



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

EE40LT

TERMOELEKTRILISE SOOJUSVAHETI EHTUS JA
SELLE SOOJUSLIKU NING ELEKTRILISE
JÕUDLUSE MÕÕTMINE

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Freddy Plaum

Üliõpilaskood: 142969MAHB

Juhendaja: Heigo Mäemuru

Tallinn 2017

AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Lõputöös kasutatud kõik teiste autorite tööd ja seisukohad ning materjalid on varustatud vastavate viitadega.

Töö valmis juhendamisel

“.....” 201....a.

Töö autor:

/allkiri/

Töö vastab lõputööle esitatavatele nõuetele

“.....” 201....a.

juhendaja:

/allkiri/

Lubatud kaitsmisele

“.....” 201....a.

..... õppekava lõputööde kaitsmiskomisjoni esimees:

/allkiri/

BSc LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

2017. aasta kevad semester

Üliõpilane: Freddy Plaum, 142969MAHB

Õppekava: MAHB02/13

Eriala: Mehhatroonika

Juhendaja: insener, Heigo Mäemuru

Konsultant: professor, Lauri Kütt

LÕPUTÖÖ TEEMA:

Termoelektrilise soojusvaheti ehitus ja selle soojusliku ning elektrilise jõudluse mõõtmine.

Construction of thermoelectric heat exchanger and measurement of its thermal and electric performance.

Töös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	CAD mudeli modelleerimine	01.04.2017
2.	Termoelektrilise soojusvaheti koostamine	20.04.2017
3.	Mõõteskeemi koostamine	04.05.2017
4.	Lõputöö kirjutamise lõpetamine	24.05.2017
5.		

Lahendatavad insenertechnilised ja majanduslikud probleemid:

Missugune oleks kõige optimaalsem ja kompaktsem termoelektrilise soojusvaheti disain? Kuidas testuda soojusvaheti jõudlust?

Täiendavad märkused ja nõuded:

Töö keel: Eesti keel

Kaitsemistaotlus esitada hiljemalt **Töö esitamise tähtaeg:** 25.05.2017

Üliõpilane Freddy Plaum /allkiri/ Kuupäev

Juhendaja: Heigo Mäemuru /allkiri/ Kuupäev

SISUKORD

EESSÕNA	5
SISSEJUHATUS	6
1. TERMOELEKTRILINE EFEKT	7
1.2 Seebecki efekt.....	7
1.3 Peltieri efekt.....	7
2 TERMOELEKTRILINE ELEMENT	8
3 TERMOPAARID	9
3.2 Termopaaride ehitus.....	9
3.3 Termopaaridega mõõtmine	10
4 SOOJUSVAHETID	11
4.1 Soojusvahetite klassifitseerimine voolusuuna järgi	11
4.2 Soojusvahetite klassifitseerimine ehituse põhjal	12
4.2.1 Kesta ja toruga soojusvaheti	12
4.2.2 Plaatsoojusvaheti	13
5 TERMOELEKTRILISE SOOJUSVAHETI PROJEKTEERIMINE JA EHITUS	14
5.1 Seatud eesmärk	14
5.2 Soojusvaheti üldine ehitus.....	14
5.3 Kuumplaat	15
5.4 Kinnitusrakis	16
5.5 Survevedrude valik.....	17
5.5.1 Survevedru jäikuse arvutus	17
5.6 Vesijahutus plokk.....	18
5.7 Vesijahutusploki liitmikud	20
5.8 Veepump	22
6 MÕÖTESKEEM JA ANDMETE KUVAMINE	23
6.1 LCD ekraani ühendud Arduinoga	23
6.2 Temperatuuri mõõtmine	24
6.2.1 MAX31855 mikrokiibi ühendamine.....	24
6.3 Elektri mõõtmine.....	26
6.3.1 INA220 mikrokiibi ühendamine.....	26
6.4 Programmi algoritm	27
KOKKUVÕTE	29
SUMMARY	30
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	31

EESSÕNA

Käesoleva lõputöö teema kujunes välja TTÜ inseneriteaduskonna professori Lauri Kütti teaduslikust projektist ehitada parabool-peegliga päikesekollektor. Antud lõputöö hõlmab sellest ühte osa, milleks on termoelektrilise soojusvaheti ehitus. Töö koostamine ja andmete kogumine toimus elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudis.

SISSEJUHATUS

Tänapäeval on energiatoomisvaldkonnas aktuaalseks teemaks roheline energia tootmine. Päikeseenergia on üks sellistest taastuvatest energiatest, mida soovitakse efektiivselt muundada elektrienergiaks. Selleks kasutatakse peamiselt päikesepaneele, mis muundavad päikeseenergia fotogalvaanilise protsessi kaudu elektrienergiaks. Teine uuritav päikeseenergia muundamise protsesse põhineb termoelektrilisel nähtusel, kus soojusenergia muudetakse otse elektrienergiaks. Selleks on vaja muuta päikeseenergia esmalt soojusenergiaks, kasutades näiteks parabool-peeglit päikesevalguse kontsentreerimiseks.

Käesolev lõputöö eesmärgiks oli koostada parabool-peegliga päikesekollektori jaoks termoelektriline soojusvaheti. Esmalt projekteriti *Solidworks* programmi kasutades soojusvahetist 3D mudel ning hiljem koostati vajalikud detailid freesimise teel. Elektrienergia tootmiseks kasutati termoelektrilist elementi, mis toodab elektrik, kui sellest kandub läbi soojusvoog. Pideva soojusvoo hoidmiseks peab hoidma termoelektrilise elemendi pooli erineval temperatuuril. Külma poole külmana hoidmiseks loodi vesijahutusplokk. Kuna termoelektriline element tuli suruda kuuma ja külma detailide vahele, siis tuli selleks luua kinnitusrakis. Termoelektrilise soojusvaheti kinnitused peavad olema sellised, et soojus ei saaks kanduda läbi kinnituste kuumalt poolelt külmemale, sest see vähendaks termoelektrilise elemendi efektiivsust.

Soojusvaheti jõudluse hindamiseks projekteeriti Arduino UNO baasil mõõtmisprotsess, kus temperatuuri mõõtmiseks saaks kasutada termopaare ja edastada vastavad tulemused Arduinole kasutades MAX31855 mikrokiipi. Elektrilistest omadustest saaks mõõta volutugevust, pinget ja võimsust, kasutades INA220 mikrokiipi. Saadud tulemused oleks võimalik kuvada Arduinole monteeritud LCD ekraani kasutades.

1. TERMoeLEKTRILINE EFEKT

Kuna soojuslik ja elektriline energia on omavahel seotud atomaarsel tasandil, siis leiduvad termoelektrilised nähtused, kus soojuslik energia muundub otse elektriliseks energiaks ja vastupidi.

1.2 Seebecki efekt

Seebecki efekt on kõige esimesena avastatud termoelektriline nähtus, mis avastati 1821. aastal Thomas Johann Seebecki poolt. Seebecki efekt kujutab endas termoelektrilist protsessi, kus kahest erinevast elektrit juhtivast ja eri temperatuuridega materjalist koostatud vooluringi ühendamisel tekib elektromotoorjõud. [1, lk1]

Atomaarsel tasemel toimub elektrivoolu kandumine elektronide või aukude abil aga erinevates elektrijuhtides on kantav energia erinev. Kuumutades kahest erinevast elektrijuhist koostatud vooluringis ühte, suurendame sealsete laengukandjate kineetilist energiad, mistõttu hakkavad nad liikuma vooluringi madalama energia tasemega otsa suunas. [1, lk 2]

Selle tulemusena tekkinud EMJ on proportsionaalne ühendatud juhtide temperatuuride vahega (gradiendiga) ja materjali Seebecki koefitsientiga. [2]

Seebecki efekt leiab kasutust temperatuuri mõõtmisel termopaaridega ning elektrienergia tootmisel termoelektriliste elementidega.

1.3 Peltieri efekt

Seebecki efekti pöördprotsessiks on Peltieri efekt, mis avastati 1834. aastal Jean Charles Athanase Peltieri poolt. Peltieri efektiks nimetatakse termoelektrilist nähtust, kus kahest erinevast materjalist koosneva elektrijuhi ühenduskoha temperatuur muutub kui tõsta juhi otste vahel olevat pinget. Temperatuuri kasvamine või vähenemine oleneb tekitatud pinge polaarsusest. [1, lk1]

Atomaarsel tasemel on Peltieri efekt analoogiline Seebecki efektiga. Erinevates juhtides on laengukandjatega kantav energiakogus erinev, siis potentsiaali tekitades liiguvad laengukandjad ühest materjalist teise ja annavad ära või võtavad energiat juurde temperatuuri kaudu. [1, lk 2]

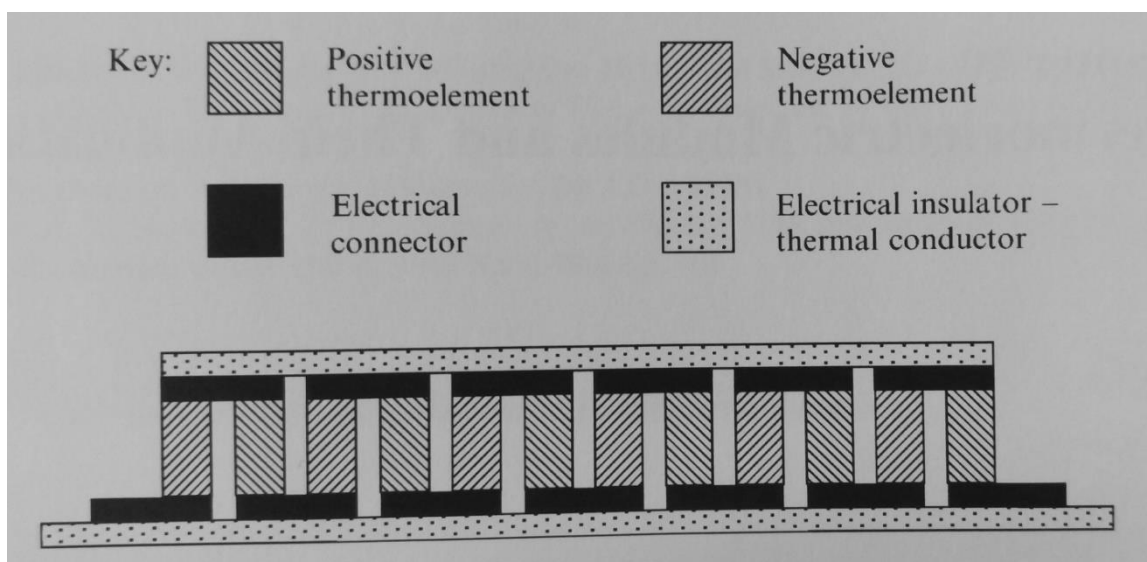
Peltieri efekt leiab kasutust peamiselt väikestes kaasaskantavates jahutites.

2 TERMoeLEKTRILINE ELEMENT

Termoelektriline element (edaspidi TEG, inglise keeles *Thermoelectric Generator*) on pooljuht-seadeldis, mis kasutab ära Seebecki ja Peltieri efekte, kas elektrilise energia tootmiseks või mingi teise termilises kontaktis oleva objekti soojendamiseks või jahutamiseks. [2]

Kuna TEG-ide efektiivsus on üpriski väike (5-8%), siis elektrilise energia tootmiseks kasutatakse neid peamiselt heitsoojuse talletamisel. Primaarse elektrienergia tootjana kasutatakse TEG-e ainult valdkondades, kus muid energiatootmisvahendeid ei ole võimalik või kasulik kasutada, näiteks kosmoseaparaatides kasutatakse radioaktiivsete isotoopide poolt tekitatud soojust ära, kuna muud energiatootmisvahendid on liiga rasked, et kosmosesse viia. [2]

Ehituslikult koosnevad termoelektriline element N ja P tüüpi pooljuhtidest, mis on soojuslikult ühendatud rööbiti hea soojusjuhtiva materjaliga nagu vask. Elektriliselt on pooljuhid ühendatud jadami (vt. sele 2.1). [1, lk 167, 168]



Sele 2.1 Termoelektrilise elemendi ehituslik skeem: *positive thermoelement* - positiivne termoelement, *negative thermoelement* - negatiivne termoelement, *electrical connector* - elektriline ühendus, *electrical insulator thermal conductor*, elektriline isolaator aga soojusjuht.

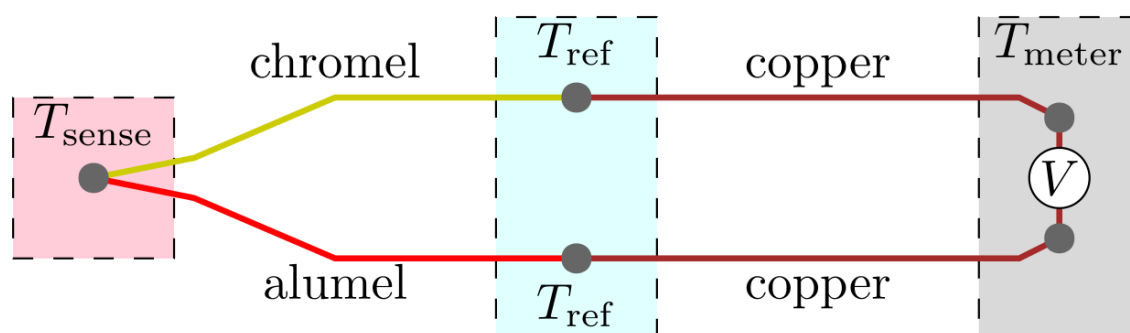
Olenevalt talletava temperatuuri suurusest kasutatakse pooljuhtidena erinevaid materjale: madala temperatuuri (kuni 450 K) jaoks kasutatakse BiSbTeSe sulamit, keskmise temperatuuri (kuni 850 K) jaoks kasutatakse plii (Pb) baasil olevaid sulameid ning kõrge temperatuuri (kuni 1300 K) jaoks kasutatakse SiGe sulameid. [2]

Termoelektrilise elemendi eelis teiste elektritootmisvahendite ees on et neil pole liikuvaid osi ja seega ei tekita ka heli ega vibratsioone, nad on oma mõõtudel väikesed ja pika elueaga. Peamiseks puudusteks on aga nende väike efektiivsus. [1, lk 183]

3 TERMOPAARID

3.2 Termopaaride ehitus

Termopaarid on termoelektrilised seaded, mida kasutatakse laialdaselt temperatuuri mõõtmises. Termopaarid koosnevad kahest erinevast elektrijuhtivusega materjalist, mis on ühendatud kahest kohast kokku, moodustades vooluringi. Tüüpiline termopaari ühendusskeem on toodud seel 3.1.1.

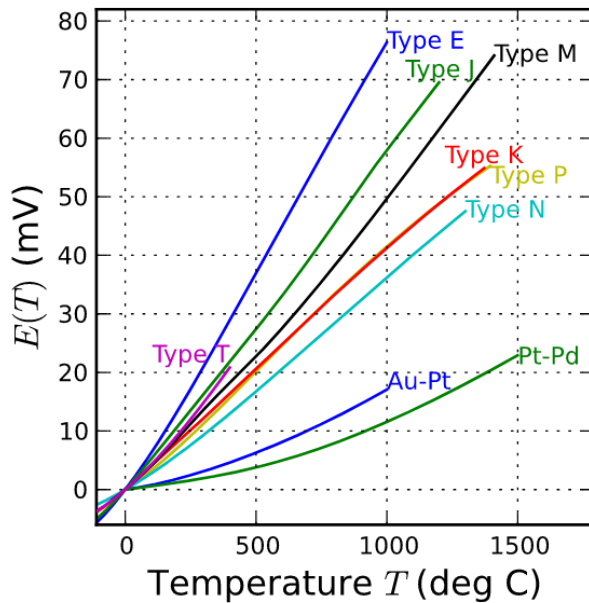


Sele 3.1.1 K-tüüpi (kromell – alumel) termopaari mõõteskeem: T_{sense} – mõõdetava keskkonna temperatuur, T_{ref} – võrdluskeskkonna temperatuur, T_{meter} – pinge mõõteseadme keskkonna temperatuur. [3]

Termopaaride koostamisel võidakse kasutada mitmeid erinevaid materjalide paare, mis on erinevate mõõtetäpsustega ja võivad töötada erinevates temperatuurivahemikes. Erinevate termopaaride töötamise temperatuuride vahemikud on toodud tabelis 3.1.1 ning vastavalt temperatuurile tekkinud EMJ graafik seel 3.1.2. [3]

Tabel 3.1.1 Erinevate termopaaride kasutatavad temperatuuri vahemikud.

Tüüp	Temperatuuri vahemik (°C)			
	Pideval kasutusel		Lühiajalisel kasutusel	
	Madal	Kõrge	Madal	kõrge
K	0	+1100	-180	+1300
J	0	+750	-180	+800
N	0	+1100	-270	+1300
R	0	+1600	-50	+1700
S	0	+1600	-50	+1750
B	+200	+1700	0	+1820
T	-185	+300	-250	+400
E	0	+800	-40	+900



Sele 3.1.2 Erinevat tüüpi termopaaride temperatuuri ja pinge vahelised seosed.

3.3 Termopaaridega mõõtmine

Termopaaridega mõõtmiseks hoitakse ühte ühenduskohta külmana (külmliid) ja teist ühenduskohta kuumana (kuumliid), nii tekib tekib tänu Seebecki efektile külma- ja kuum liite vahel elektromotoorjõud, mis on proportsionaalne liidete temperatuuri vahega. Tekkinud EMJ mõõtmisel saab välja arvutada liidete vahelise temperatuuri, teades vastava termopaari liidete vahelise temperatuuri ja tekkinud EMJ vahelist seost. [3]

Kuna mõõdetud EMJ kirjeldab kuum- ja külmliidte keskkondade vahelist temperatuuri, siis 0°C võrreldava temperatuuri saamiseks tuleb sisse arvestada ka külmliidte keskkonna temperatuuri, mida on võimalik teha valemiga 3.2.1.

$$E = E' + \Delta E, \text{ mV} \quad (3.2.1)$$

kus E – pinge, mis kirjeldab kuumliidte temperatuuri võrreldes 0°C, mV,

E' – kuum- ja külmliidte vaheline pinge, mV,

ΔE – külmliidte temperatuuri parand, mV.

4 SOOJUSVAHETID

Soojusvaheti on seadeldis, mida kasutatakse soojusenergia kandmiseks ühest keskkonnast teise, tüüpiliselt kas vedeliku ja tahke keha vahel, või kahe vedeliku vahel ilma nende vedelike segunemiseta. Olenevalt keskkonnast kandub soojus üle soojusjuhtivuse, konvektsiooni või soojuskiirguse teel. Soojusvahetites toimuvad mitmesugused soojuslikud protsessid: temperatuuri muutus, aurustumine, keemine, kondenseerumine jmt. [4]

Soojusvaheteid kasutatakse laialdaselt ruumi soojendamisel, külmutamisel, konditsioneerides, elektrijaamades jmt. valdkondades. Klassikaline näide soojusvahetist on auto radiaator, kus mootori jahutusvedelik ringleb läbi radiaatori torude, mis annavad soojuse ära risti olevatele plaatidele. Väljasttulev õhk suunatakse läbi radiaatori plaatide ja tulemusena jahutatakse jahutusvedelikku. [4]

4.1 Soojusvahetite klassifitseerimine voolusuuna järgi

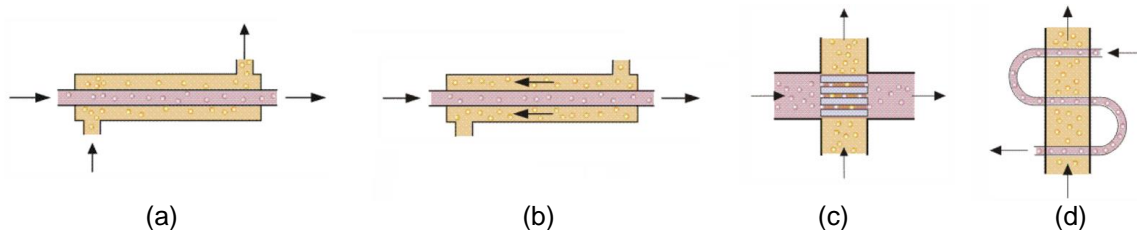
Soojusvaheteid saab ära jaotada oma soojust kandvate vedelike voolusuuna järgi nelja erinevasse konfiguratsiooni: pärivoolused, vastuvoolused, ristivoolused või hübriidsed, mille vooluliikumise skeemid on toodud välja seel 4.1.1. [5]

Pärivoolsetes soojusvahetites (sele 4.1.1 (a)) liiguvad mõlemad kuumad ja külmad soojuskandjad samas suunas. Selline disain on teistest vähem efektiivsem, aga see-eest annab ühtlase seina temperatuuri. [5]

Vastuvoolsetes soojusvahetites (sele 4.1.1 (b)) liiguvad soojuskandjad ühteisega vastas suunas. Sellises disainis muutub soojust kandvate vedelike temperatuur kõige rohkem ja on seega kõige efektiivsem ehitus. [5]

Ristivoolsetes soojusvahetites (sele 4.1.1 (c)) voolavad soojuskandjad risti üksteisega, sellist vooluliikumissuunda kasutatav soojusvaheti jääb oma efektiivsusega vastuvoolsetele alla, aga on pärivoolsetest parem. [5]

Hübriidset disaini kasutatakse tüüpiliselt tööstuslikes soojusvahetites, nende voolusuunad on kombineeritud eelnevalt mainitud voolusuundadest. Seel 4.1.1 (d) on toodud näide kolme läbikäiguga vastu-, ristivoolsest soojusvahetist. [5]



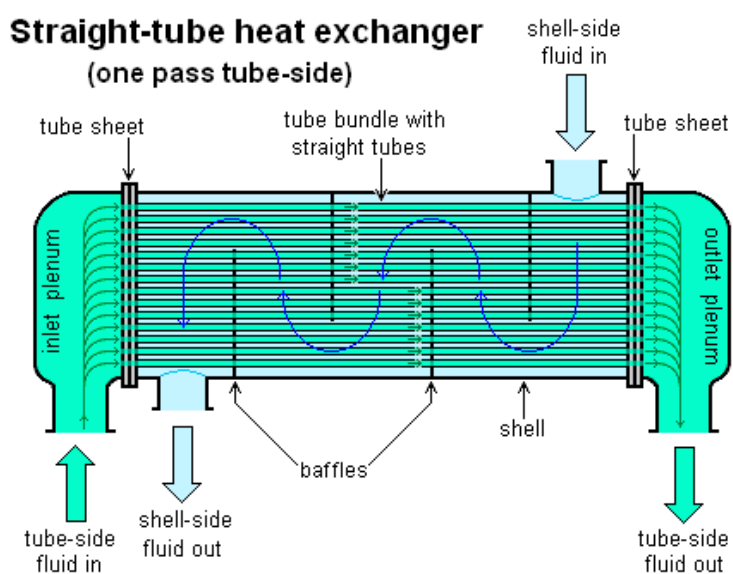
Sele 4.1.1 Erinevad soojusvaheti voolusuunad.

4.2 Soojusvahetite klassifitseerimine ehituse põhjal

Topelttoru soojusvahetid on oma ehituselt ja korrashoidmiselt kõige lihtsamad ning odavamad, mis teevad nad heaks valikuks väiksematele ettevõtetele. Teiselt poolt on nad aga madala efektiivsusega ja suurte mõõtmetega. Peale eelnevalt toodud topelttoru disainist on olemas veel kesta ja torudega soojusvahetid ning plaatsoojusvahetid. [4]

4.2.1 Kesta ja toruga soojusvaheti

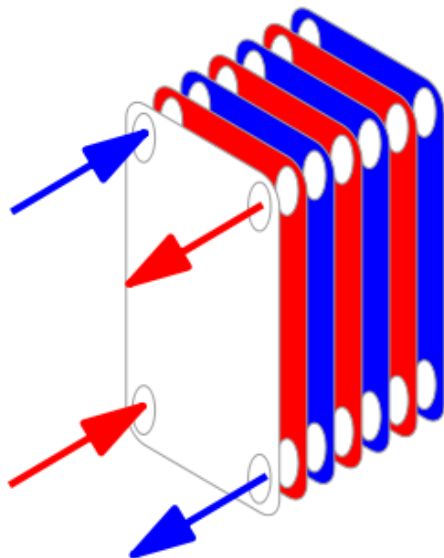
Kesta ja torudega soojusvahetis jookseb kesta otste vahelt läbi paralleelselt kimp torusid. Kesta ühest otsast lastakse sisse vedelik, mida tahetakse kas kuumutada või jahutada, edasi jookseb see vedelik läbi kesta otsi ühendavate torude ning väljub kesta teisest otsast. Teine vedelik lastakse kesta ühelt küljelt sisse, mis edasi voolab üle torude, milles jooksvat vedelikku tahetakse kas kuumutada või jahutada. Kesta sees võib olla mitmeid plaate, nurga all, et pikendada teepikkust, mida peab läbima teine vedelik. Kesta ja toruga soojusvaheti ehituse skeem on toodud seel 4.2.1.1 [4]



Sele 4.2.1.1 Kesta ja torudega soojusvaheti ehitus.

4.2.2 Plaatsoojusvaheti

Teine tööstuses levinud soojusvaheti ehitus on plaatsoojusvaheti. Plaatsoojusvaheti koosneb paljudest õhukestest pisut eraldatud plaatidest. Plaatide vahel on väike läbipääs, et vedelik saaks vahelt läbi voolata. Kuna vedelik jookseb paljude plaatide vahelt läbi, siis kumulatiivselt on vedelikul ja seintel suur kontaktpind. Plaatidel võivad olla ka sissepressitud sooned, mis suurendavad vedeliku liikumise teepikkust ja seega soodustavad soojuskandumist. Plaatide vahelt lastakse läbi kuum ja külm vedelik vaheldumisi. [4]



Sele 4.2.2.1 Plaatsoojusvaheti ehitus: punane – kuumade vedelikuga plaadid, sinine – külma vedelikuga plaadid.

Võrreldes kesta ja torudega soojusvahetiga on plaatsoojusvaheti oma mahukuselt väiksem ja madalama maksumusega. Plaatsoojusvahetist läbijooksev vedelik on madalama rõhu all, kui kesta ja torudega soojusvahetis. Lisaks on plaatsoojusvaheti vedeliku liikumises rohkem vastuliikumist kui kesta ja torudega soojusvahetis, seetõttu antakse plaatsoojusvahetiga soojust üle kiiremini, efektiivsemalt ja suuremate temperatuuri muutustega vedelikus. [4]

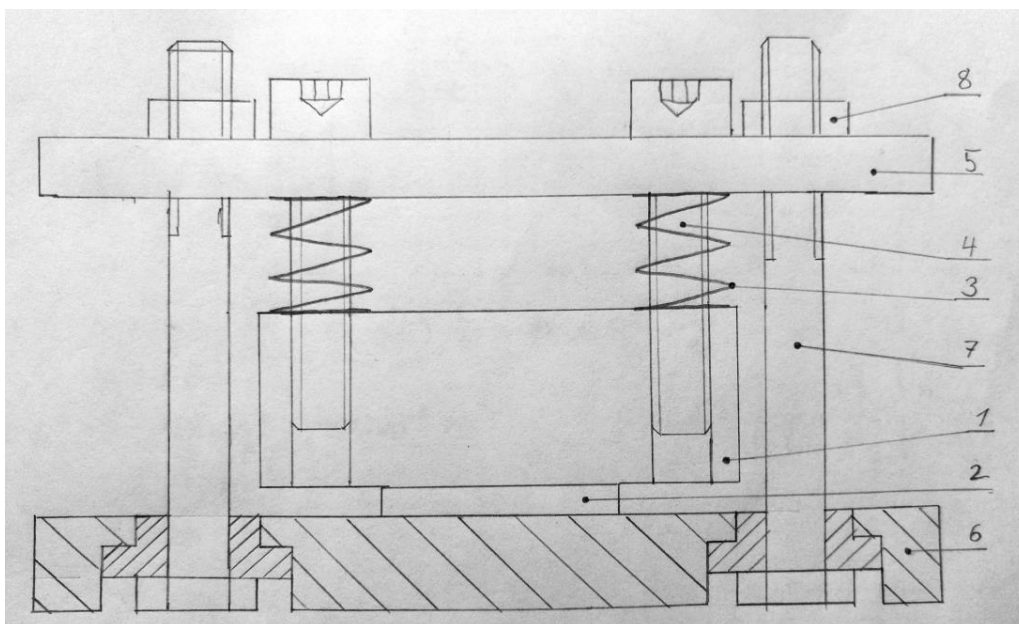
5 TERMOELEKTRILISE SOOJUSVAHETI PROJEKTEERIMINE JA EHTUS

5.1 Seatud eesmärk

Käesoleva lõputöö eesmärgiks oli luua kompaktneljust TEG-st koosnev termoelektriline soojusvaheti. Projekteerimisel võeti eelduseks, et iga TEG saab individuaalse jahutuse. Eesmärkide täitmiseks loodi SolidWorks programmiga soojusvaheti koostamiseks vajalikest detailidest 3D mudelid, mis hiljem valmistati freesimise või treimise teel.

5.2 Soojusvaheti üldine ehitus

Termoelektrilist elementi kuumutatakse ühelt poolt kuuma alumiiniumplaadiga ning teiselt poolt jahutatakse vesijahutusploki. Sellise ehituse realiseerimiseks on mitmeid erinevaid võimalusi. Termoelektrilise soojusvaheti ehituse disainimisel tuleb kuum ja külm detail suruda vastu TEG-i nii, et kokkusurumisjõud läheksid läbi TEG-i tsentrijoone, niimoodi jaotub surumisjõud TEG-ile ühtlaselt ja välditakse nurkade kokkupressimisest tingitud TEG-i kahjustamist. Kinnitused peavad olema ka sellised, et soojus ei kanduks läbi kinnituste kuumemalt poolt üle külmemale poole, niimoodi hoitakse TEG-i külgedel temperatuuri erinevust ja saab suurendada TEG-i efektiivsust. Seel 5.2.1 on toodud ühest TEG-st koosnev soojusvaheti ehitus, mida kasutati käesolevas lõputöös.



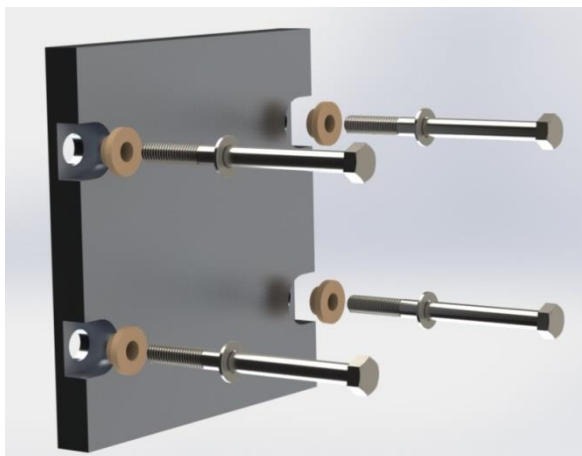
Sele 5.2.1. Soojusvaheti lihtsustatud ehitus: 1 – vesijahutusplokk, 2 – termoelektriline element, 3 – survevedru, 4 – juhtpolt, 5 – vahepealne detail, 6 – kuumplaat, 7 – kinnituspolt, 8 – kinnitusmutter.

Antud termoelektrilise soojusvaheti ehituses kuumutatakse TEG-i ühelt poolt kuuma plaadiga ning hoitakse külmana vesijahutusplokkiga teiselt poolt. Vesijahutusplokk surutakse vastu TEG-i survevedrude abil, millest jooksevad läbi juhtpoldid. Soojusvaheti kooshoidmise rakises kasutatakse vahepealset detaili, mille külge on ühendatud vedrude juhtpoldid ja kuuma plaadiga ühendatud kinnituspoldid. Vedrude pingutamine (survejõu suurendamine) toimub kinnituspoltidel olevate mutritega. Kui mutrid keerata kinnituspoldi pea suunas, siis vahepealne detail surutakse alla ja vedrud avaldavad omakorda jahutusplokkile jõudu, mis siis edasi surutakse vastu TEG-i.

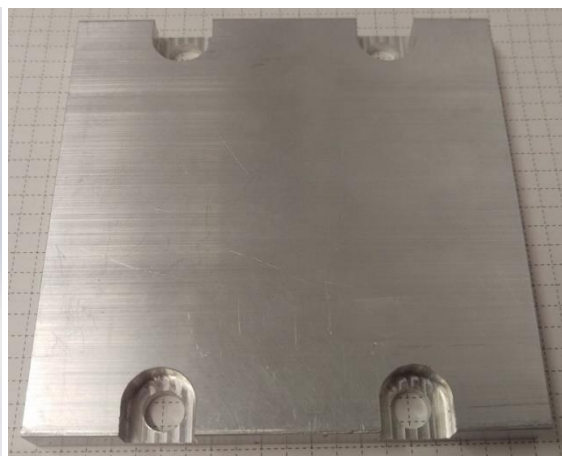
5.3 Kuumplaat

Kuumplaadi eesmärgiks oli anda üle soojusenergia ja jagada see termoelektriliste elementide vahel ühtlaselt ära ning olla ka kinnituskohaks vesijahutusploki kinnitusrakisele. Plaadi materjaliks valiti alumiinium. Peale rakise ja vesijahutuse dimensioonide optimeerimist sai kuumplaadi mõõtmeteks 100 x 100 mm paksusega 10 mm.

Kokku oli vaja teha neli soont ja 8 mm läbimõõduga augud kinnituspoltide jaoks. Rakise kinnitamiseks valiti M5x60 kuuskantpeaga poldid. Poldid on peadega süvendis ning poldide ja kuuma plaadi vahel on PEEK-st (polüeteereeterketoonist) tehtud seibid. Kuumplaadi 3D mudel koos poldide ja seibide on toodud seel 5.3.1 ning feesitud kuumplaat seel 5.3.2.



Sele 5.3.1 Kuumplaadi 3D mudel.



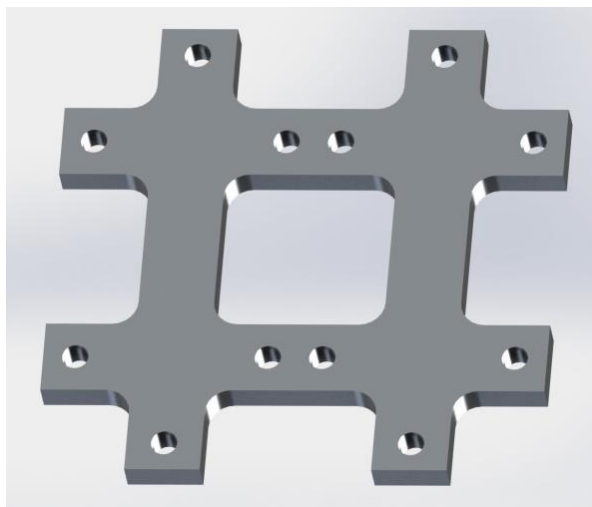
Sele 5.3.2 Valmistatud kuumplaat

PEEK seibide eesmärgiks oli takistada soojuse kandumist kuumalt plaadilt polti, kuna see omakorda soojendaks järgnevate detailide temperatuuri ja lõpuks suurendaks ka TEG-i külma poole temperatuuri, mis vähendaks toodetud elektrienergiat. PEEK seibidel on M5 poldide jaoks tehtud 5,2 mm läbimõõduga ava. PEEK seibidele pandi peale tavalised seibid, et jagada jõud ühtlaselt PEEK seibide peale. PEEK seibi suurema astme läbimõõt on 12 mm, et tavaline M5 seib, välisläbimõõduga 10 mm, mahuks selle peale ära. Kuumplaat valmistati freesimise teel ning PEEK seibid treimise teel.

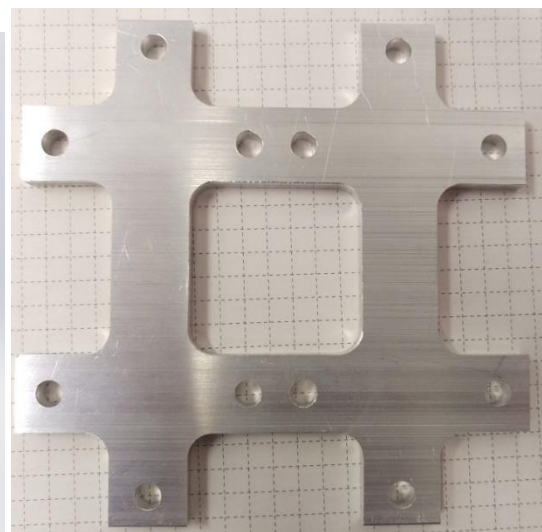
5.4 Kinnitusrakis

Kinnitusrakise eesmärgiks oli hoida termoelektrilisi elemente vesijahutusplokkide ja kuumaplaadi vahel tugevasti kinni.

Selel 5.2.1 on toodud käesolevas lõputöös kasutatava soojusvaheti lihtsustatud ehitus, kus kasutati ühte TEG-i. Tegelikus soojusvahetis on aga neli TEG-i, mille pärast tuli ümber disainida rakis, kuhu on ühendatud vedrude juhtpoldid ja kuumplaadist tulevad kinnituspoldid (vt sele 5.4.1 ja sele 5.4.2). Detail freesiti välja 6 mm paksusest alumiinium toorikust ja on oma mõõtmetelt kõige pikemast ja laiemast kohast 100 x 100 mm. Kõik augud tehti 5,2 mm läbimõõduga M5 poltide jaoks.



Sele 5.4.1 3D mudel rakisest.



Sele 5.4.2 Valmistatud rakis

Käesoleva lõputöö termoelektriline soojusvaheti rakise 3D mudel ilma vesijahutusplokkide sisse- ja väljalaske liitmikuteta on toodud selel 5.4.2.



Sele 5.4.2 Kinnitused ilma sisse- ja väljalaske liitmikuteta.

5.5 Survevedrude valik

Erinevad termoelektrilisi elementide müüvad ettevõtted soovivad kinnitusjõududeks 25 – 200 PSI (naela ruuttolli kohta). Monteerimissurveks valiti 172 kPa (25 PSI), kuna käesolevas lõputöös on termoelektrilise soojusvaheti kokkusurumisjõud kantud edasi vedrude abil ja suurema jõu ülekandmiseks oleks vaja väga jäikaid survevedrusid, mis on ka oma olemuselt suured ja ei mahuks ära antud seadele. [6, 7, 8]

5.5.1 Survevedru jäikuse arvutus

Sobiva monteerimissurve jaoks on vaja arvutada survevedrude jäikus R , mis kirjeldab mitme njuutonlist jõudu tuleb rakendada vedru ühe millimeetri kokku surumiseks:

$$R = P/L, \quad (5.5.1.1)$$

kus R – vedru jäikus, N/mm,
 P – vedrule rakendatud jõud, N,
 L – survevedru lühenemise pikkus, mm.

Monteerimissurve 172 kPa saab ümber kirjutada $0,172 \text{ N/mm}^2$, teades seost, et $1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm}^2$. Käesolevas lõputöös kasutati termoelektrilist elementi mõõtmetega $30 \times 30 \text{ mm}$, saab arvutada mitme njuutonlist survejõudu on vaja rakendada valemiga 5.5.1.2.

$$F = P * A = 0,172 * (30 * 30) = 155 \text{ N}, \quad (5.5.1.2)$$

kus F – survejõud, N,
 P – vajalik monteerimissurve, N/mm^2 ,
 A – termoelektrilise elemendi pindala.

Kuna igat termoelektrilise elemendi jahutust surutakse kahe survevedru abil, siis on ühe vedruga vaja rakendada $155 / 2 = 77,5 \text{ N}$ survejõudu.

Vedrudega rakendatud survejõu suurendamine toimub kinnituspoltidel olevate mutrite keeramisega. Kinnituspoltideks kasutati DIN 931 M5x60 polti, mille keermepikkus on 16 mm. Mutrina DIN 934-8 M5 mutrit, mille paksus on 4 mm. Kinnituspoldi keermepikkusest ja mutri paksusest tulenevalt on liikumisruumi maksimaalselt 12 mm. Tehti otsus, et kogu survejõud rakendatakse mutri keeramisel 10 mm võrra, sellest tulenevalt leiti vedru jäikus valemist 5.5.1.1.

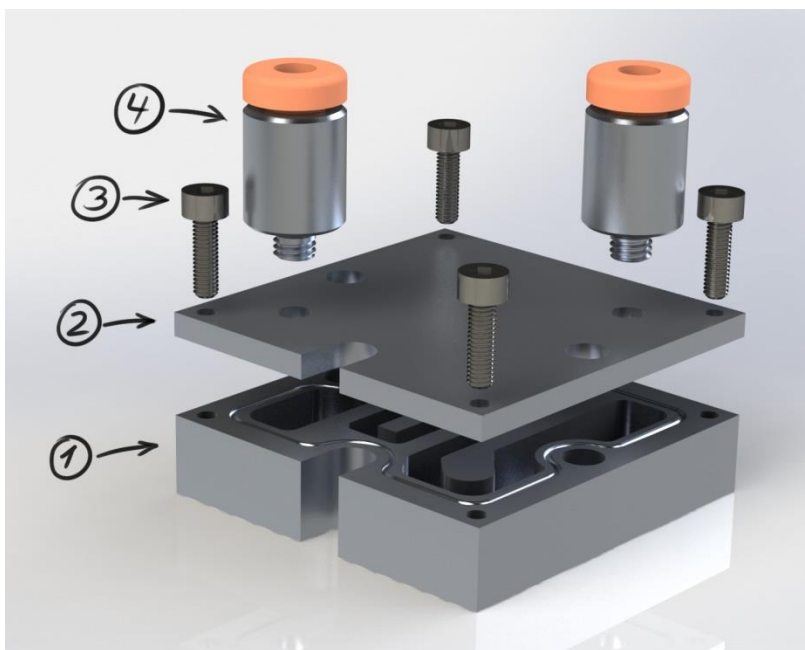
$$R = 77,5 / 10 = 7,75 \text{ N/mm}$$

Vedrude mõõtmed on standardiseeritud DIN 2098 standardiga. Käsiraamatust valiti sobiv survevedru mõõtmetega 1,6 x 12,5 x 24, kus vedru traadi läbimõõduks on 1,6 mm, vedru keskläbimõõt 12,5 mm ja koormamata vedru pikkus 24 mm. Selliste mõõtmetega vedrul on 3,5 aktiivset keerdu ja on jäikusega $R = 9,76 \text{ N/mm}$. [9, lk 285]

5.6 Vesijahutus plokk

Veeploki ülesanne oli hoida termoelektrilise elemendi külma poolt jahedana, et soojus saaks kanduda TEG-i kuumalt poolt külmemale poole. Soojusvaheti koosneb neljast TEG-st ja otsustati anda igale ühele eraldi individuaalne jahutus, sest kui ühe suure veeploki alla panna neli TEG-i, siis kinnitamisel võib jõud ebaühtlaselt jaotuda ning vigastada TEG-e.

Veeplokk koosneb alusest, pealmisest plaadist, kinnituspoltidest ja vee sisse- ning väljalaske liitmikest (vt. sele 5.6.1). Vesijahutusploki (alus + pealmine plaat) dimensioonideks on 48x48x16 mm, ebastandardised mõõtmed, sest jahutusploki ei tohi soojuse kandumise pärast üksteise vastu olla ja pidid mahtuma kuumplaadi peale, mille laiuks on 100 mm.



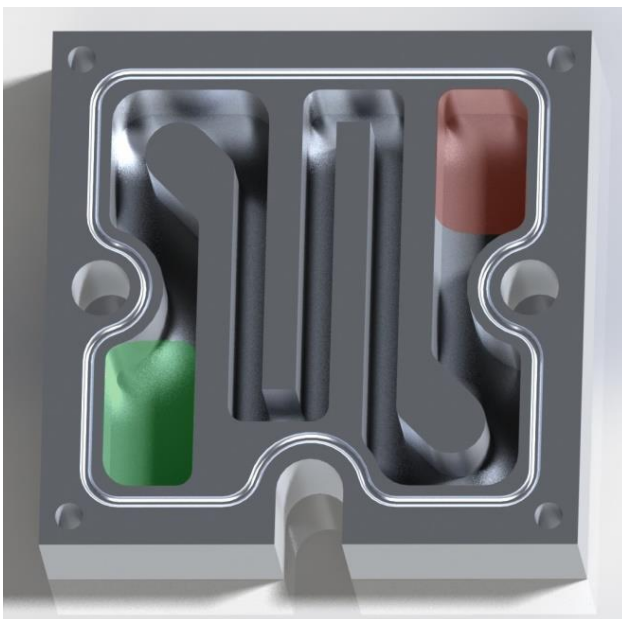
Sele 5.6.1 Vesijahutusploki elemendid: 1 – alus, 2 – pealmine, 3 – M3x10 kinnituspolt, 4 – sisse- ja väljalaske liitmikud.

Vesijahutusploki alus ja pealmine plaat on mõlemad 48 mm pikad ja laiad aga alus on 10 mm paks ja pealmine plaat on 6 mm paks. Valmistamiseks kasutati 100 x 10 mm ristkülik alumiiniumprofiili, kuna ühe jahuti laius on 48 mm, siis sai profiilist freesida välja kõrvuti kaks jahutit. Kokkupandud vesijahutusplokk on toodud seel 5.6.2.



Sele 5.6.2 kokkupandud vesijahutusplokk.

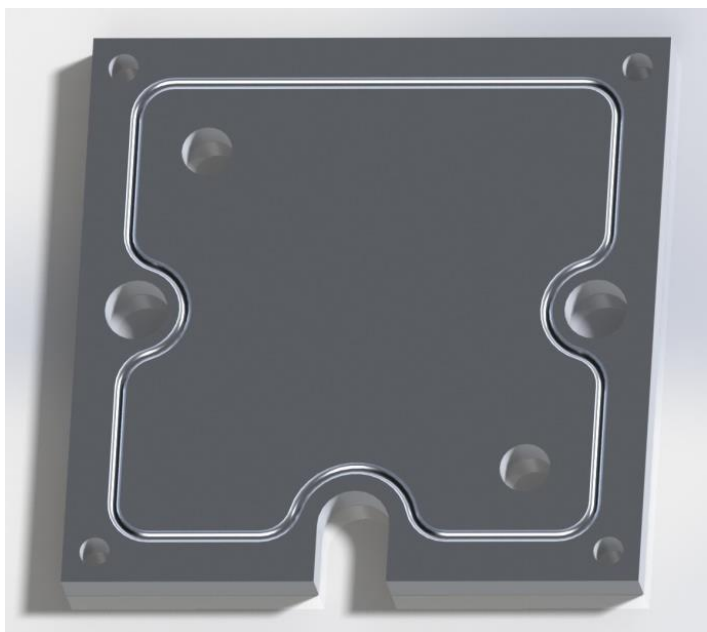
Vesijahutusploki ühest pordist lastakse vesi sisse sisselaskekambrisse, edasi liigub vesi radade vahelt läbi, võttes endaga kaasa TEG-st tuleva soojuse ning lõpuks väljub väljalaskekambrist väljalaskeporti (vt. sele 5.6.3). Radade laius ja seinte paksus on 3 mm.



Sele 5.6.3 Vesijahutusploki alus: roheline – sisselaskekamber, punane – väljalaskekamber.

Vesijahutusploki aluse ja pealmise kinnitamiseks kasutati M3x10 sisekuuskantpolte, mille jaoks puuriti käsiraamatu järgi 2,5 mm läbimõõduga augud ja keermestati M3 keermestajaga. Aluses ja pealmises on läbivad augud survevedrude juhtpoltide jaoks, need augud on läbimõõduga 5,2 mm, et M5 polt mahuks neist läbi. Kuumplaadist tuleva poldi jaoks freesiti sooned küljelt sisse, see tehti soojusvaheti dimensioonide optimeerimise eesmärgil. Jahutusploki pealmisele plaadile tehti vee sisse- ja väljalaske liitmike jaoks käsiraamatu järgi augud läbimõõduga 4,2 mm ja keermestati M5 keermestajaga. [9, lk 244]

Esialgse plaani kohaselt oleks pidanud jahuti aluse ja pealmise vahele tulema 3D prinditud tihend aga ajapuuduse tõttu otsustati hiljem kasutada silikoonliimi. Tihendi soon freesiti 1 mm läbimõõduga sfäärilise peaga freesiga.



Sele 5.6.3 Vesijahutusploki pealmine plaat alt vaates.

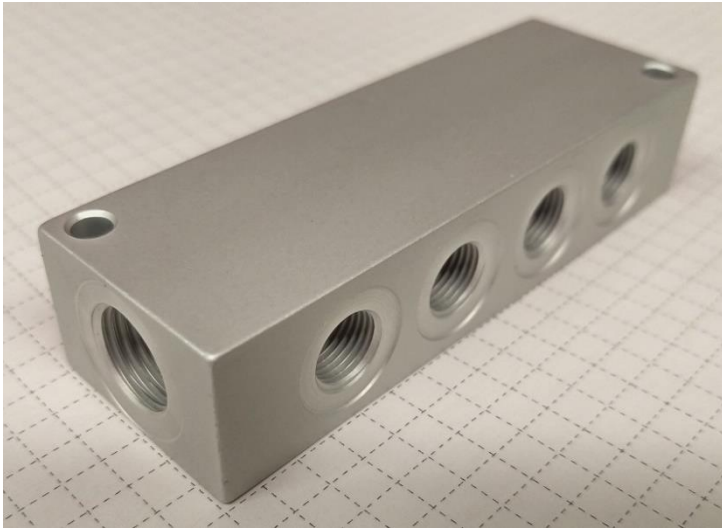
5.7 Vesijahutusploki liitmikud

Vesijahutusploki liitmikeks otsustati kasutada pneumaatikas kasutatavaid liitmike, mis on oma otstarbelt mõeldud kasutamaks suruõhuga aga väiksematel survetel peavad vastu ka veele. Selline valik tehti, sest hüdraulika liitmikud on oma mõõtmetelt liiga suured. Vesijahutusploki liitmikud on toodud seel 5.7.1.



Sele 5.7.1 Vesijahutusploki liitmikud: 1 – veebloki sirge liitmik, 2 – plaatliitmiku väljalaske liitmik, 3 – plaatliitmiku sisselaske liitmik, 4 – drossel (vooluregulaator).

Igale jahutusplokkile on sisse- ja väljalaskeportidele keeratud sirged pneumoliitmikud keermega M5 ja vooliku välisläbimõõduga 5 mm. Vesijahutusplokkide sisselaske liitmikesse tulid voolikud plaatliitmikust. Ilma ühendusteta plaatliitmik on toodud seel 5.7.2.



Sele 5.7.1 Kahe sisendi ja kaheksa väljundiga plaatliitmik.

Plaatliitmiku eesmärk oli jagada pumbast pumbatud vesi 4 jahuti vahel ära, sellel on 2 sisend ja 8 väljundit, vaja oli ainult 1 sisendit ja 4 väljundit aga selline plaatliitmik võeti tuleviku jaoks, et vajadusel saaks pumbata 8 väljundiga kahte soojusvahetisse. Kasutamata sisendi ja väljundite otsa pandi kinni pimemutritega. Plaatliitmiku sisendpordi pneumoliitmiku keere on 1/4" tollkeermes ja voolikuläbimõõduga 10 mm. Plaatliitmiku väljundportide pneumoliitmike keere on 1/8" tollkeermes ja voolikuläbimõõduga 5 mm. Plaatliitmik koos ühendustega on toodud seel 5.7.3.



Sele 5.7.3 Plaatliitmik koos ühendustega.

Kuna plaatliitmiku väljalaskepordid on erineva kaugusel sisselaskepordist, siis jahutitesse pumbatav veekogus võib olla erinev. Sellepärast ühendati plaatliitmiku väljalaskeportide ja jahutite sisselaske vahele drosselid (vooluregulaatorid), mille abil saab reguleerida igasse jahutisse võrdse koguse vett.

5.8 Veepump

Veepumbana otsustati kasutada väikest 5 W-st pumpa Anself dc30e, mis tootja andmete järgi suudab pumbata 240 L/h. Pumba sisse- ja väljalaskeotsade välisläbimõõt on 8,6 mm, seetõttu valiti 8 mm siseläbimõõduga voolik. Veepump on kujutatud seel 5.8.1. [10]



Sele 5.8.1 Veepump: *inlet* – sissetõmbeport, *outlet* – väljalaskeport.

6 MÕÖTESKEEM JA ANDMETE KUVAMINE

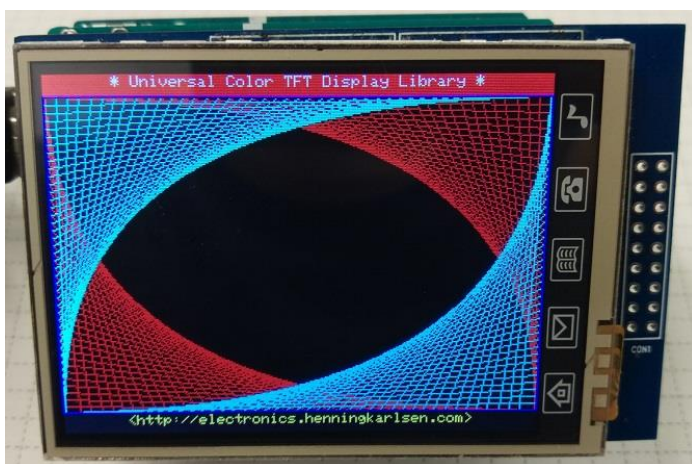
Termoelektrilise soojusvaheti jõudluse testimiseks oli esialgu plaanis teha mõõtmised, millega aga kahjuks ajalises põhjustel ei jõutud lõpule, seetõttu on järgnevas peatükis kirjeldatud missugune võiks välja näha mõõtmisprotsess.

Plaanis oli mõõta termoelektriliste elementidega toodetava elektrienergia kogust ning temperatuuri kuumalt plaadilt, vesijahutusplokilt ning jahutisse sisenevast ja väljuvast veest. Mõõtmised plaaniti kuvada Arduino UNO-le monteeritud LCD ekraanil hx8347G. Temperatuuri mõõtmised plaaniti teha termopaaridega ja edastati Arduinole MAX31855 mikrokiipi kasutades. Elektri mõõtmised taheti tehti ja edastada Arduinole mikrokiibiga INA220.

6.1 LCD ekraani ühendud Arduinoga

Temperatuuride ja toodetud elektrikoguse kuvamiseks otsustati kasutada spetsiaalselt Arduino UNO jaoks tehtud LCD ekraani. Ekraani ühendamiseks Arduinoga tuli ekraani pin-id suruda Arduino emastesse pinnide aukudesse. Arduino ja LCD ekraani töötamiseks tuleb vool arvutist läbi USB juhtme. Ekraan on diagonaalselt on 2.8" ja resolutsiooniga 240 x 320 pikslit ning suudab kuvada 262 000 erinevat värvitooni. [11]

Arduino programmeerimine käib läbi tootja poolt antud programmi Arduino IDE (*integrated development environment*). LCD ekraani töötamiseks oli vaja kolme programmikoodi *library*: TFT, MCUFRIEND_kbv ja Adafruit GFX library. TFT library oli Arduino IDE-sse sisse ehitatud, MCUFRIEND_kbv on ekraani tootja poolne library, mis viitas ka Adafruit GFX library-le, mõlemad neist sai Arduino IDE Library Manager keskkonna kaudu alla laadida. Töötav LCD ekraan on näidatud seel 6.1.



Sele 6.1 Arduino LCD ekraan.

6.2 Temperatuuri mõõtmine

Temperatuuri mõõtmiseks tuleb ühendada MAX31855 mikrokiip Arduino UNO-ga. Selle realiseerimiseks oli vaja ühendada Arduino UNO ja LCD ekraani vahele Arduino Proto plaat, millele joodeti piigiribad (vt. sele 6.2.1). Arduino Proto plaadiga oli plaanis ühendada makettplaat, millele mahuksid ära MAX31855 mikrokiibid ning kuus klemmliistu, millesse saaks ühendada nelja termopaari terminalid ning ühe termoelektrilise elemendi positiivsed ja negatiivsed terminalid ning koormustakisti võimsuse mõõtmiseks.

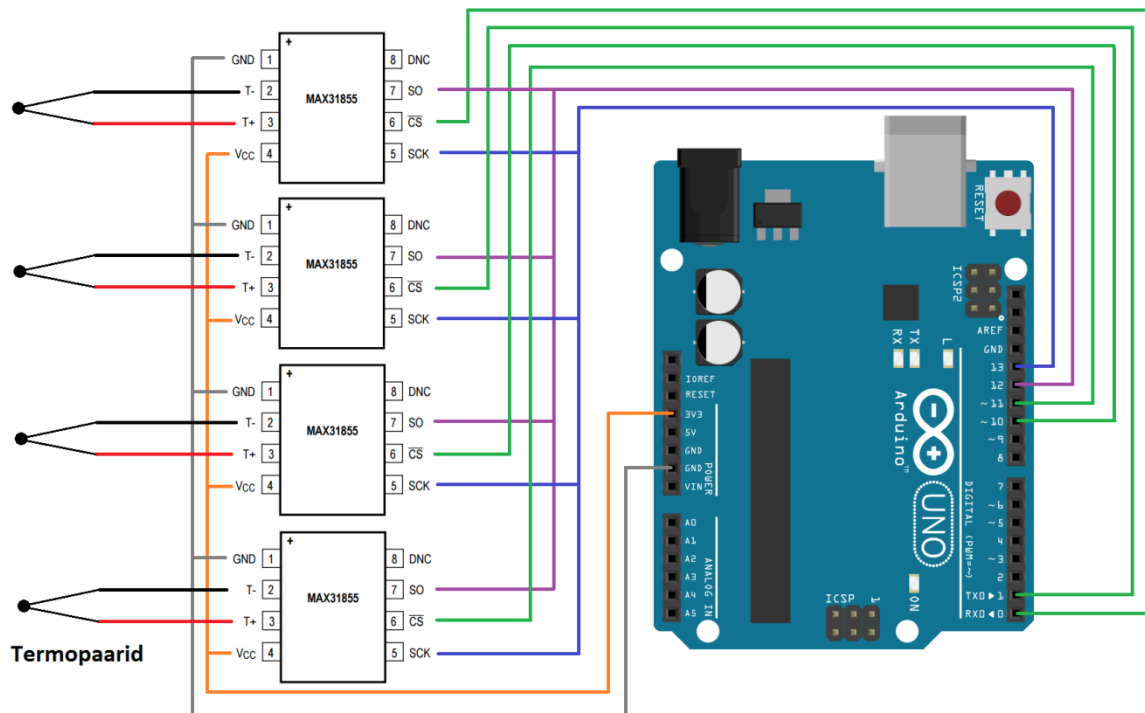


Sele 6.2.1 Arduino ühendus: 1 – Arduino UNO, 2 – Arduino Proto, 3 – ekraan, 4 – piigiribad.

6.2.1 MAX31855 mikrokiibi ühendamine

Temperatuuri kuvamiseks ekraanil tuleb esmalt muuta termopaarides tekkinud pinge signaaliks, millest Arduino UNO oleks suuteline aru saama. Selleks on võimalik kasutada MAX31855 mikrokiipi, mille analoog-digitaal muundur (ADC) muudab termopaarides temperatuuri mõjul tekkinud analoogpinge digitaalseks signaaliks, ning suudaks kompenseerida termopaari külmiite temperatuuri erinevuse 0°C -st. MAX31855 analoog-digitaal muundur töötab märgitud (*signed*) 14 bitise resolutsiooniga vahemikus -270°C, kuni +1800°C, mis tähendab, et see suudab kuvada temperatuure 0,25°C täpsusega. [12]

Selel 6.2.2.1 on toodud skeem MAX31855 mikrokiibi võimalikust ühendusest Arduino UNO plaadi ja termopaaridega.



Sele 6.2.2.1 MAX31855 mikrokiibi ühendusskeem.

MAX31855 mikrokiibil on kaheksa jalga:

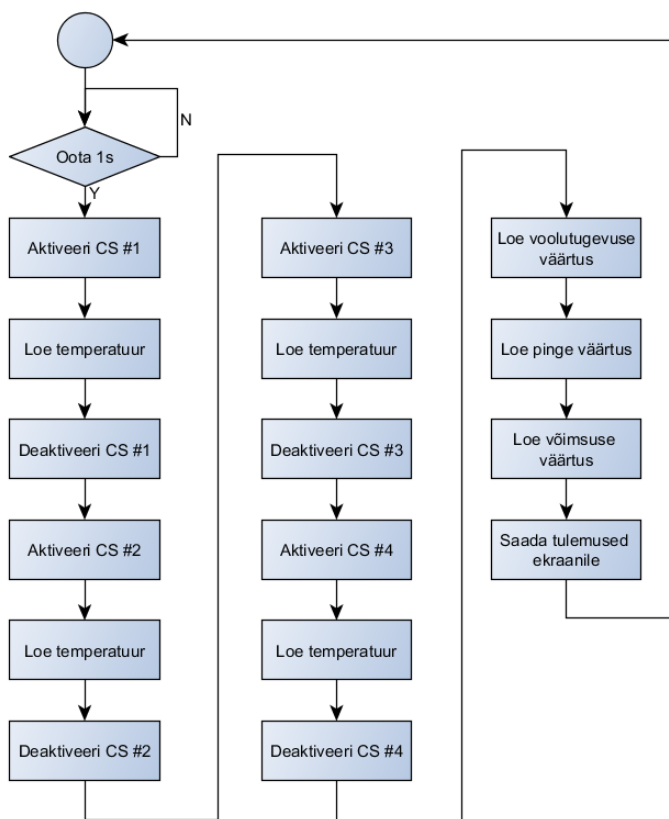
- 1) GND – maandus, ühendub Arduino UNO plaadil oleva GND piniga,
- 2) T- jalaga saaks ühendada termopaari negatiivse juhtme,
- 3) T+ jalaga saaks ühendada termopaari positiivse juhtme,
- 4) Vcc – toitevool, mis ühendub Arduino UNO 3,3 V pinni,
- 5) SCK – *Serial-Clock Input*, MAX31855 töötamise taktisagedus, jagatud liin, saaks ühendada Arduino pinni 13,
- 6) \overline{CS} – *Chip Select*, kui Arduinolt tuleb signaal, siis saadetakse tagasi üle SO pinni temperatuuri näit, kõigil erinevad ühendused Arduinoga,
- 7) SO – *Serial Output*, andmeliin, mida mööda saadetakse temperatuuri näit, jagatud liin kõigi mikrokiipide poolt.,
- 8) DNC – (*Do Not Connect*) pin, mida ei ühendata kuhugi. [12]

Mikrokiibil INA220 on kümme jalga:

- 1) A1 – address pin, ühendatav maandusesse,
- 2) A2 – address pin, ühendatav maandusesse,
- 3) NC – (*No Connection*), ei ühendata kuhugi,
- 4) SDA – *Serial Bus Data*, andmeliin, mida mööda saab saata Arduinosse mõõtetulemused, ühendatav Arduino SDA pinni, milleks on pin 18,
- 5) SCL – *Serial Bus Clock*, töötamise taktisagedus, ühendatav Arduino SCL pinni, milleks on pin 19,
- 6) V_s – toiteliin, ühendatav Arduino 5 V pinni,
- 7) GND – maandus, ühendatav Arduino GND pinniga,
- 8) VBUS – TEG-i väljundpinge mõõtmise klemm, ühendatav TEG-i positiivse klemmiga,
- 9) IN- on ühendatav sunttakisti negatiivse poolega,
- 10) IN+ on ühendatav sunttakisti positiivse poolega. [13]

6.4 Programmi algoritm

Peale mikrokiipide MAX31855 ja INA220 ühendamist oleks vaja kirjutada Arduino UNO-le programmikood, mis jagaks mikrokiipidele käsked mõõtmiste alustamise ning Arduinole tagasi edastamise kohta. Mõõtmised võiks teha iga sekundi tagant. Programmi algoritm on toodud selel 6.4.1.



Sele 6.4.1 Programmi algoritm.

Mõõtmisi võiks alustada temperatuuridest MAX31855 mikrokiibiga. Temperatuuri on vaja mõõta neljast kohast ja iga mõõtmise jaoks tuleks kasutada eraldi MAX31855 kiipi. Andmete saatmine toimuks kõigi kiipite poolt jagatud SO (*Serial Output*) pinni kaudu, mis tähendab, et suhtlemine toimub järjestikku üksteise järel. Selleks tuleb aktiveerida CS (*Chip Select*) pin ning mõõtev MAX31855 kiip saab aru, et tema kord on temperatuuri lugeda ning Arduinosse tagasi saata.

Peale temperatuuride mõõtmist saaks teha elektrilised mõõtmised läbi INA220 mikrokiibi. Mikrokiip INA220 mõõdab järjestikku voolutugevuse väärtust, siis pinge väärtus ning lõpuks võimsuse väärtust. Tulemused saadaks Arduinosse tagasi SDA (*Serial Bus Data*) liini kaudu ning lõpuks kuvaks ekraanil.

KOKKUVÕTE

Käesoleva bakalaureusetöö kujunes välja professor Lauri Kütti teaduslikust projektist, kus kasutakse parabool-pegeliga päikesekollektorit, et toota soojusenergiat termoelektriliste elementide jaoks.

Töö eesmärgiks sai ehitada termoelektriline soojusvaheti, mis kuumutaks termoelektrilist elementi ühelt poolt ja jahutaks seda teiselt poolt ning tulemusena toodaks elektrienergiat. Tööd alustati raalprojekteerimise teel, kus esmalt loodi *Solidworks* programmi abil 3D mudel soojusvahetist. Mudel koosnes mitmest detailist, mis tuli välja freesida või treida. Soojusvaheti koostamiseks oli vaja valmistada kuum plaat, neli vesijahutusplokki ja kinnitusrakis, mis hoiaks termoelektrilist elementi kuumplaadi ja vesijahutusplokkide vahel. Iga vesijahutusplokk koosnes alusest, kus olid rajad sees, et suurendada vee ja jahutusploki kontaktpinda ning pealmisest plaadist.

Peale soojusvaheti detailide valmistamist oli järgmiseks ülesandeks luua veeringlus vesijahutusplokkidele. Selleks hangiti veepump, detail, millesse sisseminev vesi jaguneks neljaks väljaminevaks ning liitmikud voolikute jaoks.

Viimases ülesandeks sai soojusvaheti jõudluse hindamiseks mõõteskeemi koostamine, millega aga kahjuks ei jõutud ajalistel põhjustel lõpule. Mõõteskeem projekteeriti Arduino UNO baasil ja kuvatakse Arduinole monteeritud ekraanil. Temperatuurid plaaniti mõõta termopaaridega neljast kohast: kuumalt plaadilt, vesijahutusplokkilt, sisseminevast veest ning väljaminevast veest. Saadud tulemused saaks edastada Arduino UNO-le kasutades mikrokiipi MAX31855. Elektriliste mõõtmiste tegemiseks saaks kasutada mikrokiipi INA220, mis mõõdab termoelektrilise elemendi poolt välja antud voolutugevust, pinget ja võimsust.

SUMMARY

This bachelor thesis was developed from Professor Lauri Kütt's scientific project of solar collector that uses a parabolic mirror to produce heat for thermoelectric generators.

The aim of this bachelor work was to build a thermoelectric heat exchanger which heats a thermoelectric module from one side and cools from another in the purpose of producing electrical energy. This task was initiated through computer aided design, with a program called *Solidworks*, to construct a 3D model of the heat exchanger. The model composed of multiple components that needed to be milled or shaped with a lathe. The assembly of the thermoelectric heat exchanger consisted of a hot plate, four water cooling blocks and a fixing apparatus. Each water cooling block composed of a base with tracks in to increase the surface area water was in contact with and plate to put on top of the base.

After the construction of the heat exchanger, the next step was to create a water circulation for the cooling system. For this the author acquired a water pump, a distribution part that had one inlet and 4 outlets and connections for hoses.

The final task of this bachelor work was to measure the performance of the built thermoelectric heat exchanger; this task however was not completely accomplished because of the lack of time. The measuring scheme was designed on the base of Arduino UNO that would have values displayed on a screen mounted on top of Arduino. The temperature would be measured at four different locations: on the hot plate, on the bottom of water cooling block, from the water going into water block inlet and from the water coming out of outlet. The measurements would be forwarded to Arduino with the use of a microchip MAX31855. The electric measurements would be done with the use of a microchip INA220 that would measure the current, voltage and power output of thermoelectric modules.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. H.Julian Goldsmid. Introduction to Thermoelectricity. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2010.
2. Termoelektriline efekt. Wikipedia. https://et.wikipedia.org/wiki/Termoelektriline_efekt (vaadatud 18.05.2017)
3. Termopaar. Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Thermocouple> (vaadatud 19.05.2017)
4. Soojusvaheti. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_exchanger (vaadatud 20.05.2017)
5. Soojusvaheti. Thermopedia. <http://www.thermopedia.com/content/832/> (vaadatud 20.05.2017)
6. Thermoelectric Module (TEM) Peltier Element Mounting Procedure. TE Technology. https://totech.com/wp-content/uploads/2013/11/tem_thermoelectric_module_mounting_procedure.pdf (vaadatud 21.05.2017)
7. TEC Mounting. Custom Thermoelectric. <http://www.customthermoelectric.com/TECmounting.html> (vaadatud 21.05.2017)
8. Thermoelectric Technical Reference. Ferrotec. <https://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric-reference-guide/thermalref06/> (vaadatud 21.05.2017)
9. Mehaanikainseneri käsiraamat / üldtoimetaja P. Kulu. Tallinn : TTÜ Kirjastus, 2012.
10. Anself dc30e veepumba datasheet. <http://www.anself.com/garden-tools-1098/p-h10448-ln.html> (vaadatud 22.05.2017)
11. Ekraani HX8347-G datasheet. https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/HX8347-G_DS_T_preliminary_v01_100203.pdf (vaadatud 22.05.2017)
12. MAX31855 datasheet. <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX31855.pdf> (vaadatud 23.05.2017)
13. INA220 datasheet. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina220.pdf> (vaadatud 23.05.2017)