevast nähtusest: kõigepealt keha poolt soojusena vastuvõetava energia muundumine elektromagnetiliseks kiirguseks, siis energia levimine ruumis elektromagnetlainetena ning lõpuks kiirgusenergia muundumine energiat vastuvõtva keha siseenergiaks [1].

1.2 Soojusisolatsioon ja soojuskadude minimeerimine

Pindu isoleeritakse tavaliselt eesmärgiga minimeerida nende kaudu tekkivat soojuskadu või soojuse kasvu. Isolatsioon vähendab soojusülekannet, kuid ei kõrvalda seda täielikult, kui selle paksus ei ole lõpmatu. Siiski võib soojusülekannet läbi korralikult isoleeritud pinna lugeda nulliks, kuna piisav isolatsioon vähendab soojuse ülekannet pinna kaudu ebaolulise tasemeni. Seetõttu saab hästi isoleeritud pinda kirjeldada kui pinda, mille määratud soojusvoog on null [2].

Soojusisolatsiooni parandamiseks ja suurema termilise vastupidavuse saavutamiseks on vaja tähelepanu pöörata vaakumist isolatsioonisüsteemidele. Isoleeritud süsteem koosneb tavaliselt mitteläbilaskvast ümbrisest, mis säilitab soojuslikult isoleeritud süsteemis väga väikese gaasirõhu või vaakumi. Madala kiirguse neeldumisteguriga sisepinnad ja väikeste pooridega sisemine täitematerjal, näiteks villakihid, peene ränidioksiidipõhine pulber või aergeel, piiravad kiirgussoojust. Täitematerjali vähendatud pooride suurus piirab ka juhtimist läbi süsteemis oleva gaasi konvektsioonülekanadena [4].

Kui materjal on soojuse hoidmiseks vajalik soojusjuhtivuse ja konvektsiooni puhul, siis kiirguse kaudu võib soojust üle kanda ka täiusliku vaakumi kaudu. Kui vaakum on näiteks mingi materjaliga ümbritsetud keha sees, siis selle keha seinamaterjali kaudu kandub soojus väliskeskkonda üle lisaks soojuskiirgusele ka -juhtivuse kaudu, kuid konvektiivsust sellel puhul ei esine [4].

Ehitustööstus on välja töötanud erinevate materjalide isoleerivate omaduste järjestuse või R väärtuse, mis põhineb nende paksusel ja soojusjuhtivusteguritel. Isolatsiooni R väärtus on seina

paksuse L ja materjali soojusjuhtivuse K suhe, nagu on näidatud võrrandis 1.1. Mida suurem on R väärtus, seda parem on materjali isoleeriv omadus [5].

$$R = \frac{L}{K} \quad (1.1)$$

kus R – seinapaksuse ja materjali soojusjuhtivusteguri suhe, $\frac{\text{m}^2 \cdot \text{°C}}{\text{J/s}}$,

L – materjali paksus, m,

K – materjali soojusjuhtivustegur, $\frac{\text{J} \cdot \text{m} \cdot \text{°C}}{\text{s}}$.

Kui püüda minimeerida soojusenergia ülekandmist, siis tuleb arvestada kõigi kolme soojusülekanne liigiga. Mida kõrgem on materjali soojusjuhtivustegur, seda kiiremini soojus üle kandub. Kuid ka materjali kuju ja kogus mõjutavad soojusülekanne. Soojusvool läbi seinu suureneb, kui keha pindala suureneb ja väheneb, kui keha paksus suureneb. Samuti temperatuuri erinevus keha külgedel vahel toob muutuse: mida suurem on temperatuuride erinevus, seda kiiremini soojus voolab. Neid ootusi saab kirjutada võrrandi 1.2 kujul [5].

$$Q = \frac{K \cdot A \cdot (T_{kuum} - T_{kõlm})}{L} \quad (1.2)$$

kus Q – soojusvool, J/s,

A – soojusvahetuspinna pindala, m^2 ,

T_{kuum} – keha soojema poole temperatuur, °C ,

$T_{kõlm}$ – keha külmemä poole temperatuur, °C ,

L – keha paksus, m.

Konvektsioonist tulenevaid kahjusid saab vähendada mitmete meetmetega nagu näiteks tõmbe- ja sulgemisakende abil. Kinnised õhutaskud takistavad ka konvektsioonist tingitud soojuskadu. Materjalid nagu vahtpolüstürool, klaaskiud ja vill vähendavad termilise energia ülekannet konvektsiooniga. Kiirguse soojusülekanne piiramise viis on peegeldada võimalikult palju kiirgust. Mustadel kehal on suur neeldumistegur ning seega neelavad kiirgust ja ei peegelda kiirgust keskkonda piisaval määral tagasi. Kui temperatuuri on vaja hoida, siis kasutatakse näiteks hõbedaid või hõbetatud kehasid, mille neeldumistegur on väike [5].

Isolatsioonimaterjale kasutatakse sooja ja külma piirkondade vahelise soojuse vähendamiseks. Soojuskiirguse ülekannet takistatakse nii, et seintel on peegeldavad hõbe- või alumiiniumkatted [6]. Kuna metallid juhivad hästi soojust, siis on isolatsioonimaterjalid tavaliselt valmistatud mittemetalletest materjalidest ja täidetud võimalusel väikeste õhutaskudega. Nende hulka

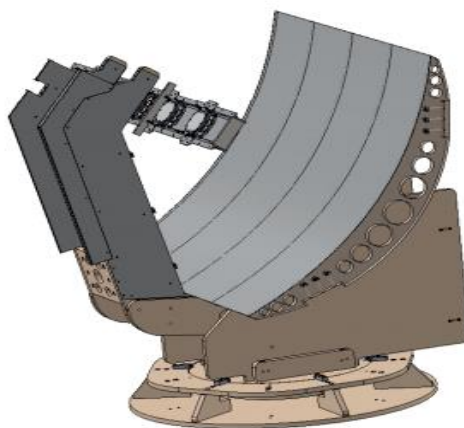
kuuluvad magneesiumkarbonaat, kork, vilt, puuvillane viltimine, klaas- või kivivill, mida kasutatakse isoleeriva kihina käesolevas töös, ja kobediatomiit [6].

2. MUDELI MODELLEERIMINE JA MATERJALIDE VALIK

Üheks lõputöö ülesandeks oli termoelektrilise generaatori (*Thermoelectric Generator* - TEG) põhimõttel töötava päikesekollektori vastuvõtja lati ja seda ümbritseva konstruktsiooni modelleerimine ning soojusisolatsiooni ja vastuvõtja detailide materjali valimine vastavalt sellele, et energiakaod oleksid võimalikult väikesed. Modelleerimiseks kasutati programmi *Solidworks* ning esimesena modelleeriti päikesekollektori vastuvõtja raamkonstruktsioon ning seejärel vastuvõtjalatt ehk küttekeha. Järgmisena projekteeriti vastuvõtjalatt, kuhu kinnituvad ka soojuskatse jaoks kütteallikad, andurid ja erinevad elektriühendused. Seejärel valiti sobivad materjalid erinevatele vastuvõtja detailidele.

2.1 Mudeli kirjeldus

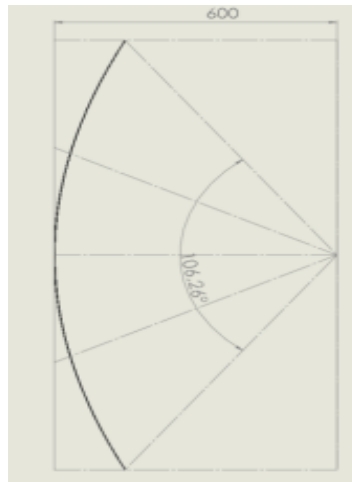
Modelleeritava paraboolpeegluga päikesekollektori vastuvõtja eesmärgiks on muuta päikese valguskiirguse energia soojusenergiaks ning seejärel termoelektrilise elemendiga elektrienergiaks. Paraboolpeegluga päikesekollektori 3D mudel on toodud joonisel 2.1. Lisaks on päikesekollektori ülesandeks ennast keerata päikese suunas ja samuti muuta peegli kaldenurka nii, et peeglile langev valgushulk oleks antud olukorras maksimaalne [7].



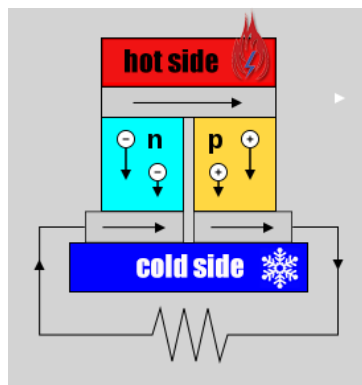
Joonis 2.1 Paraboolpeegluga päikesekollektori 3D mudel [7]

Päikesevalgusest tekkiva fookuspunkti asukoht on alumiiniumlati ees, et vältida lati sulamist. Peeglit (joonis 2.2) peegelduv päikese valguskiirte eeldatav fookuspunkt jääb peegli keskpunktist 0,6 m kaugusele [7]. Latt peab olema isoleeritud ja kinnitatud päikesekollektori külge nii, et võimalikult vähe soojust eralduks õhku ja raamkonstruktsiooni. Alumiiniumlati teisele poolele saab tulevikus kinnitada *Peltier'* elemendi (joonis 2.3) [7]. *Peltier'* element on termoelektriline pooljuhtelement, mis tänu *Peltier'* efektile võimaldab jahutada või soojendada teist objekti, mis on

elemendiga termilises kontaktis. Soojenemine ja jahutamine sõltub vastavalt elementi läbiva voolu polaarsusele. Tänu *Peltier* efekti pöördnähtusele, *Seebeck'i* efektile, on võimalik kasutada *Peltier* elementi ka elektrigeneraatorina, mis võimaldab elemendi kahe poole temperatuuride vahest tingituna elektrit toota [8]. Ühelt poolt kuumutatakse elementi ja teiselt poolt hakatakse seda jahutama, tänu millele hakkab element suure temperatuuri vahe tõttu elektrit tootma. Mida suurem on temperatuuri vahe termoelektrilise elemendi pooltel, seda rohkem elektrivoolu päikesekollektor toodab [8].



Joonis 2.2 Joonis peegli mõõtudest [7]

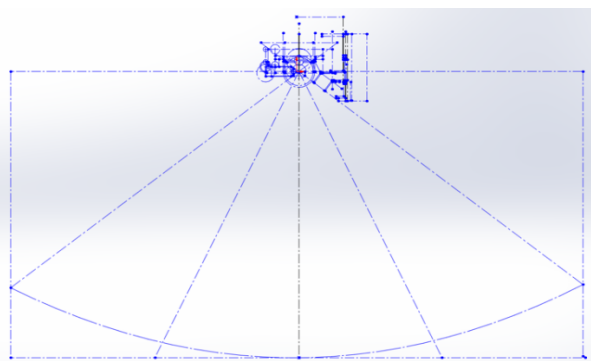


Joonis 2.3 *Peltier* element termoelektrilise generaatorina [8]

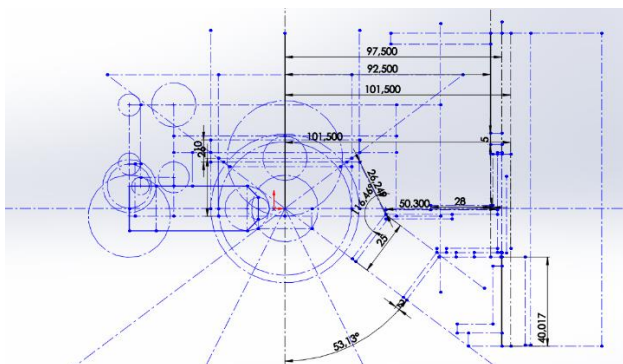
Päikesekollektori peegli pindala on $1,4 \text{ m}^2$. Kui lahutada kogupindalast maha peeglile tekkiva varju pindala, siis saab tootliku pindala, milleks on 1 m^2 ja mis võimaldaks Eestis suvel päikeselise ilma puhul toota kuni 1000 W võimsust [7], mis oleks võimeline kütma alumiiniumlatti kuni $300 \text{ }^\circ\text{C}$. Kuni $300 \text{ }^\circ\text{C}$ säilitamiseks *Peltier'* elemendi ühel pool ja võimsuskadude vähendamiseks on vaja head soojusisolatsiooni.

2.2 Mudeli modelleerimine

Selleks, et projekteerida *Solidworks* programmis valmis kollektori vastuvõtja mudel ja anda talle mõõtmed, tuli jooniste 2.4 ja 2.5 järgi optimeerida joonisele mõõtude järgi valmis vastuvõtja konstruktsiooni mudeli joonis. Joonistel 2.4 ja 2.5 on näha peeglit peegelduvad teoreetilised valguskiired ning nende fookuspunkt. Arvestada tuli, et vastuvõtja lati töötsoon on 6 cm lai ehk valguskiired langevad vastuvõtjale nii, et kiirte tsooni laius on 6 cm. Pärast jooniste ja mõõtude paika saamist sai hakata projekteerima erinevatest detailidest koosnevat konstruktsiooni mudelit. Esmatähtis oli lähtuda päikesekiirte langemisnurgast paraboolpeeglit ja kiirte fookuspunktit. Nende aspektide järgi tuli konstruktsiooni mudeli mõõtmed paika panna ja detailid valmis modelleerida.



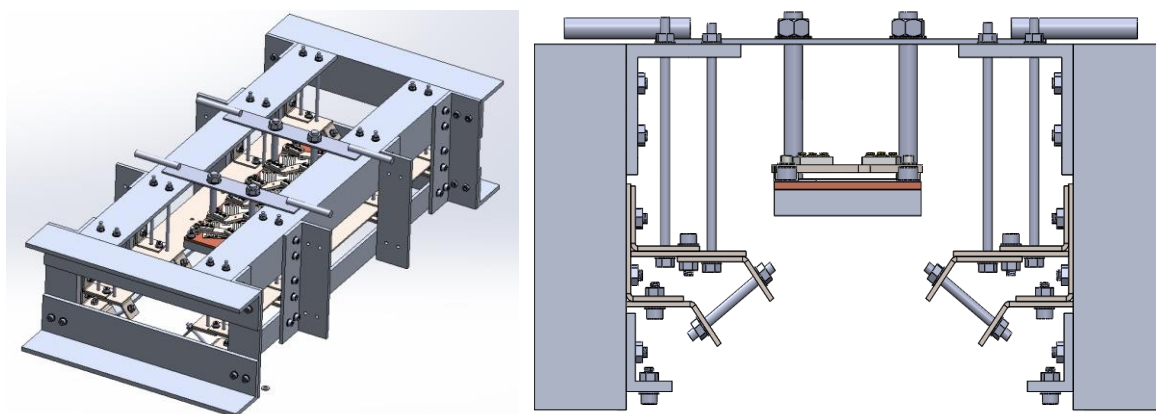
Joonis 2.4 Päikesekollektori paraboolpeegli ja päikese valguskiirte joonis koos vastuvõtja konstruktsiooni joonisega (vasakul kaugelt ja paremal lähemalt) [7]



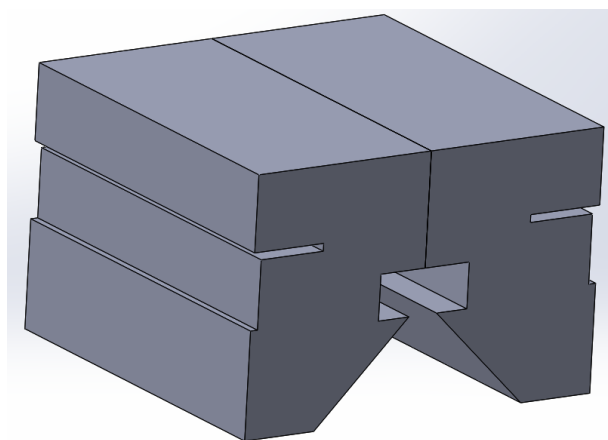
Joonis 2.5 Paraboolpeegli päikesekollektori vastuvõtja mudeli joonis koos konstruktsiooni detailide joonistega esivaates [7]

Projekteerimisel lähtuti algselt olemasolevast korpuse lahendusest, millele kinnitub kollektori vastuvõtja, millest tuli teha mõõtmetelt väiksem mudel. Väiksem mudel hoiab kokku majanduslikke ressursse ja seda oleks kergem katsetada ning täiustada. Eesmärgiks oli mudel ehitada nii, et korpuse keskel paikneva lati kuumenemisel oleksid soojuslikud kaod atmosfääri võimalikult minimaalsed.

Algsete päikesekollektori jooniste (joonised 2.4 ja 2.5) järgi sai modelleeritud kollektori vastuvõtja isolatsiooni raamkonstruktsioon. Mudeli konstruktsiooni kontseptsioon arutati läbi juhendajaga. Arvesse võeti erinevaid aspekte, et vähendada kollektori soojuskadusid. Kõigepealt tuli arvestada, et konstruktsioon ja isolatsioon selle ümber oleks stabiilne ning õhk isolatsioonikihtide vahel võimalikult kokku surutud, et piirata konvektiivset soojusülekannet. Raami konstruktsioon (joonis 2.6) projekteeriti soovitud isolatsiooni vormi (joonis 2.7) ning päikesekiirte fookuspunkti ning peeglitl peegelduvate kiirte kaldenurga (joonis 2.2) järgi.



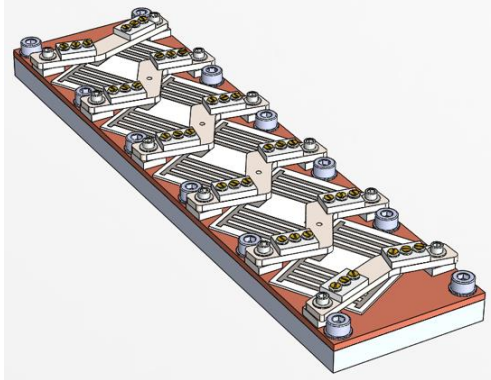
Joonis 2.6 Projekteeritud vastuvõtja mudeli metallkonstruktsiooni ja vastuvõtja lati 3D mudelid



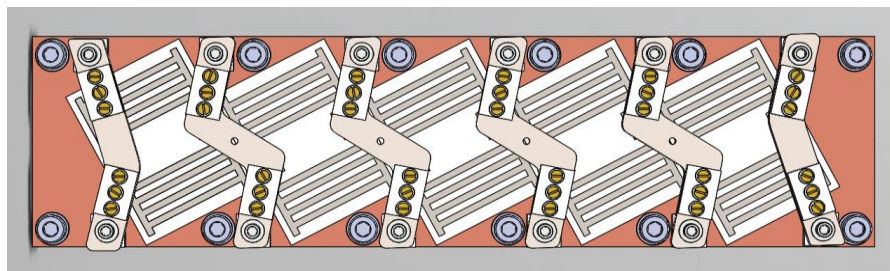
Joonis 2.7 Vastuvõtja isolatsioonmaterjali detaili ligikaudne soovitud lõpptulemus [9]

Päikesekollektori vastuvõtjalati mudeli laius peab olema vahemikus 60...100 mm, sest lati töötsooni laius on 60 mm. Latt projekteeriti 64 mm lai, et mahuks peale ka plaattakistid ning jääks ruumi detailide kinnitustele. Arvestada tuli, et vastuvõtjalati koost mahuks isolatsiooni raamikonstruktsiooni vahele. Takistid modelleeriti lati ääre suhtes väikese nurga all, selleks et soojuskatse jaoks mahuks 5 plaattakistit vastuvõtjalatile ning poltide jaoks oleks piisavalt ruumi. Takistite kohale modelleeriti 6 detaili, millele kinnitatakse erinevad elektriühendused. Need detailid on just sellise kujuga (joonis 2.8), sest need liiguvad üle takistite positiivsest ja negatiivsest

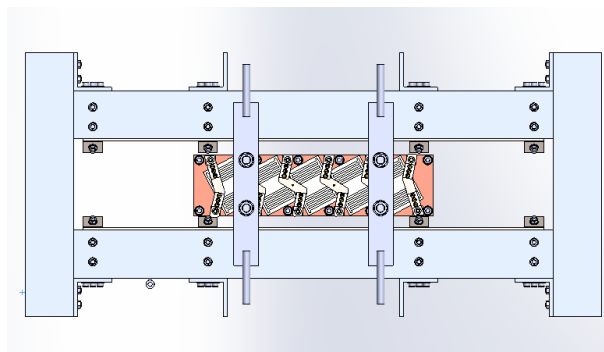
elektriühendusest, et takistite ja elektrijuhtmete ühendused saaks omavahel kokku suruda. Detailid on kinnitatud kahest otsast poltide abil kinnitusdetailiga. Vastuvõtjalati 3D mudel on toodud joonisel 2.9 ning kogu vastuvõtja 3D mudeli pealtvaade joonisel 2.10



Joonis 2.8 Modelleeritud kollektori vastuvõtjalati pealtvaade koos viie kütteallikaga ja kuue elektriühenduse



Joonis 2.9 Vastuvõtjalati 3D mudel



Joonis 2.10 Vastuvõtja 3D mudeli pealtvaade

2.3 Materjalide valik

2.3.1 Mudeli konstruktsiooni materjalid

Vastuvõtja raami konstruktsioon koosneb alumiiniumist ja roostevabast terasest detailidest. Alumiiniumit on tulenevalt tema heast töödeldavusest, odavusest, kergusest ja samas piisavast

tugevusest kasutatud suurte kandvate detailide puhul. Eesmärgiga mahutada konstruktsiooni sisse võimalikult palju ja tihkelt isolatsioonimaterjali (et õhk ei pääseks isolatsioonikihtide vahele), tuli väiksemad isolatsioonikihte hoidvad detailid teha suhteliselt õhukesed (3 mm). Eelnevast tulenevalt otsustati isolatsioonikihte hoidvad detailid teha roostevabast terasest, mis on küll raskemini töödeldav kui alumiinium, kuid samas antud juhul kasutamiseks piisavalt tugev. Kõige suuremad detailid on kaks alumiiniumist L-profiili ristlõikega 50x50x5 mm ja pikkusega 500 mm, mille külge on kinnitatud teised konstruktsiooni moodustavad detailid. Roostevabast terasest detailide hoidmiseks ja isolatsioonimaterjali stabiliseerimiseks on kasutatud konstruktsiooni sees 4 mm läbimõõduga terasest keermelatte. Kuna konstruktsiooni alumisse osasse jääb ava, kust tuleb sisse päikesekiirgus, siis soojuskadude ja konvektiivse soojusülekande vähendamiseks kaetakse ava karastatud klaasiga. Karastatud klaasi kinnitamiseks on ühendatud konstruktsiooniga 30x20x4 mm L-profiilid pikkusega 500 mm. Tabelis 2.1 on toodud kõikide raamkonstruktsiooni detailide andmed.

Tabel 2.1 Raamkonstruktsiooni detailide andmed

Detaili nr	Ristlõike mõõtmed (H x B x T), mm	Pikkus L, mm	Materjal	Kogus
1	40x40x4 (L-profiil)	140	Alumiinium	8
2	30x20x4 (L-profiil)	500	Alumiinium	2
3	50x50x5 (L-profiil)	500	Alumiinium	2
4	50x2 (Ristkülik)	480	Roostevaba teras	2
5	30x25x2 (L-profiil)	20	Roostevaba teras	8
6	45x25x2 (L-profiil)	20	Roostevaba teras	8
7	50x2 (Painutatud detail, pinnalaotusena ristkülik)	20	Roostevaba teras	16
8	50x50x5 (L-profiil)	275	Alumiinium	4

2.3.2 Mudeli vastuvõtjalati materjalid

Suur roll ja tähtsus on ka vastuvõtjalati materjali valikul. Vastuvõtjalati kandva osa moodutab latt, milleks on 250 mm pikkune, 64 mm laiune ja 10 mm paks alumiiniumist ja vasest plaat. 3 mm paksune vasest latt on omakorda kinnitatud 10 mm paksuse alumiiniumlati peale. Vasest latile kinnitatakse soojusallikad, et kütta detaili kuni 70W võimsusega, ja temperatuuriandurid selleks, et mõõta lati erinevate punktide temperatuuri, mis võib tõusta kuni 350 °C. Kasutatakse kahte latti, sest läikiv alumiiniumlatt on katsete käigus vaja suurema neeldumisteguriga musta alumiiniumlati

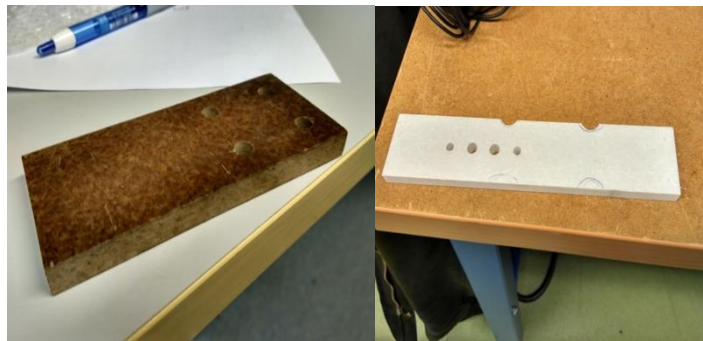
vastu vahetada. Alumiiniumit kasutatakse, sest ta on kerge, hästi töödeldav ja hea soojusjuhtivusega ning alumiiniumlati ülesandeks on päikesekiirgust soojusena salvestada ning seda edasi juhtida. Vasklatti kasutatakse, sest sinna peale saab kinnitada kütteallikad ja temperatuuriandurid koos elektriühendustega. Kuna katsete käigus võib temperatuur lati peal tõusta kuni 350 °C, siis peavad materjalid, mis aitavad kinni hoida andureid ja soojusallikaid, olema vastupidavad sellisele temperatuurile. Arvestada oli vaja, et elektri- ja soojusjuhtivus oleksid head ning vask vastab nendele tingimustele. Vask ja alumiiniumil on kõrge sulamistemperatuur ja nad püsivad temperatuuril 300-350 °C. Lati soojuse säilitamiseks on vaja teha võimalikult hea isolatsioon, et soojus- ja energiakaod oleksid võimalikult väikesed, mistõttu on isolatsioonimaterjali valik ümber vastuvõtja lati väga suure tähtsusega.

Vaskplaat ühendatakse alumiiniumplaadiga poltide abil ja nende vahele pannakse õhuaukude vähendamiseks grafiiti. Vaskplaadi peale on mõeldud 5 plaattakistit, mis täidavad kütteallika funktsiooni. Takistite kohal on 6 detaili, mis on roostevabast terasest, sest teras peab vastu kuumusele 300-350 °C, ei teki korrosiooni ning iga roostevaba terasest tüki peale on mõeldud kaks detaili, mis on elektriisolaatorid ja aitavad kinnitada elektriühendusi. Roostevaba terasest detailid on kinnitatud elektriisolaatorist detailidele ja poltide abil vasklati külge. Vastuvõtjalati kõikide detailide andmed on toodud Tabelis 2.2. Tabelis on sümboliga „-“ kujutatud detailid, mida ei saa kolme küljepikkuse abil kirjeldada.

Tabel 2.2 Vastuvõtjalati detailide andmed

Detaili nr	Mõõtmed (A x B x L), mm	Materjal	Kogus, tk	Kirjeldus
1	10x100x246	Alumiinium	1	10 mm paksusega plaat
2	3x100x246	Vask	1	3 mm paksusega plaat
3	-	Roostevaba teras	6	Elektriühenduste kinnituse detaili hoidja
4	12x10x3	<i>Macor</i>	12	Aukudega risttahukas elektrijuhtmete ühenduseks
5	-	<i>Macor</i>	12	Detail roostevaba terase tüki kinnitamiseks vaskplaati
6	51x38x1	Alumiiniumoksiid	5	Plaattakisti

Alumiinium ja vasest latile on vaja kinnitada sellisest materjalist detail, mis peab vastu temperatuurivahemikule 300...350 °C. Detailile peab saama kinnitada elektriühendusi ja temperatuuriandureid. Selleks, et teada saada, kas keraamiline või teflonist materjal sobiks andurite ja voolujuhtmete kinnitusdetaili materjalina kasutamiseks, teostati soojuskatsed. Soojuskatsed teostati vastavas TalTech-i laboris ning nende käigus kuumutati materjale 300...350 °C-ni. 300°C juures hakkas keraamiline materjal kärssama ning seega selgus, et seda ei saa antud projektis kasutada. Pilt keraamilisest materjalist katsekehast enne ja pärast kuumutamist on toodud joonisel 2.11. Tefloni sulamistemperatuur on 327 °C juures ning 350 °C korral hakkas teflon läbi paistma ning aine agregaatolek hakkas tasapisi tahkest vedelaks muutuma. Teflonmaterjali deformatsioon oli märgatav. See tähendab, et ka teflonit ei saa antud projekti raames kasutada. Pilt teflonist katsekehast pärast kuumutamist on toodud joonisel 2.12. Edasi uurides oli potentsiaalseks kasutatavaks materjaliks *Macor* ja kvartskiust plaat. Kasutatavaks materjaliks valiti *Macor*. *Macor* sai valitud, sest ta peab vastu kuni 1000 °C keskkonnas, on lihtsasti töödeldav, hea elektriisolaator ja vastupidav survepingele [10].

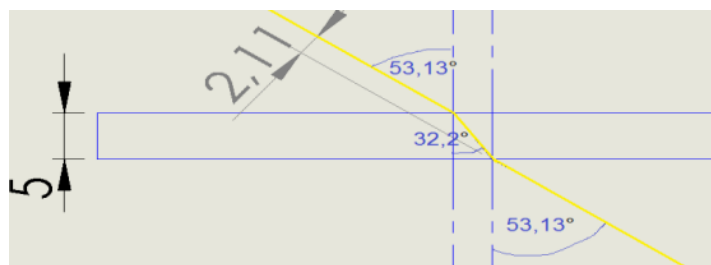


Joonis 2.11 Keraamilise materjali katsekeha pärast kuumutamist (vasakul) ja enne kuumutamist (paremal)



Joonis 2.12 350 °C juures sulanud ja läbipaistvad teflonmaterjali kehad (vasakul) ja samad deformeerunud kehad pärast ahjust välja võtmist toatemperatuuril

Läbi 20 mm laiuse ja 270 mm pikkuse vastuvõtja konstruktsiooni ava, mille kaudu hakkavad tulevikus vastuvõtjasse liikuma päikesekiired, tekib arvestatavalt suur soojuskadu. Selleks, et soojuskadusid veelgi vähendada, tuleb katta ava teatud materjaliga. Arvestama peab, et päikesekiirte nurk ei tohi pärast ava katjat muutuda ning kiirte suund peab jääma samaks. Üks võimalus on kasutada ava katmiseks klaasi. Valguse murdumine läbi klaasi muudab valguskiirguse suunda väga vähesel määral (joonis 2.13), sest klaasi pakus on ainult 5 mm. Teades õhu optilist tihedust vaakumi suhtes ja klaasi optilist tihedust, on võimalik valguse murdumine läbi klaasi valemi 2.1 abil välja arvutada. Klaasi siseneva valguskiire ja klaasist väljuva valguskiire kauguse üksteisest, mis on 2,11 mm, saab leida *Solidworks* programmi abil. Oluline on märkida ka, et arvutus on tehtud kõige äärmuslikumas punktis. Langemisnurka vähenedes väheneb ka murdumisnurk, mistõttu klaasi siseneva ja väljuva valguskiire omavaheline nihe väheneb veelgi [11].



Joonis 2.13 Valguskiire murdumine 5 mm paksuses karastatud klaasis [7]

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \quad (2.1)$$

kus n_1 – klaasi optiline tihedus,

n_2 – õhu optiline tihedus,

$\sin \alpha$ – valguse langemisnurk, °,

$\sin \beta$ – valguse murdumisnurk, °.

Mudeli ava kaetakse karastatud klaasiga. Karastatud klaasil on paremad tugevusnäitajad ja see kannatab kõrgemaid temperatuure kui tavaline klaas. Peale eelmainitud omaduste on keemilised, peegelduslikud ja paisumise omadused karastatud klaasil samad, mis tavalisel klaasil. Kui karastatud klaasile avaldatakse tugevat survet ja see puruneb, siis klaas pudeneb pisikesteks tükke, mille puhul on oht minimaalne, et tõsiseid löikehaavu saada. Karastatud klaas on kuni 5 korda tugevam kui tavaline klaas ning on loodud kannatama kuni 275 °C [12]. Karastatud klaasi piirkonnas temperatuur üle 275 °C ei tõuse. Klaasi kinnitamiseks on mõeldud kaks alumiiniumist 30x20x4 L-profiili pikkusega 500 mm, mis on vastuvõtja mudeli konstruktsiooni alumiiniumist 40x40x4 L-profiilide (pikkus 140 mm) küljes. Klaas kinnitatakse raamistikku survestamise teel. Klaasi ja alumiiniumi vahele asetatakse ka 10 mm FPB 10 kivivillaplaati, mille eesmärk on kaitsta klaasi

purunemise eest ja samas ka vähendada alumiiniumi ja klaasi omavahelist soojusjuhtivust. Klaasi raamile kinnitamiseks ühendatakse mudeli kahele 30x20x4 alumiiniumist L-profiili külge kaks 40x40x4 pikkusega 500 mm L-profiili (joonis 2.14) [7].



Joonis 2.14 Raamis oleva karastatud klaasi näide [7]

Raamkonstruktsiooni ja vastuvõtjalati põhiliseks isoleerivaks materjaliks on valitud kivivillaplaat. Kivivillaplaat tagab tulekindluse ja on madala soojusjuhtivusega $0,035 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Samuti on kivivillaplaati kerge töödelda ning see on ka piisavalt jäik, et sellest keerulisema geomeetriaga isolatsiooni konstruktsioon teha. Tähtis on, et isolatsioon ei takistaks valguskiirguse levikut raami vastuvõtjalatile. Selleks on lahendus teha 10 mm paksustest kivivillaplaadi tükkidest sobiva kaldega isolatsiooni tükid, mida hoiavad kinni vasest 2 mm paksused plaadid. Kivivillaplaadid surutakse vastuvõtja konstruktsiooni vahele ning kivivillaplaatidele lisasurve andmiseks ja õhuaukude vähendamiseks pannakse kivivilla peale 2 mm paksused vaseplaadid [13].

Vastuvõtja konstruktsiooni ja vastuvõtjalati puhul kasutatakse isoleerimiseks kahte erinevat materjali: FPB 10 kivivillaplaati (joonis 2.15) ja keraamilist kiudvilla (joonis 2.16). FPB 10 tuletõkkeplaati on mõistlik kasutada korpuse väljast isoleerimisel ja seest isoleeritakse kohad, kus temperatuur ei ületa $200 \text{ }^\circ\text{C}$. FPB 10 kasutatakse, kuna tema lõikamine on lihtne ja kergesti teostatav ja tal on väga madal soojusjuhtivus. Kivivillaplaatide detailid kihid pannakse üksteise peale virna ning pressitakse vastuvõtja konstruktsiooni vahele nii, et võimalikult vähe õhku jääks kihtide vahele ja konstruktsiooni sisse. Kollektori vastuvõtja alumiiniumlati isoleerimiseks sobib keraamiline kuumuskindel kiudvill, sest see kannatab pikalt kuni $1280 \text{ }^\circ\text{C}$ ja tema keemiline kvaliteet on parem kui FPB 10 plaadil, sest kivivillaplaat hakkab $200 \text{ }^\circ\text{C}$ juures ohtlikku kemikaali eritama [14]. Mõlemad plaadid on madala soojusjuhtivusega ja tulekindlad, mistõttu on need ka valitud [13] [14].



Joonis 2.15 Paroc FPB 10 kivivillaplaat [13]



Joonis 2.16 Keraamiline kiudvill [14]

3. SOOJUSKATSE TEOSTAMINE JA TULEMUSTE ANALÜÜS

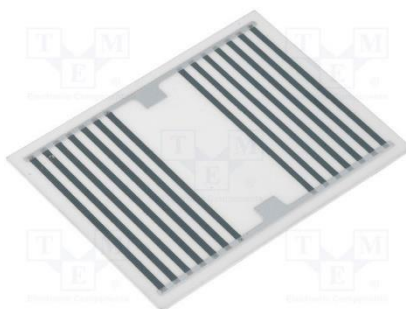
Valminud mudeli katsetamiseks on vajalik raami keskel paikneva alumiiniumlati kuumutamine kindla võimsuse juures ning temperatuuri mõõtmine raami konstruktsiooni ja alumiiniumlati erinevates punktides. Kuna päikesekollektor ei ole antud lõputöö valmimise hetkel võimeline ennast ise päikese asukoha järgi liigutama, siis on ehitatud elektrooniline küttekeha, mis võimaldaks alumiiniumlati ühtlaselt kuumutada kuni 300 °C. Elektriga kuumutamise üks positiivne külg on ka võimalus tagada kontrollitud stabiilne võimsus küttekehale. See võimaldab uurida soojusülekanemehhanismide rolli süsteemis läbi alumiiniumlati maksimaalse temperatuuri jälgimist teadaoleva küttevõimsuse juures.

3.1 Eeltöö

3.1.1 Süsteemi kütmise põhimõtted

Katsetused toimuvad erinevate alumiiniumlattidega, millest üks on läikiva pinnaga ja mille neeldumistegur ϵ on 0,3 ja teine (neeldumisteguriga 0,9) on värvitud üle musta värviga, et suurendada neeldumistegurit. Sellepärast peab olema küttekeha võimalik paigaldada kergesti ühelt latilt teisele, kuid küttekeha peab tagama soojuseülekande võimalikult ühtlaselt. Oluline on, et küttekeha võimaldaks saavutada 300...330 °C, mis seab küttekeha ehitamisele piirangud, millega tuleb arvestada.

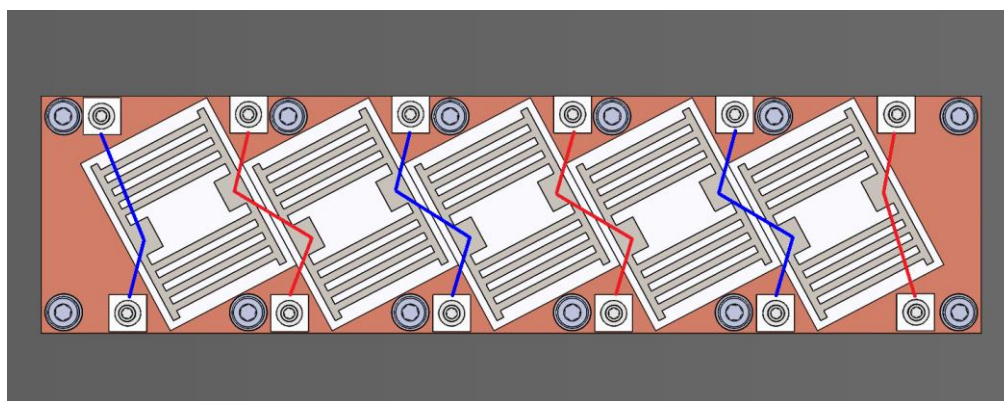
Kütteelementideks on valitud 5 keraamilist plaattakistit *TELPOD GBR-387* (joonis 3.1) takistusega 75 Ω , sest need töötavad ka temperatuuriga 300...330 °C. Takisti maksimaalne võimsus on 80 W ja paralleelselt ühendatud 5 takistiga 400 W, mis on soojuskatse jaoks piisav [15].



Joonis 3.1 *TELPOD GBR-387* plaattakisti [15]

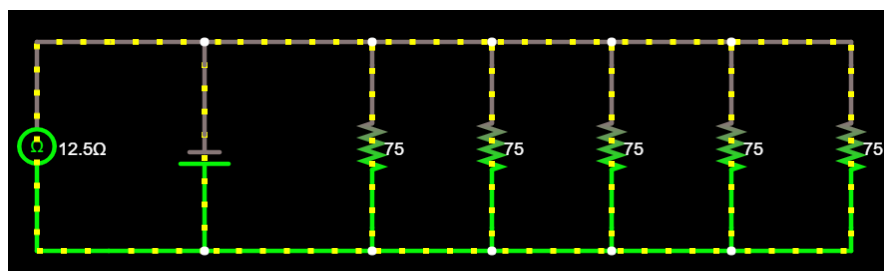
Takistid paigutatakse 3 mm paksusele vasklatile ning takistitele ja vasklatile kleebitakse grafiiti, et detailide vahele jääks võimalikult vähe õhualu. Vasklatt on pealtvaates alumiiniumlatiga samade mõõtmetega ehk 250x100 mm. Kuna jootetina sulab juba 220 °C juures, siis ei ole võimalik takisteid

omavahel kokku joota. Takistite ja nende ühenduste kinnitamiseks on kujundatud kuus 3 mm paksust roostevabast terasest kinnitusdetaili, kuhu peale kinnitatakse M2 poldiga risttahukakujulised detailid materjalist *Macor*. Risttahukakujulistele detailidele kinnitatakse omakorda temperatuurianduri elektrijuhtmete ühendused. M2 ja M3 poltidega surutakse elektriühendused *Macor* detaili ja roostevaba terasest detaili peale kinni. Ühendused takistite vahel tehakse elektrijuhtmetega ning elektrijuhtmed ühendatakse takistiga poltide ja hõbepaberi abil. Joonis 3.2 iseloomustab ühendusi takistite vahel ja joonisel 3.3 on elektriskeem, kus on näidatud toiteploki ja kuumutatavate takistite omavaheline ühendus. Negatiivne ühendus tehakse 3 mm paksuse roostevaba terase detaili külge ja veetakse üle takistite nii nagu joonisel 3.2 siniste joontega näidatud. Positiivne ühendus on näidatud punase joonega. Positiivne ühendus ei tohi negatiivset ühendust kandvaid detaile puudutada, sest siis tekiks lühis. Samuti tuuakse toiteploki ühendused kaabliga, kus negatiivsed ja positiivsed ühendused kinnitatakse eraldi *Macor* materjalist detailide külge. Kaabel, mida kasutatakse on kuumuskindel ja mõeldud taluma temperatuuri 300...350 °C ja rohkemgi.



Joonis 3.2 Takistite ühendamine vasklatil (punane joon näitab positiivset ja sinine negatiivset vooluühendust)

Vasklatti kasutatakse, kuna seda on võimalik ühendada 12 poldiga alumiiniumlati külge ja polte lahti ühendades on võimalik kogu kütteelemendi konstruktsioon korraga ringi tõsta. Samuti on vase soojusjuhtivustegur nii suur, et tema paiknemine kütteelemendi ja köetava alumiiniumlati vahel takistab soojusülekannet väga minimaalselt. Vask- ja alumiiniumlattide vahele pannakse veel kleebitavat grafiiti, et vähendada kahe lati vahele jäävaid õhuaeke.



Joonis 3.3 Kütteekeha elektriskeem (vasakult: oommeeter, vooluallikas, takistid)

3.1.2 Temperatuuri mõõtevahendite valik

Mingi keha temperatuuri mõõtmiseks viiakse temaga termilisse kontakti teine keha, milleks on tavaliselt termomeeter. Mõõtmise hetkel peab termomeeteri tundmik olema termilises tasakaalus kehaga, mille temperatuuri mõõdetakse. Termomeeter näitab alati enda kui keha temperatuuri mingi temperatuurist sõltuva omaduse kaudu. Kõige rohkem kasutatakse selleks vedeliku mahtu ehk vedeliktermomeetrit, gaasi rõhku püsival mahul ehk gaastermomeetrit, tahke keha elektrilist takistust ehk takistustermomeetrit, termopinget kahe erineva metalli kokkupuutepunktis ehk termopaari ja keha kiirusintensiivsust ehk kiirguspüromeetrit [1].

Temperatuuri mõõtmine termopaari ja takistustermomeetriga tugineb termomeetri takistuse ja temperatuuri sõltuvusel, nii et igale temperatuuril väärtusele vastab takistuse kindel väärtus. Sõltuvalt termopaari ja takistustermomeetri materjalist on seos temperatuuri ning genereeritava termopinge või elektritakistuse vahel natuke erinev [1].

Antud lõputöös kasutatakse temperatuuri mõõtevahenditena takistustemperatuuriandureid. Kuumutatava lati temperatuuri mõõdetakse kuuest punktist RTD temperatuuri anduriga PT1000, mis annab täpse tulemuse, kuna sisaldab plaatinat ning lisaks kannatab andur ka üle 350 °C temperatuuri. Mõõtmiseks anduriga kasutatakse nelja juhtmega lahendust, sest kahe juhtmega ühendamisel võivad takistitega ühendatud elektrikaablite takistused mõõtetulemust piisavalt mõjutada.

Mõiste takistustermomeeter (*Resistance Temperature Detector – RTD*) tähistab temperatuuriandurit, milles kasutatakse sobivast materjalist valmistatud elektrilist takistuskeha, eeldusel, et selle materjali elektriline takistus sõltub temperatuurist ja takistuse sõltuvus temperatuurist on teada. Metallist takistustermomeetrite materjalid peavad vastama järgmistele nõuetele: takistuse muutus temperatuuri muutudes peab olema võimalikult suur, takistus lineaarselt sõltuv temperatuurist, materjal vastupidav kõrgetele temperatuuridele [16].

Valitud plaatina takistustermomeeter võimaldab täpseid mõõtetulemusi temperatuuri vahemikus -200...850 °C. Erinevalt termopaaridest ei ole PT1000 ühendamiseks vaja erikaableid. Plaatina takistustermomeetritakistus 0 °C juures on 1000 Ω ja 1000 °C juures 138.4 Ω. Takistus ja temperatuur sõltuvad üksteisest lineaarselt. PT1000 sensoris tekitab 1 °C temperatuuri muutus 0,385 Ω suuruse muutuse takistuses, seega isegi väike takistuse mõõtmisviga, näiteks sensori juhtmete takistus, võib tekitada temperatuuri mõõtmisel ebatäpseid tulemusi. Sellepärast kasutatakse PT1000 ühendamiseks nelja juhet nii nagu joonisel 3.4 näidatud. Kaks juhet juhivad voolu ja kaks mõõdavad pinget sensori klemmide pealt [17].

Kasutatavate takistustermomeetri alumiiniumjuhtmete pikkusest sõltub mõõtevea suurus, mida arvutatakse allikast [18] leitud valemi 3.1 abil. Kuna juhtme pikkusest sõltub mõõtevea, mis võib olla määrav, siis kasutatakse selle vea vältimiseks nelja juhtmega ühendust.

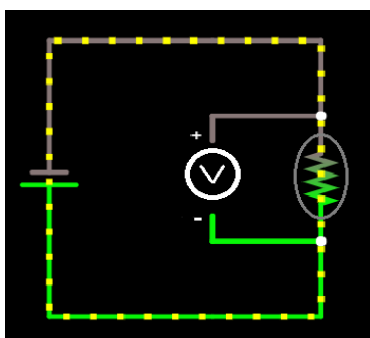
$$R = \rho_0 \cdot \frac{l}{A} \quad (3.1)$$

kus R – juhtme takistus, Ω ,

ρ_0 – materjali eritakistus, $\Omega \cdot m$,

l – juhi pikkus, m,

A – juhi ristlõikepind, m^2 .



Joonis 3.4 PT1000 takistustermomeetri (paremal) nelja juhtme ühendamis skeem koos mõõteseadme (keskel) ja toiteallikaga (vasakul)

Metallide või pooljuhtide baasil tehtud takistustemperatuuri andurid (RTD) on tõenäoliselt kõige tavalisemad, mida temperatuuri mõõtmiseks kasutatakse. Metallide sisalduvate takistustermoandurite jõudlus on parem kui pooljuhtidel põhinevatel anduritel ja neid kasutatakse kõrge täpsuse tagamiseks temperatuuri mõõtmisel ning seetõttu on need ka valitud [19].

Metallilised takistusandurid on sageli metallilise traadi, nagu plaatina, vase, volframi või nikli, mitteinduktiivselt keritud mähis. Üldiselt saab RTD takistust reguleerida aktiivsete takistuskilede pikkuse ja laiuse suhte reguleerimisega. Enamik metallmaterjalide takistuse R varieerumist temperatuuri T suhtes võib esitada võrrandiga 3.2 [19]:

$$R = R_0(1 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + \alpha_3 T^3 + \dots + \alpha_n T^n) \quad (3.2)$$

kus R_0 - takistus valitud võrdlustemperatuuril T_0 , Ω ,

α_1 - valemi koefitsient,

T_n - valitud võrdlustemperatuur, $^{\circ}C$.

Kõige sagedamini kasutatavad metallid on plaatina, nikkel ja vask ning üldjuhul vajavad nad täpse temperatuuri mõõtmiseks summeerimist, mis sisaldab vähemalt tegurit α_1 ja/või α_2 . Tüüpilises tehnilises rakenduses, kus kasutatakse ainult α_1 , on tulemuseks saadud mittelineaarsus vaid umbes

0,5 % temperatuurivahemikus - 40 kuni + 140 °C. Metallilise RTD nominaalne takistus R_0 võib varieeruda mõnest oomist mitme kilo-oomini. 100 Ω on siiski standardväärtus. Metallilise RTD takistuse muutus võib olla üsna suur ja tüüpiliselt kuni 20 % nominaalsest takistusest antud temperatuurivahemiku ulatuses [19].

3.1.3 Tutvumine katseseadmetega

Soojuskatse mõõtmiste teostamiseks tuleb valida erinevaid parameetreid ja kasutamisevõimalusi silmas pidades toiteplokk, mõõteriist ja multipleksor, mis on vajalik temperatuuriandurite ühendamiseks mõõteriistaga. Toiteplokki kasutatakse vastuvõtjalati elektriliseks kuumutamiseks.

Teades vooluringi kogutakistust ja nõutavat võimsust, saab välja arvutada voolutugevuse ja pinget, mida peab toiteplokk võimaldama. Vastuvõtjalatil olevate takistite summaarne takistus on leitav valemiga 3.3 [20]. Ühe plaattakisti takisti takistus on 75 Ω ja takisteid on 5 ning ühendatud paralleelselt. Kogu vooluringi takistuseks tuleb 15 Ω ja katsetamiseks on vajalik võimsus 30-70 W.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \quad (3.3)$$

kus R – süsteemi summaarne takistus, Ω ,

$R_1 \dots R_4$ – üksikud takistused süsteemis, Ω .

Toiteplokkiks sai valitud *Xantrex HPD 60-5* (joonis 3.5), mis võimaldab väljundisse anda 0...60 V pinget ja 0...5 A voolu 100 W juures. Toiteploki hea omadus on veel programmeerimisvõimalus, mis võimaldab tulevikus mõõteseadme täielikult automatiseerida [21].



Joonis 3.5 Kasutatav Xantrex HPD 60-5 toiteplokk [21]

Temperatuuri mõõtmisteks on vaja mõõteriista, mis võimaldaks mõõta mitmest punktist korraga ja erinevate termoelektriliste komponentidega. Oluline on ka mõõteseadme programmeerimisvõimalus, et mõõtmisi oleks võimalik seadistada vastavalt oma vajadustele ja

salvestada *Microsoft Excelisse*. Nende kriteeriumite tõttu sai valitud mõõteriistaks *Keysight 34972A* mõõteseade (joonis 3.6). Valitud seade võimaldab mõõta korraga kuni 60 erinevat signaali multipleksori mooduliga, kusjuures on võimalik ka seadistada, mis intervalliga mõõtmised toimuvad [22].



Joonis 3.6 Kasutatav mõõteseade *Keysight 34972A* [22]

Sisenditena kasutatakse mõõteriistale mõeldud kahekümne kanaliga multipleksori moodulit *34901A* (joonis 3.7), millele saab ühendada 20 sisendit. Multipleksor võimaldab mõõta 60 kanalit sekundis ja teha kahe ja nelja juhtmega mõõtmisi. Samuti on multipleksoril sisse ehitatud termopaaride võrdlusjootekoha temperatuuriparand, mis võimaldab mõõta termopaaridega täpseid tulemusi [22].



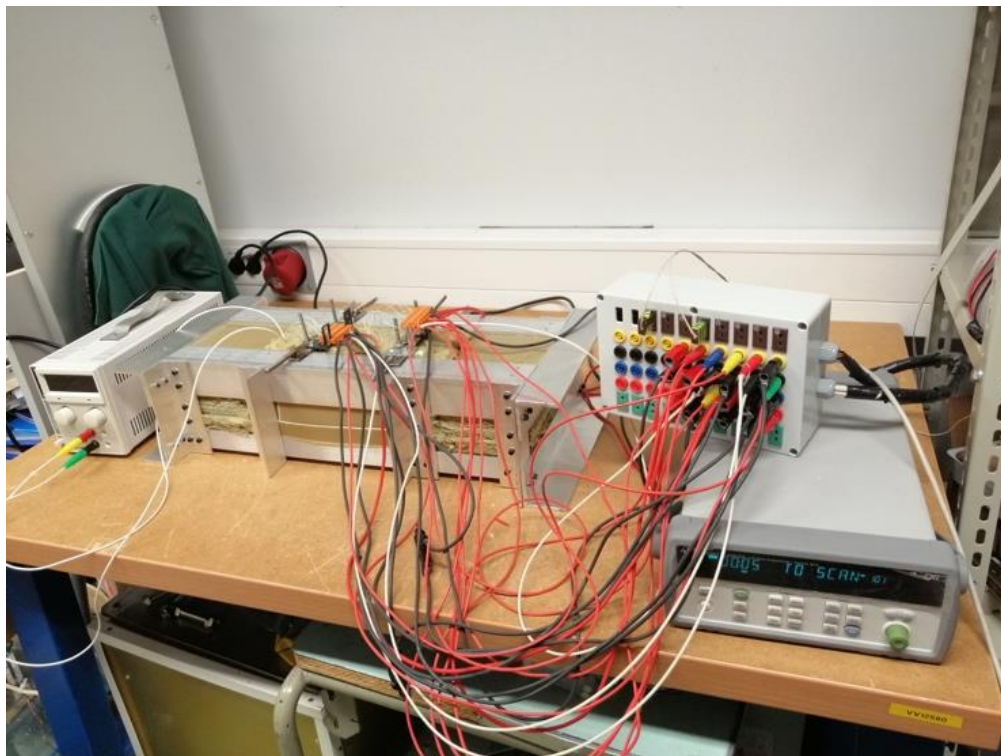
Joonis 3.7 *34901A* 20 kanaliga multipleksor [23]

Mõõteseadmele on sisse ehitatud 2.0 USB mälu port, mis võimaldab andmeid, mida seade on salvestanud, kergesti kätte saada, ilma et peaks arvutiga seadme ühendama. Arvutiga ühendamiseks on seadmel LAN ja USB pordid, mis võimaldavad seadme lihtsalt ühendada iga tänapäevase arvutiga ning vaja ei ole eriotstarbelisi kaableid või konvertereid. Programmid on tasuta alla laaditavad internetist, mis võimaldavad seadme tuvastamist arvutis ja seadmega erinevaid operatsioone teha. Seadet on võimalik programmeerida mõõtmisi tegema vastavalt oma soovile mitut moodi. Seadme tarkvara toetab programme *C*, *C++*, *Visual Basic*, *Visual Studio*, *LabView*, *Python* ja *Mathlab* [22].

3.1.4 Mudeli ehitamine

Ehitatud süsteem (joonis 3.8) koosneb põhiliselt neljast suuremast osast: vastuvõtjalatt ehk küttekeha; isoleerivad kivivillaplaadid ja keraamiline kiudvill ümber lati; metallist raamkonstruktsioon isoleerivate kihtide ja lati ümber; elektriühendused toiteploki, takistite ja mõõteriistaga. Kõik detailid peale roostevaba terasest detailide töötles töö autor Tallinna

Tehnikaülikooli laborites. Roostevaba terasest detailid töötles ettevõtte Ferresto Laser OÜ autori koostatud *Solidworks* programmi 3D mudelite järgi.



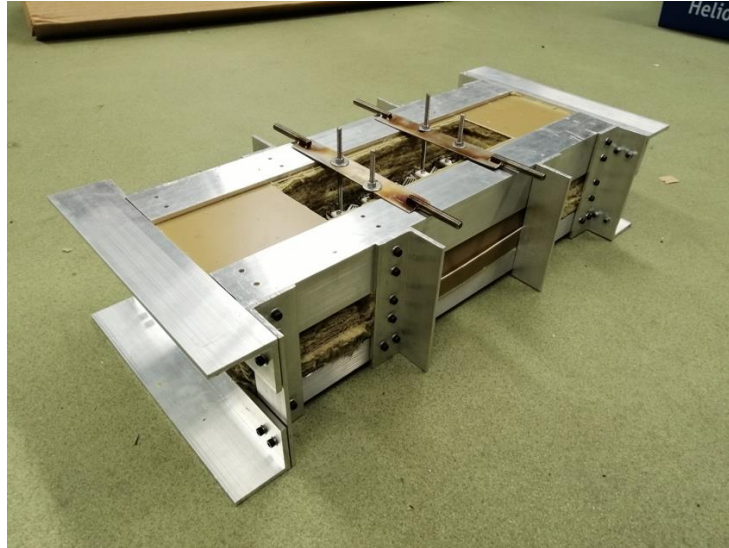
Joonis 3.8 Ehitatud vastuvõtja mudel koos toiteploki, mõõteriista ja elektri kaablitega

Vastuvõtjalati (joonis 3.9) vasest latile oli vaja puurida 24 auku: 12 M5 poltide jaoks, mis on mõeldud kinnitada vasest latti alumiiniumlatiga ja 12 auku *Macor* detailide kinnitamiseks. M3 poltidega *Macor* detailide kinnitamiseks vasest latti, tuli puuritud 2,5 mm läbimõõduga augud keerkestada M3 keermepuuriga. Alumiiniumlati kinnitamiseks vasest latiga keerkestati M5 keermepuuriga 12 puuritud auku. Kaks erinevat *Macor* materjalist detaili, mida oli mõlemat vaja 12 tükki, tehti CNC töötlemispingiga. Esimest detaili oli vaja kuue roostevaba terasest detaili kinnitamise jaoks vasklatile, nii et vasklatt ei puutuks roostevaba terasega kokku ja teist *Macor* detaili (3 puuritud auku) roostevaba terasest jupi peale, et kinnitada takistite ja termoandurite elektriühendused M2 poltide abil. Esimesel *Macor* detailil on puuritud auk M3 poldi jaoks, mis kinnitub keermesliitega vasklatile. Takistid vasklatil kinnitati teatud nurga all, et poltliited mahuksid vasklatile. Selleks, et installeerida küttekeha raamkonstruktsiooni külge, oli vaja kahte roostevaba terasest detaili, mis hoiaks küttekeha raamkonstruktsioonis paigal õige koha peal. Vastuvõtjalatt on kinnitatud nende kahe roostevaba terasest detaili külge kahe M5 keermelati ja mutrite abil.



Joonis 3.9 Vastuvõtjalatt koos takistite ja elektriühendustega

Vastuvõtja raamkonstruktsioon (joonis 3.10) koosneb põhiliselt alumiiniumist L-profiilidest, väiksematest roostevabast terasest detailidest ja M4 poldliidetest ühendamiseks kõiki raami detaile omavahel. Kasutatud on kahte alumiiniumist 50x50x5 mm sügavusega 500 mm L-profiili (16 puuritud auku), millele on kinnitatud 8 alumiiniumist 40x40x4 L-profiili (6 auku igal detailil) pikkusega 140 mm, mille iga detaili alumise otsaga on ühenduses 30x20x4 pikkusega 500 mm alumiiniumist L-profiil (8 auku), mida omakorda on kasutatud karastatud klaasi kinnitamiseks ja konstruktsiooni stabiliseerimiseks. Erinevaid roostevabast terasest juppe on kasutatud selleks, et isoleerivat keraamilist kiudvilla ja kivivillaplaate võimalikult kokku suruda ja stabiilsena hoida, et õhuvahed oleksid võimalikud väikesed minimeerimaks konvektsiooni tõttu tekkivat soojuskadu. Isoleerivaid materjale hoiab kinni raamkonstruktsioon koos M4 keermelattidega, mis ulatuvad ühest konstruktsiooni otsast teise läbi kivivillaplaatide. Vaakumsüsteemi ühildamiseks ja raami stabiilsena hoidmiseks on lisatud raamkonstruktsioonile ka neli 275 mm pikkust 50x50x5 alumiiniumist L-profiili (4 auku).



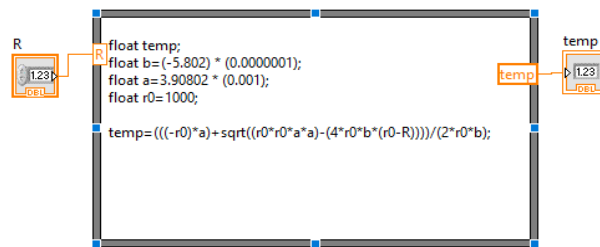
Joonis 3.10 Vastuvõtja konstruktsioon koos isolatsioonikihtide ja konstruktsiooni sees oleva ilma elektriühendusteta vastuvõtja latiga

Viimaseks mudeli ehitamise osaks oli omavahel integreerida isoleeritud vastuvõtjasüsteemi plaattakistid toiteploki ja temperatuuriandurid mõõteriistaga, et oleks võimalik vastuvõtjalatti kütta ja lati temperatuuri mõõta. Toiteploki positiivse ja negatiivse elektrilaengu klemmid ühendati klaaskiudkaablite abil takistite klemmidena. Klaaskiudkaablit kasutatakse, sest ta peab vastu kuni 350 °C kuumusele. Temperatuuriandurite jaoks kasutati K-termopaari elektrikaableid vastuvõtja raami sees, kus temperatuurid on kõrged ja vasest elektrikaableid vastuvõtja konstruktsioonist väljaspool ja kohtades, kus temperatuur on madal. Termopaarikaableid kasutati konstruktsiooni sees, sest need peavad vastu kuni 900 °C temperatuurile, on kergelt painduvad ning piisavalt väikse ristlõikega, et need läbi isolatsiooni vastuvõtja konstruktsioonist välja juhtida. Konstruktsiooni peal, isolatsioonikihtidest väljaspool, kasutati termopaari ja vasest elektrikaablite ühendamiseks eraldi kahte 10 ühendusauguga ühendusklemmi. Vasest elektrikaablite abil moodustati ühendusklemmi ühel poolel temperatuuri täpsemaks mõõtmiseks PT1000 temperatuuriandurile 4 juhtmega ühendus. Termopaari juhe lõigati kaheks kiuks, et anduri positiivse ja negatiivse laenguga kontaktid ühendada mõlemad ühe juhtmekiuga. Kaablid ühendati omavahel kuue takistustemperatuurianduriga. Mõõteriist ühendati arvutiga, et lugeda katse käigus andurite väljastatud signaalide andmed arvutisse.

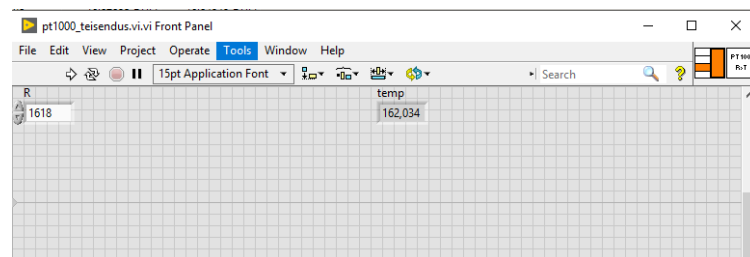
3.2 Mõõtmiste teostamine

Mõõteriista *Keysight 34972A* ühendamiseks arvutiga kasutatakse programmi *BenchLink Data Logger 3*. Ühenduse loomise järel valitakse multiplexori *34901A* kanalitele mõõteparameetrite

tüübid. Käesolevas töös valiti mõõteparameetriks takistus oomides, sest 4 juhtmega ühendatud PT1000 takistustemperatuuriandur mõõdab takistust, mis tuleb ümber teisendada temperatuuriks. Teisendamiseks on kasutusele võetud tarkvara *LabView* ning kasutatakse programmkoodi (joonis 3.11). Esipaneelil (joonis 3.12) saab sisestada anduri mõõdetava takistuse väärtuse (Ω) ning see teisendatakse temperatuuri väärtuseks ($^{\circ}\text{C}$).



Joonis 3.11 *LabView* takistuse ja temperatuuri teisendusprogrammi plokkdiagramm



Joonis 3.12 *LabView* takistuse ja temperatuuri teisendusprogrammi esipaneel

Temperatuuri tõusu kiirust arvesse võttes valiti andmete lugemise intervalliks *Benchlink data logger 3* programmis 10 sekundit. Programm näitab mõõdetud takistuse hetkväärtust ja ka minimaalset, maksimaalset ning keskmist väärtust. Joonisel 3.13 on toodud *Benchlink data logger 3* programmi mõõtmisandmete vaheleht.

Scan List Name	Set	Start	Interval	Stop	Set	Name	Export Data	Start/Stop	Scan Count
Scan List A (Base)	...	Immediately	00:00:10.00	User	...	Data 5/19/2019 22:17_15[Scanning]	Auto		Instr: 28

Instruments	Channel	Scan Order	Measurement	Data	Limit	Min	Max	Last Scan
<1.Instr1>	101	1	Two-Wire Ohms	OVLd OHM	None	OVLd OHM	OVLd OHM	
<1.Instr1>	102	2	Two-Wire Ohms	OVLd OHM	None	OVLd OHM	OVLd OHM	
<1.Instr1>	103	3	Two-Wire Ohms	OVLd OHM	None	OVLd OHM	OVLd OHM	
<1.Instr1>	104	4	Four-Wire Ohms	2093.830 OHM	None	1981.055 OHM	2093.830 OHM	
<1.Instr1>	105	5	Four-Wire Ohms	1956.370 OHM	None	1865.240 OHM	1956.370 OHM	

Joonis 3.13 *Benchlink data logger 3* programmi mõõtmisandmete vaheleht

Temperatuur mõõdeti vastuvõtjalati kuuest punktist RTD takistitega. Mõõtmiskatses kasutati tavalist läikiva pinnaga alumiiniumlatti, mille kiirgamistegur ε on 0,09. Katse eesmärk oli mõõta konstruktsiooni vastuvõtja latil temperatuuri konstruktsiooni 0° ja 90° asendis maapinna suhtes.

Mõõtmised teostati 0° ja 90° asendis eraldi ja mõlemal puhul mõõdeti 30, 50 ja 70 W võimsuse korral vastuvõtjalati maksimaalne temperatuur. Et muuta võimsuseid, on vaja toiteploki muuta pinget. Mida suurem on pinge, seda suurem on elektrivool ja võimsus. Kuna katsed toimusid konkreetsete võimsustega, siis küttekeha, mis koosneb viiest takistist, võimsuse leidmiseks kasutati valemit 3.4. 30 W võimsuse korral on pinge $U = 26,1$ V ja voolutugevuse I väärtus 1,15 A, 50 W puhul vastavalt 33,8 V ja 1,48 A ning 70 W puhul 40 V ja 1,75 A.

$$P = UI \quad (3.4)$$

kus P – võimsus, W,

U – pinge, V,

I – vool, A.

Plaanitud oli mõõta temperatuuri kuue takistustemperatuurianduri abil, kuid katsete käigus jäid lõpuni tööle neli andurit. 30 W ja 50 W puhul toimis katse nii nagu oli plaanitud, kuid 70 W puhul lõpetati mõõtmine 350 °C juures, sest vastuvõtja latil ja seal läheduses olevad klaaskiust ja termopaari elektriakaablite materjalid ei kannata pikalt üle 350 °C temperatuuri. Seega 70 W mõõtmise puhul ei saadud katset lõpuni teostada. Kui konkreetse võimsuse juures ei olnud 1 minuti juures üle 0,1 °C temperatuuri muutumist, siis katse selle võimsuse juures lõpetati. Plaanitud oli mõõta temperatuuri kuue takistustemperatuurianduri abil, kuid katsete käigus jäid lõpuni tööle neli andurit, millest loeti välja anduri väärtus, mis näitas kõige kõrgemat temperatuuri. Iga mõõdetud võimsuse puhul kasutati tulemuste analüüsiks temperatuuri väärtust, mis oli antud juhul kõrgeim.

3.3 Mõõtetulemuste analüüs

Selleks, et teada saada vastuvõtjalati soojuskaod, analüüsitakse mõõtmistelt saadud tulemusi erinevate arvutuste abil. Soojuskaod tekivad soojusjuhtivuse, konvektsiooni ja soojuskiirguse tõttu. Mõõtmiste tulemusel selgusid 30, 50 W võimsuste juures kõrgeimad temperatuuri väärtused vastuvõtjalatil. Arvutuste tulemusena selguvad, kui suure osa soojuskaost moodustavad konvektiivne, soojusjuhtivuslik ja soojuskiirguslik soojusülekanne. Lisaks arvutatakse ka vastuvõtja konstruktsiooni mudeli soojusjuhtivustegur.

Järgnevalt on toodud valemid, mida kasutatakse soojuskadude leidmiseks. Näidisarvutused on teostatud 30 W võimsuse juures ja vastuvõtja 0° asendis, mis tähendab, et vastuvõtja konstruktsiooni ava, mis on kaetud karastatud klaasiga, on suunatud alla. Teiste võimsustega on samasugused arvutused tehtud ning kantud tabelitesse 3.2 ja 3.3. Võimsused, mis lähevad kaduma

soojuskiirguse, konvektsiooni ja soojusjuhtivuse kaudu, on vastavalt leitavad valemitega 3.5, 3.6 ja 3.7 [9].

Vastuvõtjas kuumutatava alumiiniumlati kiirgamistegur ε alumiiniumlatil on 0,09 [24]. Stefani-Boltzmanni konstant $\delta = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ [25]. Vastuvõtjalati pindala on $0,016 \text{ m}^2$, mis on arvatud vastuvõtjalati külje pikkuse $0,25 \text{ m}$ ja laiuse $0,064 \text{ m}$ abil. 30 W võimsuse juures saavutatud lõplik maksimaalne temperatuur on $247,40 \text{ }^\circ\text{C}$, mis Kelvini skaala ühikutes teeb $520,15 \text{ K}$. Algtemperatuur on $22,9 \text{ }^\circ\text{C}$, mis on Kelvinites $296,05 \text{ K}$. Nende andmetega arvutatakse soojuskiirgusest tulenev soojuskadu.

$$P_{kiirgus} = \delta \cdot \varepsilon \cdot A \cdot (T_L^4 - T_0^4) = \quad (3.5)$$

$$= 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,09 \cdot 0,016 \cdot (520,15^4 - 296,05^4) = 5,35 \text{ (W)}$$

kus $P_{kiirgus}$ – võimsuskadu soojuskiirguse kaudu, W,

δ – Stefani-Boltzmanni konstant, $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$,

ε – vastuvõtja kiirgamistegur,

A – vastuvõtja pindala, m^2 ,

T_L – alumiiniumlati lõplik maksimaalne temperatuur, K,

T_0 – välisõhu temperatuur, K.

Konvektsiooniat tuleneva soojuskao arvutamiseks kasutatakse valemit 3.6. Mõõtmise tehti asendis 0° maapinna suhtes ning vastuvõtjas seetõttu õhu ringliikumist ei esine ja õhu liikumist iseloomustav tegur on seega $K = 0$.

$$P_{konvektsioon} = K \cdot A \cdot (T_L - T_0) = 0 \cdot 0,016 \cdot (520,15 - 296,05) = 0 \text{ (W)} \quad (3.6)$$

kus $P_{konvektsioon}$ – võimsuskadu konvektsiooni kaudu, W,

K – õhu liikumist iseloomustav tegur, m/s.

$$P_{juhtivus} = K_r \cdot (T_l - T_r) \quad (3.7)$$

kus $P_{juhtivus}$ – võimsuskadu juhtivuse kaudu, W,

K_r – konstruktsiooni soojusjuhtivustegur, $\text{W}/^\circ\text{C}$,

T_r – lati algtemperatuur Celsiuse skaalas, $^\circ\text{C}$,

T_l – lati algtemperatuur Celsiuse skaalas, $^\circ\text{C}$.

Konvektsiooni puudumise tõttu saab soojusjuhtivusliku soojuskao võimsusena välja arutada valemi 3.8 abil.

$$P_{juhtivus} = P_{kogu} - P_{konvektsioon} - P_{kiirgus} = 30 - 0 - 5,35 = 24,65 \text{ (W)} \quad (3.8)$$

kus P_{kogu} – mudeli konstruktsiooni kogu soojuskadu võimsusena, W.

Temperatuuride vahe on leitav valemiga 3.9 [9].

$$\Delta T = T_{alg} - T_{lõpp} = 247,4 - 22,9 = 224,5 \quad (3.9)$$

kus ΔT – temperatuuride vahe, °C,

T_{alg} – algtemperatuur, °C,

$T_{lõpp}$ – lõpptemperatuur, °C.

Vastuvõtja mudeli soojusjuhtivustegur on arvatav valemitest 3.7 ja 3.9 tuletatud valemiga 3.10 [9].

$$K_r = \frac{P_{juhtivus}}{\Delta T} = \frac{24,64}{224,5} = 0,110 \left(\frac{\text{W}}{\text{°C}} \right) \quad (3.10)$$

Tabelis 3.1 on toodud asendites 0° ja 90° saavutatud vastuvõtjalati maksimaalsed temperatuurid käesolevas ja eelnevas mudelis. Tabelist (tabel 3.1) on näha, et temperatuuride erinevus võrreldes eelnevas mudelis saavutatud maksimaalse temperatuuriga on üle 67,3 °C. Täpset väärtust ei ole välja toodud, sest 70 W võimsusega kuumutamisel läks temperatuur üle 350 °C ning sel hetkel katse lõpetati.

Tabel 3.1 Asendis 0° ja 90° saavutatud vastuvõtjalati maksimaalsed temperatuurid käesolevas ja eelnevas mudelis

Asend, °	Saavutatud max temperatuur käesolevas mudelis, °C	Saavutatud max temperatuur eelnevas mudelis, °C [9]	Temperatuuride erinevus, °C
0	Üle 350	282,7	Üle 67,3
90	Üle 350	269,5	Üle 80,5

Tabelis 3.2 on võrreldud käesoleva töö mudeli ja eelneva mudeli lati algtemperatuuri, mis erineb kõigest 0,1 °C, ja vastuvõtja lati maksimaalset temperatuuri erinevatel võimsustel 0° asendis ja 90° asendis. Tabelis sümboliga “-“ märgitud lahtritel puuduvad antud võimsuse puhul andmed. Tabelist 3.2 saab välja lugeda, et käesolevas mudelis on iga võimsuse puhul saavutatud temperatuur kõrgem eelneva mudeli temperatuurist, mis tähendab, et käesolev mudel on paremini isoleeritud ning seega on soojusvool eelnevast mudelist aeglasem. Varasemalt ehitatud mudeli kuumutamisel

asendis 0° võimsusega 30 W saavutati maksimaalne temperatuur 170 °C, mis on käesolevas töös kasutatud mudeli 30 W puhul saavutatud temperatuurist 247,4 °C 31 % väiksem. 50 W puhul saavutati temperatuur, mis oli käesoleva mudeli vastavast temperatuurist 29 %. Lisaks selgub, et saavutatud maksimaalne temperatuur asendis 90° on asendi 0° puhul saavutatud maksimaalsest temperatuurist 30 W võimsuse korral 1,3 % väiksem ning 50 W võimsuse korral 3,1 % väiksem.

Tabel 3.2 Algtemperatuur ja lati maksimaalne temperatuur erinevatel võimsustel 0° asendis ja 90° asendis nii käesoleva mudeli kui ka eelneva mudeli puhul

Võimsus, W	Algtemperatuur, °C				Lati maksimaalne temperatuur, °C			
	Asend 0°		Asend 90°		Asend 0°		Asend 90°	
	Käesolev mudel	Eelnev mudel [9]	Käesolev mudel	Eelnev mudel [9]	Käesolev mudel	Eelnev mudel [9]	Käesolev mudel	Eelnev mudel [9]
30	22,9	23	22,9	23	247,4	170,0	244,2	-
50	22,9	23	22,9	23	348,6	246,0	337,9	-
70	22,9	23	22,9	23	Üle 350	284,0	Üle 350	269,5

Tabelis 3.3 on toodud raami soojusjuhtivustegur erinevatel võimsustel 0° asendis ja 90° asendis nii käesoleva kui ka eelneva mudeli puhul. Tabelist 3.3 saab arvutada käesoleva mudeli keskmise soojusjuhtivusteguri, milleks tuli 0,114 W/°C. Keskmise soojusjuhtivusteguri arvutamisel arvestati 30 W ja 50 W võimsusega katsete andmeid. Tabelis 3.3 on näha, et eelneva mudeli soojusjuhtivustegurid on käesolevas mudeli soojusjuhtivusteguritest suuremad. See tähendab, et käesoleva vastuvõtja mudeli kaudu on soojusjuhtivuse kaudu tekkiv soojusvool väiksem.

Tabel 3.3 Raami soojusjuhtivustegur erinevatel võimsustel 0° asendis ja 90° asendis nii käesoleva kui ka eelneva mudeli puhul

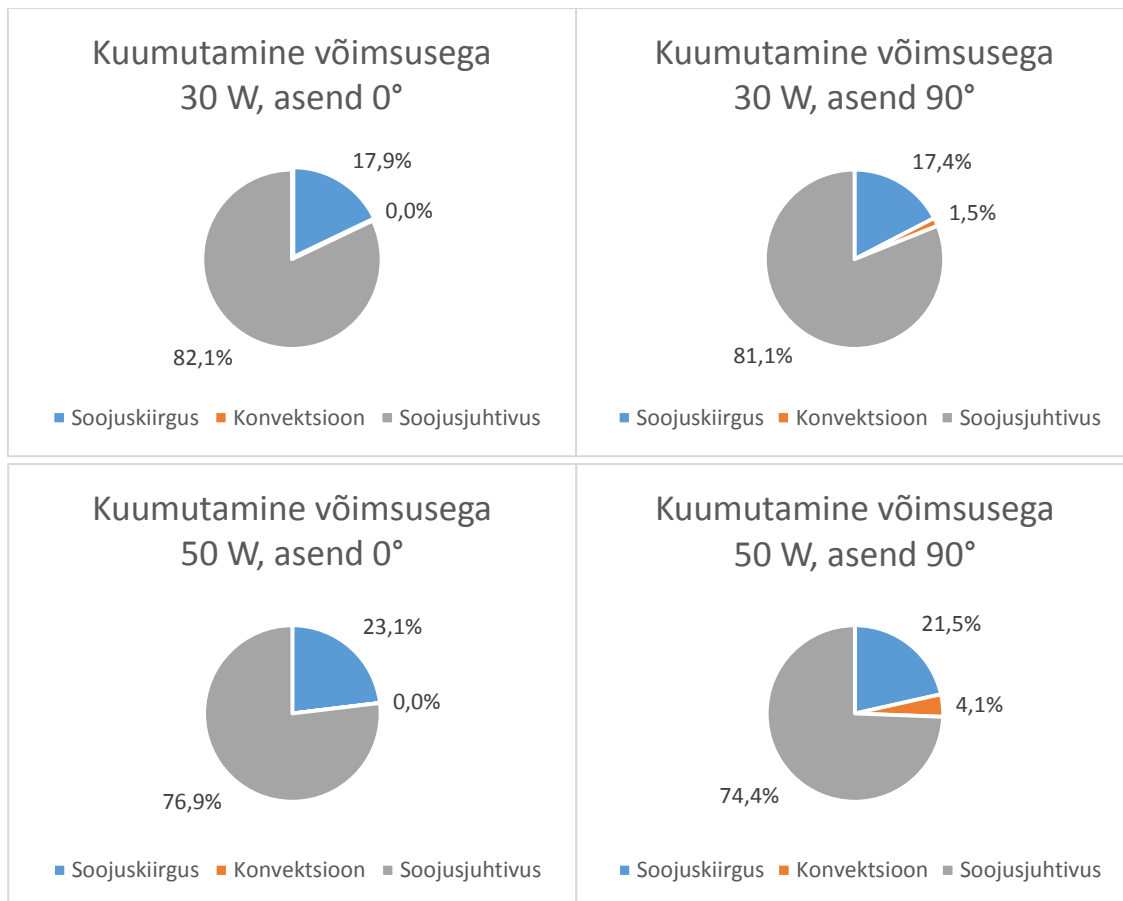
Võimsus, W	Soojusjuhtivustegur, W/°C	
	Käesolev mudel	Eelnev mudel [9]
30	0,110	0,150
50	0,118	0,149
70	üle 0,118	0,181

Tabelis 3.4 on toodud soojuskaod soojuskiirguse, konvektsiooni ja soojusjuhtivuse kaudu erinevatel võimsustel 0° asendis ja 90° asendis nii eelneva kui ka käesoleva mudeli puhul. Tabelist selgub, et käesoleval mudelil on 0° asendis 30 W ja 50 W võimsustel eelnevast mudelist väiksem soojuskadu

soojuskiirguse kaudu ja suurem soojuskadu soojusjuhtivuse kaudu. Konvektsioonikaod on samad, sest mudelit mõõdeti mõlemal puhul maapinna suhtes 0° asendis. Asendis 90° 30 W ja 50 W võimsuste puhul eelneva mudeli andmed puuduvad (tabelis 3.4 märgitud sümboliga “-”) ning seetõttu ei saa käesoleva mudeliga neid võrrelda. Asendis 90° 70 W võimsusega puuduvad käesoleva mudeli täpsed andmed ning seetõttu ei saa neid eelneva mudeli 70 W mõõtmiste tulemustega võrrelda. Tabelist 3.4 selgub ka, et kõige intensiivsem oli kadu soojusjuhtivuse kaudu. Mudeli kuumutamisel võimsusega 30 W eraldus asendi 0° puhul kiirguse kaudu ligikaudu 17,9 % , konvektsiooni kaudu 0 % ning juhtivuse kaudu 82,1 % soojusest. Mudeli kuumutamisel võimsusega 50 W olid vastavad väärtused 23,1 % , 0 % ja 76,9 % . Mudeli kuumutamisel võimsusega 30 W eraldus asendi 90° puhul kiirguse kaudu ligikaudu 17,4 % , konvektsiooni kaudu 1,5 % ning juhtivuse kaudu 81,1 % soojusest. Mudeli kuumutamisel võimsusega 50 W olid vastavad väärtused 21,5 % , 4,1 % ja 74,4 % . Mudelis tekkivate soojuskadude protsentuaalne jagunemine mudeli kuumutamisel võimsusega 30 W ja 50 W asendite 0° ja 90° korral on toodud joonisel 3.14

Tabel 3.4 Soojuskaod soojuskiirguse, konvektsiooni ja soojusjuhtivuse kaudu erinevatel võimsustel 0° asendis ja 90° asendis nii eelneva kui ka käesoleva mudeli puhul

Asend 0°						
Võimsus, W	Kadu kiirguse kaudu, W		Kadu konvektsiooni kaudu, W		Kadu juhtivuse kaudu, W	
	Käesolev mudel	Eelnev mudel [9]	Käesolev mudel	Eelnev mudel [9]	Käesolev mudel	Eelnev mudel [9]
30	5,36	7,8	0	0	24,64	22,2
50	11,53	16,6	0	0	38,47	33,4
70	üle 11,69	22,5	0	0	alla 58,31	47,5
Asend 90°						
Võimsus, W	Kadu kiirguse kaudu, W		Kadu konvektsiooni kaudu, W		Kadu juhtivuse kaudu, W	
	Käesolev mudel	Eelnev mudel [9]	Käesolev mudel	Eelnev mudel [9]	Käesolev mudel	Eelnev mudel [9]
30	5,22	-	0,46	-	24,34	-
50	10,76	-	2,07	-	37,17	-
70	üle 11	20,2	üle 2,2	10,2	üle 38	39,6



Joonise 3.14 Mudelis tekkivate soojuskadude protsentuaalne jagunemine mudeli kuumutamisel võimsusega 30 W ja 50 W asendite 0° ja 90° korral

Käesoleva vastuvõtja mudeli tulemuste erinevused võrreldes eelneva mudeliga on põhiliselt põhjustatud teistsuguste põhimõtetega vastuvõtja konstruktsioonist, vastuvõtjalatist ja isolatsioonikihtide paigutusest. Käesoleva vastuvõtja mudeli puhul on kasutatud teistsuguseid materjale ning mudeli konstruktsioon on oluliselt stabiilsem ja tugevam ning selle sisse saab isolatsioonikihid nii ära paigutada, et õhku jääb vähem vahele kui eelneva mudeli puhul. Vastuvõtjalatt on soojuslikult isoleeritud nii, et õhuvahesid on vähem ning isolatsioonimaterjali on rohkem. See tähendab, et käesoleva vastuvõtja mudeli konvektiivsed soojuskadud on väiksemad ning mudeli soojusvool väliskeskkonda on aeglasem kui eeneval mudelil, mistõttu saab järeldada, et käesolev vastuvõtja mudel hoiab eelnevast vastuvõtja mudelist paremini soojust, säilitades vastuvõtjalatil kõrgema temperatuuri.

KOKKUVÕTE

Käesolevas töös analüüsiti soojusülekandeviise soojusenergiat rakendava päikesekollektori kiirguse vastuvõtja mudeli näitel. Lõputöö käigus ehitati vähendatud mudel päikesekollektori kiirguse vastuvõtjast ning selgitati mudeli modelleerimist programmiga *Solidworks*. Lisaks põhjendati vastuvõtja materjalide valikut lähtuvalt materjalide soojusjuhtivusest, elektrilistest omadustest, temperatuuri taluvusest ja töötlemisvõimalustest. Materjalide valimise käigus teostati soojuskatse, mille puhul kuumutati erinevaid materjale ning vaadati, kas need peavad kuumusele vastu. Vastuvõtjalati soojusisolatsiooniks otsustati kasutada kivivilla ja keraamilist kiudvilla ning elektriühenduste isolaatoriks materjali *Macor*, konstruktsiooni ehitamiseks kasutati alumiiniumit ja roostevaba terast ning konstruktsiooni sees olevad termopaari ja toitejuhtme kaablid valiti vastavalt 900 °C ja 350 °C taluvast klaaskiust.

Eesmärk oli ehitada vastuvõtja mudel, mis hoiaks soojust võimalikult hästi. Ehitatud mudeli soojuskadude leidmiseks teostati katsed, mille käigus kuumutati mudelit elektrilise kütteseadme abil kindla võimsusega ning samal ajal mõõdeti temperatuuri takistustemperatuurianduritega kollektori vastuvõtjalati erinevates punktides. Töös põhjendati ka katse teostamiseks vajalike elektroonikaseadmete ning mõõtmisel kasutatavate komponentide valikut. Vastuvõtjalati kuumutamiseks kasutati toiteplokki *Xantrex HPD 60-5* ning tulemuste mõõtmiseks mõõteseadet *Keysight 34972A*. Tulemuste lugemiseks mõõteseadmest kasutati programmi *BenchLink Data Logger 3*.

Pärast katsete teostamist analüüsiti mõõtetulemusi ning määrati erinevate soojusülekandeviiside intensiivsused. Selgus, et kõige intensiivsem oli kadu soojusjuhtivuse kaudu. Mudeli kuumutamisel võimsusega 30 W eraldus kiirguse kaudu ligikaudu 18 % , konvektsiooni kaudu 0 % ning juhtivuse kaudu 82 % soojusest. Mudeli kuumutamisel võimsusega 50 W olid vastavad väärtused 23 %, 0 % ja 77 %. Mudeli keeramisel maapinna suhtes asendisse 90° suurenes soojusvool ehk soojus eraldus ümbritsevasse keskkonda kiiremini, sest erinevalt 0° asendist eraldus soojust ka konvektsiooni kaudu. Soojusvoolu suurenemine kajastub asjaolus, et sama võimsusega mudeli soojendamisel ei saavuta vastuvõtjalatt sama kõrget maksimaalset temperatuuri kui asendis 0°. Saavutatud maksimaalne temperatuur asendis 0° ja võimsuse 30 W puhul oli 247,4 °C ning võimsuse 50 W puhul 348,6 °C. Saavutatud maksimaalne temperatuur asendis 90° on asendis 0° puhul saavutatud maksimaalsest temperatuurist 30 W võimsuse korral 1,3 % väiksem ning 50 W võimsuse korral 3,1 % väiksem.

Tulemusi võrreldi varasemalt ehitatud teistsugustele põhimõtetele tugineva vastuvõtja mudeli tulemustega ning selgus, et käesoleva töö käigus ehitatud mudel isoleerib soojust paremini.

Varasemalt ehitatud mudeli kuumutamisel asendis 0° võimsusega 30 W saavutati maksimaalne temperatuur, mis oli käesolevas töös kasutatud mudeli 30 W puhul saavutatud temperatuurist 31 % väiksem. 50 W puhul saavutati temperatuur, mis oli käesoleva mudeli vastavast temperatuurist 29 % väiksem.

Kuigi projekteeritud ja ehitatud mudeliga võib rahule jääda ning mudelit saaks potentsiaalselt kasutada Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudis käimasolevas parabolpeegli päikesekollektori projektis, siis oleks tulevikus siiski otstarbekas proovida vastuvõtjat veelgi täiustada. Üheks võimaluseks oleks asendada vastuvõtjalatt musta värvi latiga, mis teoreetiliselt neelab rohkem soojust, ning seejärel määrata mudeli soojuskaod ka musta värvi lati puhul. Teiseks oluliseks võimaluseks oleks kogu vastuvõtja vaakumisse asetada, mis puhul puudub konvektsioonist tulenev soojuskadu sõltumata vastuvõtja asendist maapinna suhtes.

SUMMARY

In this bachelor's thesis, heat transfer methods were analyzed on the example of the model of solar collector radiation receiver using heat energy. The reduced model of solar collector radiation receiver was built during the thesis and the modeling with Solidworks software was explained. In addition, the choice of receiver materials was based on the thermal conductivity of the materials, electrical properties, temperature endurance and handling capabilities. In the course of the material selection, a heat test was performed in which different materials were heated and checked for heat resistance. It was decided to use stone wool and ceramic fiber wool for the insulation of the receiver bar and material Macor as the insulator of the electrical connections. The construction was made of aluminum and stainless steel, and the thermocouple and power cord cables inside the structure were selected from fiberglass that can withstand temperatures of 350 °C.

The goal was to build a receiver model that would maintain the heat as well as possible. In order to find the heat loss of the built model, experiments were carried out during which the model was heated with a certain power using an electric heater, and at the same time the temperature was measured with the resistor temperature sensors at different points of the collector receiver bar. The selection of electronic equipment needed for the test and the components used for the measurement was justified in the work. The Xantrex HPD 60-5 was used to heat the collector receiver bar and Keysight 34972A was used to measure the results. BenchLink Data Logger 3 was used to read the results from the measuring device.

After performing the tests, the measurement results were analyzed and the intensities of the different heat transfer modes were determined. It was found that the most intense loss was through thermal conductivity. When the model was heated at 30 W, 18 % was emitted by radiation, 0 % by convection and 82 % by conduction from the heat. When heating the model with a power of 50 W, the respective values were 23 %, 0 % and 77 %. By turning the model to the position of 90° relative to the ground, the heat flow, i.e., heat was released faster into the surrounding environment. The increase in heat flow is reflected in the fact that when the model of the same power is heated, the receiver bar does not achieve the same maximum temperature as at 0° position. The maximum temperature reached at the position of 0° and the power 30 W was 247,4 °C and the power 50 W was 348,6 °C. The maximum temperature reached at the position of 90° is 1,3 % lower at 30 W power and 3,1 % lower at 50 W power than the maximum temperature reached position of 0°.

The results were compared with the results of a previously built receiver model based on different principles, and it was found that the model built in this work insulates the heat better. When the

previously constructed model was heated at the position of 0° with a power of 30 W, the maximum temperature was reached, which was 31 % lower than the temperature achieved with the model used in this work. At 50 W, the temperature was reached at 29 % lower level than the corresponding temperature of this model.

The outcome of the thesis was rather satisfactory and the model that was constructed could potentially be used in the Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics ongoing project of solar collector with a parabolic mirror, but it would be still reasonable to further improve the receiver in the future. One possible option to enhance the model would be to replace the receiver bar with a black color bar that theoretically absorbs more heat, and then to determine the model's heat loss also for the black bar. Other possible option would be place the whole receiver into a vacuum and therefore heat losses due to conduction should be zero in every position.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] A. Ots, Soojustehnika aluskursus, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2011, p. 816.
- [2] Y. A. Cengel, Heat Transfer: A Practical Approach, Boston: McGraw-Hill, 2003, p. 896.
- [3] M. El-Saba, Transport of information-carriers in semiconductors and nanodevices, Hershey: IGI Global, 2017.
- [4] D. S. Ginley ja D. Cahen, Fundamentals of Materials for Energy and Environmental Sustainability, Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [5] The Ohio State University, „Transfer of Thermal Energy,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.physics.ohio-state.edu/p670/textbook/Chap_4.pdf. [Kasutatud 28. märts 2019].
- [6] N. P. Cheremisinoff, Handbook of Chemical Processing Equipment, Boston: Elsevier, 2000, p. 551.
- [7] A.-S. Küttim, „Parabool-peegli päikesekollektori kiirguse vastuvõtja mudeli ehitamine ja soojuskadude uurimine,“ Tallinn, 2017.
- [8] Northwestern, „Thermoelectrics,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://thermoelectrics.matsci.northwestern.edu/thermoelectrics/index.html>. [Kasutatud 21. oktoober 2018].
- [9] N. Grigorjev, *Paraboolpeegli päikesekollektori kiirguse vastuvõtja mudeli parandamine ja soojuskadude vähendamine*, Tallinn, 2018.
- [10] Morgan Technical Ceramics, „Macor Properties,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.morgantechnicalceramics.com/en-gb/products/macor-machinable-glass-ceramic/macor-properties/>. [Kasutatud 11. november 2018].
- [11] E. Kirsman, „Valguse murdumine läbi klaasi,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://opik.kirsman.ee/pohikool/8klass/murdumine/>. [Kasutatud 7. november 2018].
- [12] Klaasimeister, „Karastatud klaas,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.klaasimeister.ee/index.php?page=128&>. [Kasutatud 28. oktoober 2018].

- [13] K-Rauta, „Kivivill Paroc FPB 10,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.k-rauta.ee/p/kivivill-paroc-fpb-10-600x1200x10mm/drh>. [Kasutatud 24. november 2018].
- [14] Kodukeskus, „Keraamiline kiudmatt,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.kodukeskus.ee/et/a/keraamiline-kiudmatt-vill-paksus-6-4mm-laius-610mm-128kg-m%C2%B3-t1260-kraadi>. [Kasutatud 2. detsember 2018].
- [15] Transfer Multisort Elektronik Ltd., „Heating Resistors,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.tme.eu/gb/details/gbr-387/heating-resistors/telpod/>. [Kasutatud 25. november 2018].
- [16] Thermopedia, „Resistance Thermometry,“ 2. Veebruar 2011. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.thermopedia.com/content/1090/>.
- [17] Thermometrics corporation, „PT1000 Sensor,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.thermometricscorp.com/pt1000>. [Kasutatud 15. November 2018].
- [18] Taltech, „Alalisvool,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: http://www.ene.ttu.ee/leonardo/elektro_alused/1Alalisvool.pdf. [Kasutatud 17. aprill 2019].
- [19] W. Shyy ja R. Blockley, Encyclopedia of Aerospace Engineering, John Wiley and Sons, 2010.
- [20] Electronics Tutorials, „Resistors in Parallel - Parallel Connected Resistors Basic Electronics Tutorials,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.electronicstutorials.ws/resistor/res_4.html. [Kasutatud 15. mai 2019].
- [21] Thurlby Thandar instrument distribution, „Sorensen HPD Series,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ttid.co.uk/dc-power-supplies/sorensen/hpd-series>. [Kasutatud 26. november 2018].
- [22] Keysight Technologies, „34972A LXI Data Acquisition,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.keysight.com/en/pd-1756491-pn-34972A/lxi-data-acquisition-data-logger-switch-unit?cc=US&lc=eng>. [Kasutatud 29. november 2018].
- [23] Keysight Technologies, „34901A 20 Channel Multiplexer,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.keysight.com/en/pd-1000000083%3Aeepsg%3Apro-pn-34901A/20-channel-multiplexer-2-4-wire-module-for-34970a-34972a?cc=US&lc=eng>. [Kasutatud 3. detsember 2018].

- [24] Tallinna Tehnikakõrgkool, „Soojusvahetus,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://ekool.ttkk.ee/pluginfile.php/211940/mod_resource/content/2/3.%20Soojusvahetus.pdf. [Kasutatud 2. mai 2019].
- [25] National Institute of Standards and Technology, „Fundamental physical constants,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?sigma>. [Kasutatud 4. mai 2019].
- [26] L. S. Sterling, The Art of Agent-Oriented Modeling, London: The MIT Press, 2009.
- [27] M. Vilipuu, „Tahke keha soojuspaisumine,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.ttu.ee/public/m/Marek_Vilipuu/FI_doks/FI/Juhendid/20._TAKHE_KEHA_SOJUSPAISUMINE.pdf. [Kasutatud 06. detsember 2018].
- [28] Füüsikaleksikon, „Joonpaisumistegurite tabel,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://xn--fsikaleksikon-woba.ee/artikkel/fuusikaliste-suuruste-tabelid/joonpaisumistegurite-tabel/>. [Kasutatud 27. november 2018].
- [29] RS Components, „MACOR Machinable Glass Ceramic Sheet,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://in.rsdelivers.com/product/macor/mplate-2-50-50/macor-machinable-glass-ceramic-sheet-50mm-x-50mm/2338644>. [Kasutatud 22. november 2018].
- [30] K. Ingermann, Temperatuuri mõõtmine, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2009.