



SOOJUSTEHNICA INSTITUUT
Soojusenergeetika õppetool

MSE40LT

Jaak Kimmel

**Rakvere koostootmisjaama töösükli analüüs ja
optimeerimine**

Autor taotleb
tehnikateaduste bakalaureuse
akadeemilist kraadi

Tallinn
2014

AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis..... juhendamisel

“.....”20...a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

“.....”20...a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....”20... a.

..... allkiri

TTÜ soojustehnika instituut
Soojusenergeetika õppetool
BAKALAUREUSETÖÖ ÜLESANNE

2014. aasta kevadsemester

Üliõpilane: Jaak Kimmel

Õppekava: Soojusenergeetika

Juhendaja: Prof. Aadu Paist

Konsultandid: Raimo Rebo, AS Adven Eesti

BAKALAUREUSE TÖÖ TEEMA:

Eesti keeles:

Rakvere koostootmisjaama töötsükli analüüs ja optimeerimine

Inglise keeles:

Analysis and optimization of Rakvere CHP plant's working cycle

Lõputöös lahendatavad ülesanded:

Nr. Tutvustus

1. Orgaanilise Rankine'i tsükli tutvustus
2. Rakvere koostootmisjaama tutvustus
3. Koostootmisjaama töötsükli analüüs
4. Töötsükli optimeerimise soovitused

Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid: Koostootmisjaama efektiivse töö tagamine madalate koormuste korral, reguleerides kaugkütte vee ja termaalõli temperatuuri. Optimaalse väljundvõimsuse leidmine võimalikult väikesel omatarbel. Optimaalse atmosfääri lahkvate suitsugaaside temperatuuri leidmine.

Töö keel: Eesti

Kaitsmistootlus esitada deканаati hiljemalt 14.05.12 **Töö esitamise tähtaeg** 31.05.12

Üliõpilane Jaak Kimmel /alkiri/ kuupäev.....

Juhendaja Aadu Paist /alkiri/ kuupäev.....

Sisukord

Contents

Sisukord.....	4
1 Sissejuhatus	5
2 Seletuskiri.....	6
2.1 ORC (Organic Rankine cycle)	6
2.1.1 ORC teoreetilised alused.....	6
2.1.2 ORC tehnoloogias kasutatavad orgaanilised vedelikud.....	10
2.2 Rakvere Päikese tn. koostootmisjaam.....	13
2.2.1 Jaama töörežiimid	13
2.2.2 Tahke biomass kütuse eelkoll.....	14
2.2.3 Termaalõli katel.....	14
2.2.3 Kasutatav biokütus	15
2.2.4 ORC moodul	15
2.2.4 Suitsugaaside koostis ja ärajuhtimine	17
2.3 Töotsükli analüüs	18
2.3.1 Analüüsitavad andmed	18
2.3.2 Elektrilise efektiivsuse sõltuvus kaugkütte vee temperatuurist.....	19
2.3.3 Efektiivsuse sõltuvus silikoonõli aurustumistemperatuurist	21
2.3.4 Tootlikuse sõltuvus välistemperatuurist.....	23
2.3.5 Omatarve erinevatel väljundvõimsustel.....	25
2.3.6 Efektiivsuse sõltuvus suitsugaaside temperatuurist	26
3 Kokkuvõte	28
4 Summary	30
5 Kasutatud kirjandus.....	31
Lisad.....	33
Lisa 1. Näide analüüsitavatest andmetest.....	33
Lisa 2. Päikese tn. koostootmisjaama omatarve – tarbijate tabel [21]	34
Lisa 3. Päikese tn. koostootmisjaama skeem.....	35

1 Sissejuhatus

2014. a aprillis valmis Adven Eesti AS Rakvere Päkese tn. koostootmisjaam. Antud jaam töötab Eestis uudsel ORC (Orgaaniline Rankine'i tsükkel) tehnoloogial. Tegemist on teise sarnasel tehnoloogial töötava jaamaga Eestis, esimene valmis Kuressaares. Jaam kasutab kütusena biomassi ja varustab Rakvere linna elektri- ja soojusenergiaga. Projekti peatöövõtja oli AS Tamult ja ORC seadme paigaldas Itaalia firma Turboden.

Maailmas pööratakse üha rohkem tähelepanu heitgaaside piiramisele ja uute keskkonnasõbralike kütuste kasutuselevõtule. Samuti vähenevad maailma naftavarud ja keeruline poliitiline olukord Venemaa ja Ukraina suhetes võib järsult suurendada Venemaalt tuleva gaasi hinda.

Biomassi kütusena kasutava koostootmise kasutuselevõtt on hea viis vähendada keskkonda kahjustavate emissioonide hulka ja tarbijate jaoks soojuse hinda. Adven Eesti AS koostootmisjaama rajamine vähendas ka Rakvere tarbijate jaoks soojuse hinda.

Töö autor töötab Adven Eesti AS-is. Antud töö eesmärk on lühidalt tutvustada Orgaanilise Rankine'i tsükli põhimõtteid, kasutatavaid soojuskandjaid, tutvustada lühidalt Rakvere Päkese tn. koostootmisjaama ja analüüsida jaama töösükli ning leida optimaalsed parameetrid võimalikult efektiivseks tööks madalatel koormustel.

Peamised lahendatavad küsimused on - kuidas mõjutavad ORC mooduli efektiivust kaugküttevõrku mineva vee temperatuur ja ORC moodulisse sisenev termaalõli temperatuur.

Analüüsitavad andmed on pärit Adven Eesti AS-lt ja andmetöötluks kasutatakse programmi Microsoft Excel 2010.

2 Seletuskiri

2.1 ORC (Orgaaniline Rankine tsükkel)

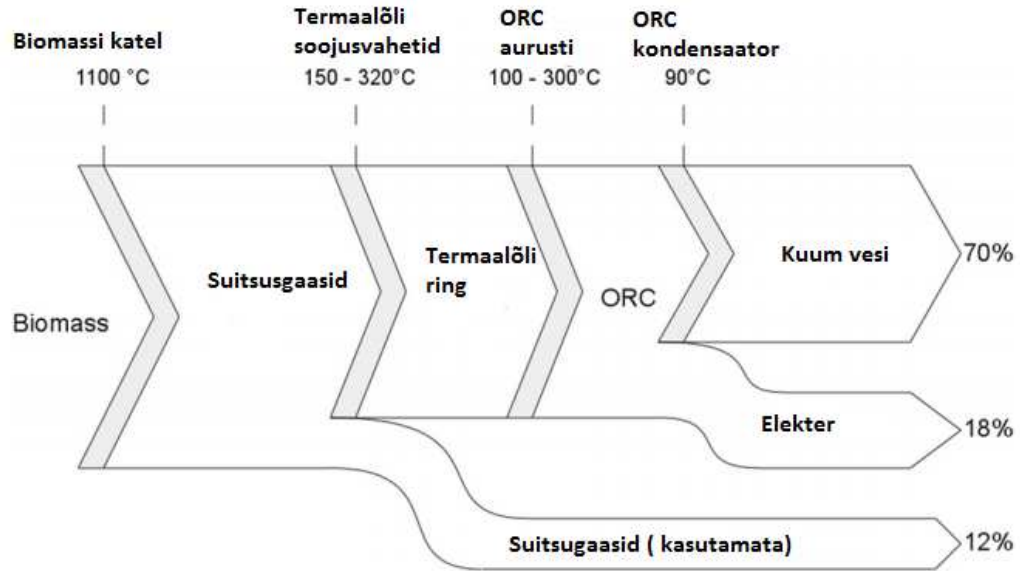
2.1.1 ORC teoreetilised alused

Orgaanilise Rankine'i tsükli on sarnased teoreetilised põhimõtted ja komponendid (aurusti, kondensaator, turbiin ja pump) nagu auru Rankine'i tsükli. Suuremad erinevused on seotud kasutatava soojuskandjaga, soojuskandja füüsikaliste ja keemiliste omadustega, soojusallika temperatuuri ja tsükli ehitusega. Orgaaniline Rankine tsükli korral on võimalik toota mehhaanilist energiat palju madalama temperatuuriga soojusallikat kasutades kui Rankine'i tsükli korral. [1]

Elektri- ja soojusenergia koostootmisel biokütusest koosneb ORC süsteem järgnevatest komponentidest[2]:

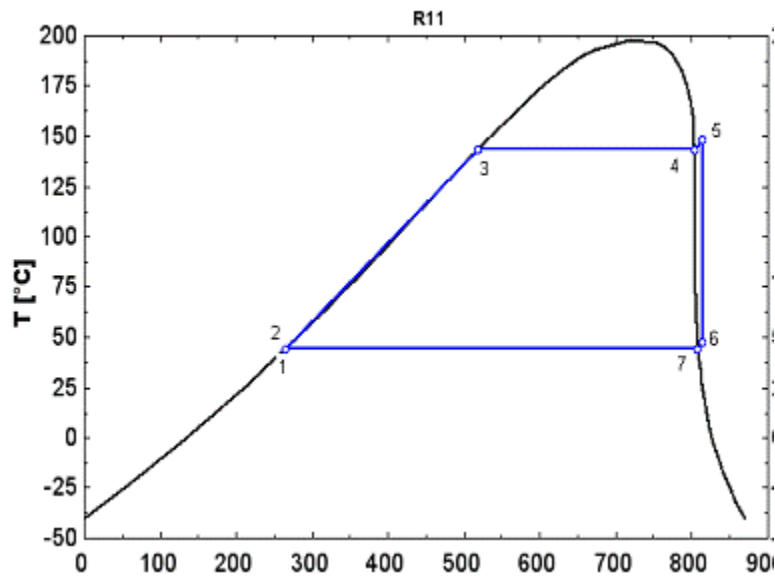
- Tahke biomass kütus põletatakse koldes, mille tehnoloogia on sarnane kolletele, mis kasutavad soojuskandjana vett;
- Biomassi põletamisel tekkivad suitsugaasid kuumutavad termaalõli. Termaalõli eelised soojuskandjana on madal rõhk aurustis, suur inertus, võime kiirelt adapteeruda koormuse muutustega. Kuumutamine kuni temperatuurini 300 °C tagab õli pika kasutusaja.
- ORC mooduli abil muudetakse olemasolev soojusenergia elektrienergiaks. Mooduli kondeseerumissoojuse abil toodetakse kuuma vett temperatuuridel 80 – 120 °C, mis on sobiv temperatuur kasutamiseks kaugküttes või kuivatusprotsessides. [2]

Biomassi koostootmisjaamade võimsus on tavaliselt vahemikus 4-10 MW soojusenergiat ja vastavalt 1-2 MW elektrienergiat. Antud vahemikus pole auru tsükli kasutavad jaamad finantsiliselt tasuvad. Sele 2.1 näitab, et koostootmisjaama elektriline efektiivsus limiteeritud on (18 %) aga jaama üldine kasutegur on väga kõrge – 88 %. See on palju kõrgem kui tavalise elektri jaama kasutegur. [3]



Sele 2.1 Soojusenergia muundumine ja temperatuurid ORC koostootmis protsessis. [3]

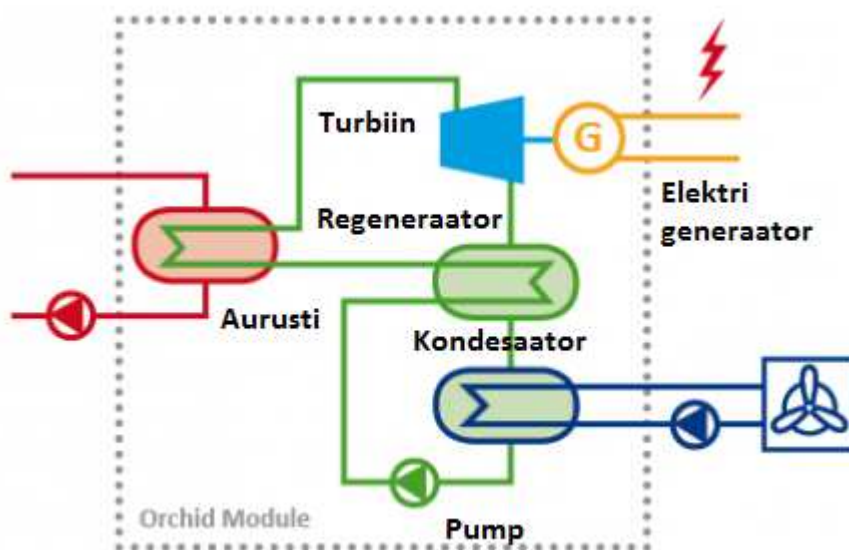
ORC moodul põhineb suletud Orgaanilisel Rankine'i tsükliil, mis kasutab soojuskandjana orgaanilist vedelikku. Standartsetes moodulites, mida kasutatakse koostootmisel tahkest biokütusest, on soojuskandjaks silikoonõli.[2]



Sele 2.2 ORC protsess soojuskandja R11 korral [4]

ORC mooduli kinnise silikoonõli kontuuri protsessid [2]:

- Silikoonõli eelkuumeneb ja aurustub aurustis kuuma termaalõli toimel;
- Tekkinud aur paisub turbiinis, mis paneb siduri abil tööle elektrigeneraatori;
- Turbiinist väljunud aur läbib regeneraatori, soojendades aurustisse sisenevat õli;
- Aur kondenseerub kaugküttevee poolt jahutatavas kondensaatoris;
- Seejärel pumbatakse vedelik regeneraatorisse ja sealt edasi aurustisse, lõpetades kinnise ringi.



Sele 2.3 ORC mooduli komponendid [5]

ORC eelised võrreldes Rankine'i tsükliga järgmised [2] :

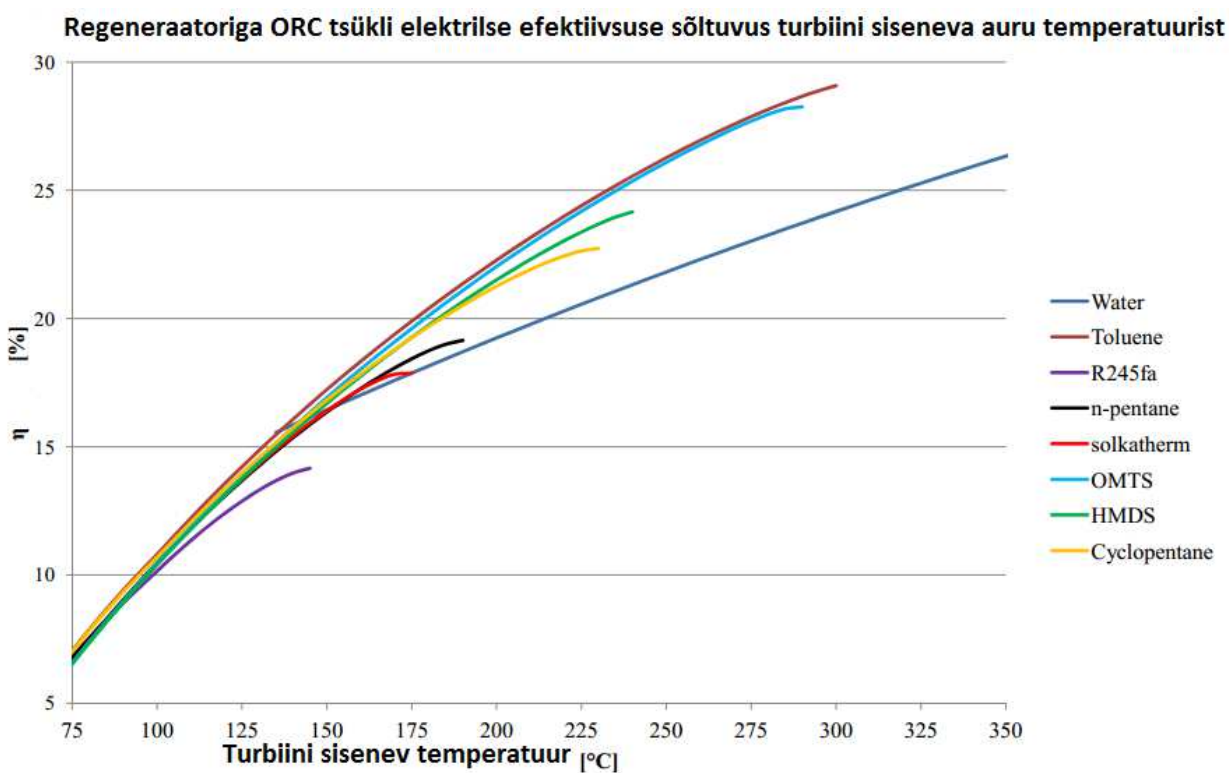
- Väikesed mehhaanilised pinged turbiinis, tänu aeglasele turbiini pöördekiirusele.
- Aeglane turbiini pöörlemiskiirus lubab kasutada otsülekandega elektrigeneraatorit, puudub vajadus käigukasti järele.
- Turbiini pihustatvas aurus puudub niiskus, seega ei teki turbiinilabade erosiooni.
- Pikk mooduli tööiga tänu orgaanilise vedeliku karakteristikutele, erinevalt veeauru tsüklis, ei teki ventiilide, turbiinilabade ja torustiku erosiooni ning korrosiooni.
- Vedeliku eeltöötlus ja deaeraator pole vajalikud.
- Lihtne käivitamise ja seiskamise protseduur.
- Vaikne töörežiim.
- Minimaalne vajadus hoolduseks.

Lisaks :

- Vajaliku soojuse kogus aurustumiseks on väiksem tänu madalamale aurustumistemperatuurile [6].
- Ülekuumendus pole vajalik, kuna orgaanilised vedelikud on jäävad ülekuumendatuks kuni paisumise lõpuni [6]
- Väike tiheduse erinevuse orgaanilise vedeliku auru-ja vedelikufaasi vahel - võib kaustada aurusteid, kus aurustumine toimub ühes torus. [3]

ORC puudused võrreldes Rankine tsükliga on järgmised:

- Suurema soojuskandja viskoossuse tõttu peab kasutusel olema suurema võimusega tsirkulatsioonipump, mis suurendab omatarvet ja vähendab elektrilist efektiivsust [6]
- Orgaanilised vedelikud on tuleohtlikud, keskkonnale ohtlikud ja kallid. [3]
- Kõrge korstnasse lahkuvate gaaside temperatuur, gaasid tuleb maha jahutada [3]



Sele 2.4 Regeneraatoriga ORC tsükli elektrilise efektiivsuse sõltuvus turbiini siseneva auru temperatuurist. [6]

Lisaks biomassile on ORC tehnoloogia kohaldatav järgnevate soojusallikate korral [7]:

- Geotermaal energia,
- Tööstuse heitgaasid (teras -, keraamika- ja tsemenditööstus),
- Sisepõlemismootrite ja veokite mootorite heitgaasid,
- Gaasiturbiinist väljuv gaas,
- Kütuse elemendid,
- Päikeseenergia,
- Tuumaenergia jääksoojus.

2.1.2 ORC tehnoloogias kasutatavad orgaanilised vedelikud

ORC süsteemi optimeerimiseks on mitmeid parameetreid, kõige lihtsamaks meetodiks on õige töövedeliku valik. Töövedeliku valikust sõltub aurusti ja kondensaatori rõhk ja turbiini ehitus. Optimaalse vedeliku valik sõltub soojusallika liigist ja temperatuurist [1]

Olulised parameetrid töövedeliku valimisel on järgnevad [1]:

- Soojuslik – ja elektrilineefektiivsus peaksid olema maksimaalsed,
- Kondenseerumis rõhk peaks olema kõrgem kui atmosfäärirõhk, et vältida lekkeid.
- Mida kõrgem auru tihedus, seda madalam auru erimaht ja mahukulu. Madala mahukulu korral on vajavad seadmed väiksema mahuga, seega ka odavamad. Kõrge erimahu korral suureneb rõhulang soojusvahetites ja suureneb pumba vajalik töö.
- On kolme sorti töövedelike, kuivad -, isoentroopilised- ja märjad töövedelikud. Märjade töövedelike korral võivad turbiinis moodustuda tilgad, mis võivad tõsiselt turbiini kahjustada. Vajalik oleks ülekuumendus, mis muudab seadme kallimaks. Kuivade ja isoentroopiliste vedelike korral selline probleem puudub.
- Suur entalpia muutus turbiinis tagab suure elektrilise efektiivsuse.
- Suur vedeliku soojusmahtuvus parandab soojusülekanne soojusallikalt ja vähendab soojuskandja mahukulu.
- Vedelik peab olema keemiliselt ja termaalselt stabiilne.

Kasutatavad vedelikud kuuluvad viite gruppi [8]:

- Süsivesinikud – butaan, pentaan ja heksaan
Keemistemperatuur lubab kondensatsiooni atmosfäärirõhu lähedal.
- Flouritud süsivesinikud (enamuse külmaagensid)

Efektiivne paisumine ja puudub vajadus rekuperaatori järele

- Aldehüüdid ja ketoonid

Süsivesinike variatsioonid, ühendavad külmaagenside ja süsivesinike omadused

- Silikoonid

Kõrge keemiline stabiilus tagamaks pikka tööiga

- Aromaatsed süsivesinikud

		Kriitiline temp.	Kriitiline rõhk	Keemis temp.	Aurustumissoojus
Vedelik	Valem	°C	bar	°C	kJ/kg
Vesi	H ₂ O	373,9	220,6	100	2257,2
Tolueen	C ₇ H ₈	318,7	41,4	110,7	365
R245fa	C ₃ H ₃ F ₅	154,1	36,4	14,8	195,6
n-pentaan	C ₅ H ₁₂	196,6	33,7	36,2	361,8
tsüklopentaan	C ₅ H ₁₀	238,6	45,1	49,4	391,7
Solkatherm	Solkatherrm	177,6	28,5	35,5	138,1
OMTS	MDM	290	14,2	152,7	153
HMDS	MM	245,5	19,5	100,4	195,8

Tabel 1. Mõnede orgaaniliste vedelike parameetrid [6]

Biomassi põlemistemperatuur on väga kõrge võrreldes termaalõli ja silikoonõli temperatuuriga. Maksimaalne orgaanilise vedeliku töötemperatuur on 400 °C, arvestades, et vedeliku stabiilsustemperatuur on natukene suurem. Samas leegi temperatuur biomassi põletamisel tõuseb kuni 1000 °C, selletõttu tuleb vältida termaalõli lokaalset ülekuumenemist ja vedeliku muutumist keemiliselt ebastabiilseks. Koostootmisrežiimi kondenseerumistemperatuur peab olema suhteliselt kõrge (80 – 120 °C), et tagada koostootmine. Antud temperatuuride tõttu ei saa kõiki madalatele soojusallika temperatuuridele mõeldud töövedelike kasutada, kuna tekib liiga kõrge auru rõhk kondensatsiooni temperatuuril. Antud põhjusel kasutavad enamuse biomasskütusel töötavad ORC jaamad töövedelikuna oktametüültrisiloksaani, kuigi süsteemi soojuslik efektiivsus ja energiatõhusus on suhteliselt madalad. [19]

Tabelis 2. On esitatud oktametüültrisiloksaani parameetrid [9]:

Molekulivalem	$C_8H_{24}O_2Si_3$
Molaar mass	236.531 g/mol
Tihedus	0.82 g/cm ³
Sulamis temperatuur	-82 °C
Keemistemperatuur	153 °C
Murdumisnäitaja	1.384
Leekpunkt	29 °C
Auru rõhk	50 mmHg (at 72 °C)
Aurustumissoojus	0.15 kJ/g
Erisoojus	32.92 kJ/g
Kriitiline temperatuur	289.75 °C
Kriitiline rõhk	1420 kPa

Tabel 2. Oktametüültrisiloksaani parameetrid [9]

2.2 Rakvere Päikese tn. koostootmisjaam

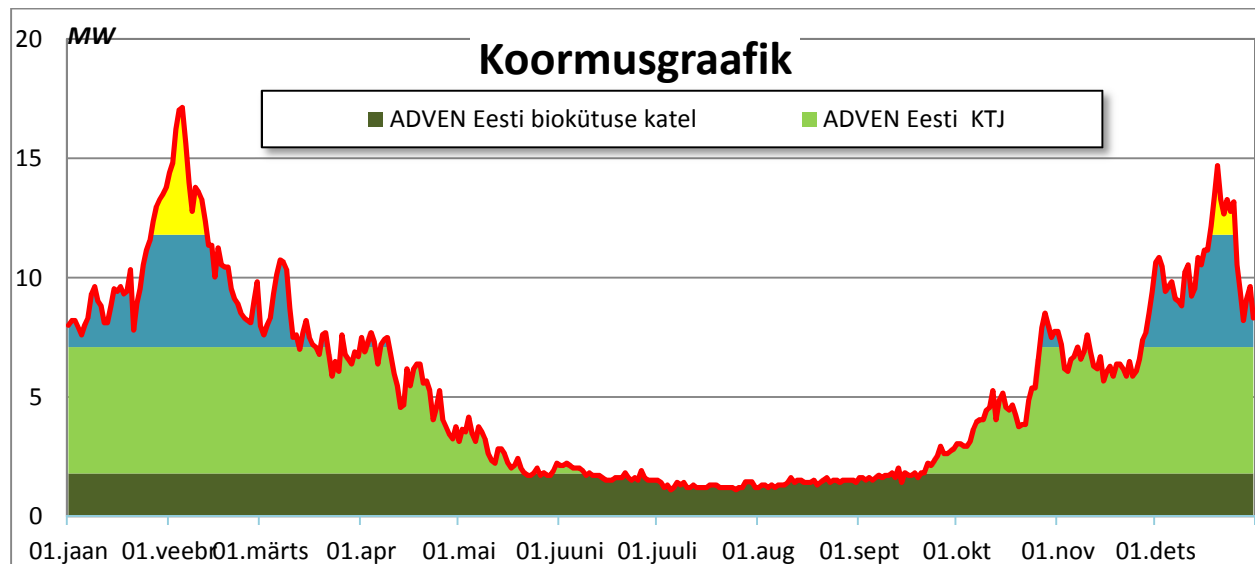
2.2.1 Jaama töörežiimid

1. Koostootmisrežiimis [10]
 - 4520 kW_s Soojuslik võimsus
 - 1035 kW_e Elektriline võimsus
2. Soojuse tootmise režiimis 6400 kW_s [10]

Rakvere Päikese tn. koostootmisjaama skeem on toodud Lisas 3.

Koostootmisjaam on projekteeritud töötama peamiselt tõhusal koostootmise režiimil, kus toodetakse maksimaalne kogus elektrit ning kogu turbiini heitsoojus kasutatakse ära Rakvere linna soojusvõrgu soojaga varustamiseks. Jaam on ettenähtud töötama ka ainult sooja tootmise režiimis, kus lülitatakse ORC moodul süsteemist välja ja soojus kantakse otse võrguveele edasi termaalõlilt läbi toru-torus tüüpi soojusvahetite. Samuti on jaam projekteeritud töötama režiimis, kus toodetakse ainult elektrit, seljuhul jahutatakse kogu turbiini heitsoojus maha õhkjahutite abil. [10]

Adven Eesi koostootmisjaam ja Adven Eesti biokütuse katel tagavad Rakvere soojusvõrgu baaskoormus [17]



Sele 2.5 Rakvere linna soojusvõrgu koormugraafik [17]

2.2.2 Tahke biomass kütuse eelkolle

Tahket biokütust (hake, koor, saepuru, võsahake, turvas) põletav eelkolle soojusliku nimivõimsusega 7800 kW . Biokütuse põletamine toimub liikuval kald-trepp restil, mis on varustatud resti elementidega, mille kroomi sisaldus on ~26 %. Eelkolde põlemise kasutegur on 97 % ja resti pindala 19,6 m². Põletava kütuse niiskus võib olla vahemikus $W_t = 35 - 60$ %, niiskusel $W_t = 55$ % töötab eelkolle nimivõimsusel. [10]

2.2.3 Termaalõli katel

Termaalõli katel nominaalvõimsusega $Q = 4850$ kW. Katel on konstruktsioonilt vertikaalne leek-suitsutorukatel, mis koosneb kolmest sektsioonist, mille moodustavad sojuskiirguslik osa ja konvektiivne osa. [10]



Sele 2.6 Rakvere Päikese tn. koostootmisjaama termaalõli katel [11]

2.2.3 Kasutatav biokütus

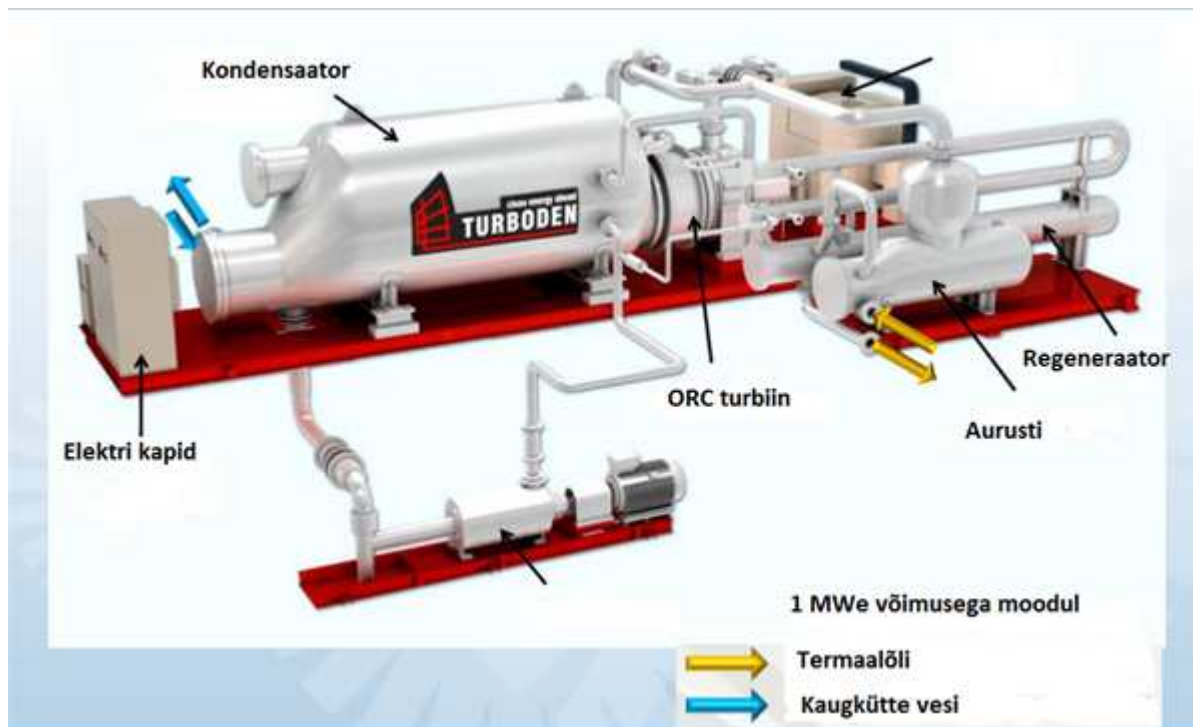
Kütusena kasutatakse puiduhaket. TTÜ soojustehnika instituudi poolt läbiviidud soojustehniliste katsetuste käigus määrati järgnevad kütuse parameetrid [12]:

- Niiskus $W_t = 44,80 \%$
- Tuha sisaldus $A = 0,61 \%$
- Puistetihedus 321 kg/m^3
- Kütteväärtus $Q = 9,64 \text{ MJ/kg}$
 $Q = 2,68 \text{ kWh/kg}$

Erinevatel aegadel kütusehoidlasse transporditud kütuse parameetrid võivad erineda.

2.2.4 ORC moodul

Tegemist on Itaalia firma Turboden mooduliga Turboden 10 CHP [13].



Sele 2.7 Turbodeni 1 MWe võimsusega mooduli joonis [15]

Antud mooduli parameetrid on järgnevad [14] :

- Termaalõli HT ringi nominaalne temperatuur (sisenev/väljuv) : 300/240 °C
- Sisenev soojuslik võimsus : 5140 kW
- Kuuma vee temperatuur (sisenev/väljuv) : 60/80 °C
- Soojuslik väljundvõimsus veele: 4081 kW
- Elektriline koguvõimsus : 1016 kW
- Elektriline koguefektiivsus : 19,8 %
- Mooduli omatarve : 48 kW
- Elektriline väljundvõimsus : 968 kW
- Elektriline efektiivsus : 18,8 %
- Generaator : 50 Hz, 400 V või 60Hz, 480 V
- Biomassi kulu : 2471 kg/h



Sele 2.8 Rakvere koostootmisjaama ORC moodul [11]

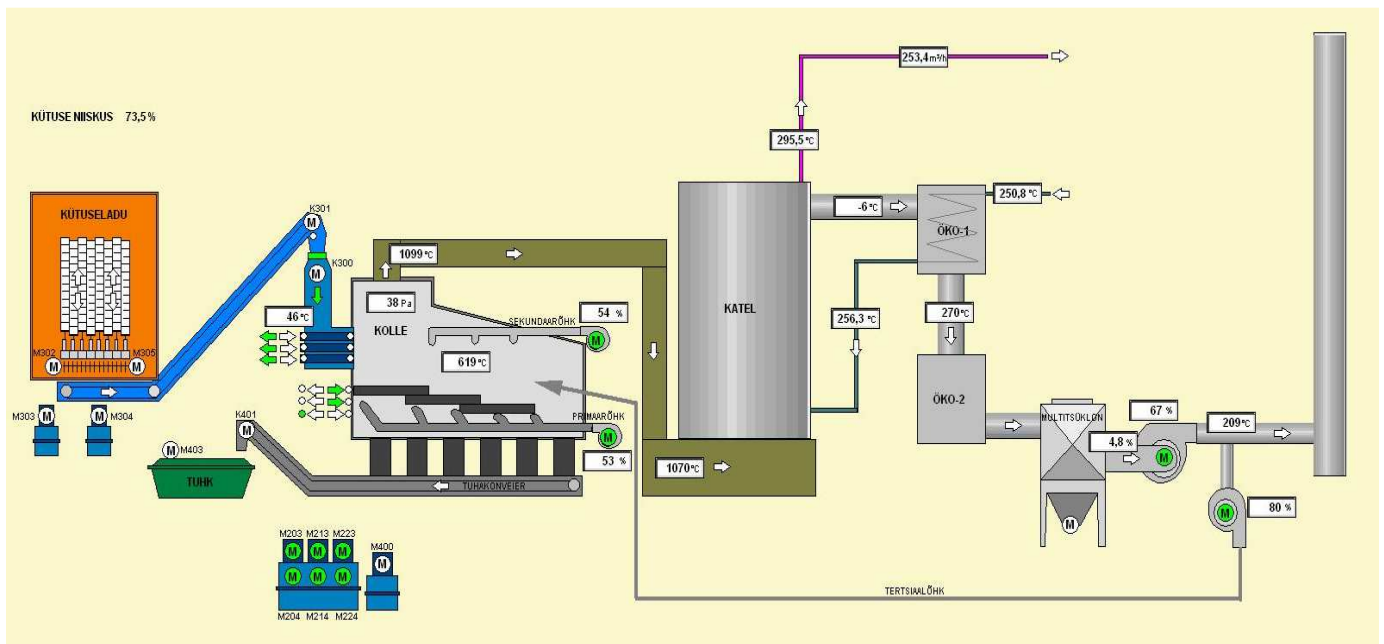
2.2.4 Suitsugaaside koostis ja ärajuhtimine

Ökonomaisem ehk termaalõli eelsoojendi koosneb kahest astmest ja asub pärast termaalõlikatelt (vt Sele 2.9). Mõlemas eelsoojendi astmes soojendavad katlast lahkuvad suitsugaasid termaalõli suurendades niimoodi katlakasutegurit. Lahkuvate gaaside voog on risti termaalõli voolusuunaga. [10]

Termaalõli eelsoojendi järel suunatakse jahutatud suitsugaasid multitsüklonisse, mis puhastab lahkuvad gaasid lenduha osakestest. Multitsükloni puhastusaste jääb vahemikku 80-90 %., millega tagatakse lendosade sialdus tema järel $< 300 \text{ mg/nm}^3$. Peale puhastamist suunatakse gaasid korstnasse.[10]

TTÜ soojustehnika Instituudi poolt läbiviidud suitsugaaside koostise mõõtmistest selgub [12] :

- Temperatuur pärast tsüklonit 211 °C
- Hapniku sisaldus 5 %
- H₂O sisaldus 19 %
- CO 22 mg/Nm³, NO_x 295 mg/Nm³, 6 % CO₂
- Tuha põlemata osa protsent 9 %
- Kasutegur kaudse soojusbilansi alusel 86,8 %.



Sele 2.9 Rakvere Pääkese tn. koostootmisjaama osaline skeem [16]

2.3 Töotsükli analüüs

2.3.1 Analüüsitavad andmed

Analüüsitavad andmed on pärit Adven Eesti AS-ilt. Jaama erinevad parameetrid on kaugloetavad ja andmete väljavõte on võimalik teha 1 minuti kaupa. Jaama tööd saab reaajas jälgida programmi Specview abil. Töös analüüsitavad andmed on pärit ajavahemikust 28.04.2014 – 05.05.2014. Antud vahemik on valitud järgmistel põhjustel – vahemikus on suur soojusliku – ja elektrilise väljundvõimsuse variatsioon, selleks ajavahemikuks olid läbitud jaama käivitusprotsessid ja saavutatud stabiilne töörežiim, antud vahemikus oli minimaalne välistemperatuur alla 0 °C Antud vahemikus oli maksimaalne ja minimaalne välistemperatuur 27,6 °C ja -1,2 °C. (Näide analüüsitavatest andmetest. vt Lisa 1)

Analüüsitavad andmed on järgnevad (vt. Lisa 2 ja Lisa 3):

Parameeter	Ühik	Parameeter	Ühik
Biomassi katlast väljuva õli temp.	°C	Õli temp. HT-soojusvahetist	°C
Biomassi katlasse tagastuva õli temp.	°C	Õli temp. Öko 2-te	°C
Biomassi katla võimsus	kW	Õli temp. Öko 2-st	°C
Biomassi katla läbivool	m ³ /h	Õli temp. LT soojusvahetisse	°C
Õli temp. HT-soojusvahetisse	°C	Õli temp. LT soojusvahetist	°C
Õli temp. Öko 1-te	°C	Vee temp. trassi	°C
Vee temp. LT soojusvahetist	°C	Vee rõhk KTJ väljundil	bar
Vee temp. ORC-sse	°C	Vee rõhk KTJ sisendil	bar
Vee temp. ORC-st	°C	Vee rõhk trassi	bar
Vee temp. KTJ väljundis	°C	Vee rõhk trassist	bar
Suitsu temp. Katlast	°C	ORC läbivool	m ³ /h
Suitsu temp. Öko 1-st	°C	ORC läbivool	t/h
Suitsu temp. Välja	°C	ORC soojus väljundvõimsus	kW
Välisõhu temp.	°C	ORC elektri väljundvõimsus	kW
Trassi rõhuvahe	bar	Trafost võrku minev võimsus	kW

Tabel 3. Töös analüüsitavad andmed.

Lisaks on olemas parameetrid : pumpade sagedused, ventiilide asendid, erinevad toodetud kilovatt-tunnid.

2.3.2 Elektrilise efektiivsuse sõltuvus kaugkütte vee temperatuurist

Kõrge elektrilise efektiivsuse (võrku minev elektriline võimsus/ sisestatud soojusvõimsus) tagamiseks on vaja hoida turbiini vasturõhk võimalikult madal ja minimaliseerida kondensaatorist kaugküttevõrku mineva vee temperatuur. Seda saab saavutada töösükli optimeerimise ja kaugküttevõrgu kontrolliga, et hoida kaugkütte pealevoolu temperatuur oleks võimalikult madal. Selleks peaks ORC moodul olema ühendatud kaugkütte tagasivooluga ja kuuma vee ökonomisem ja kuuma vee soojusvaheti peaksid paiknema pärast ORC moodulit. Sellist meetodit kasutades saab ORC-st väljuvat kaugküttevee temperatuuri hoida aastaringselt 80 °C juures, kuigi talvel võivad vajatavad temperatuurid tõusta 90 – 95 °C .[18]

Koostan graafiku võrku mineva elektrilise võimsuse suhtes sisestatud soojusvõimsusesse erinevatel vee temperatuuridel ORC-st väljumis temperatuuridel.

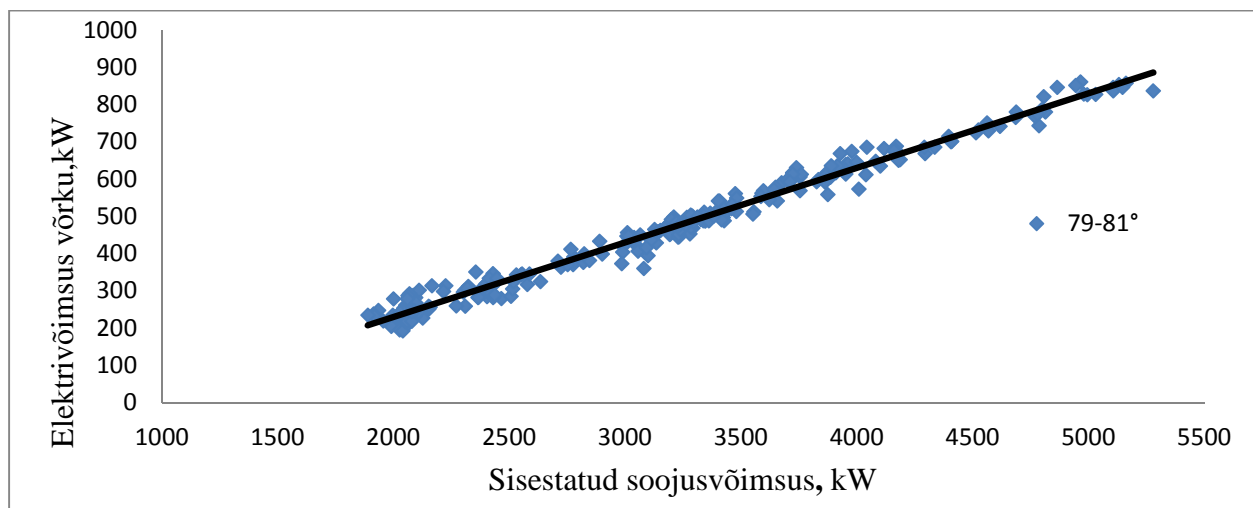
$$Q = P_s * 1,01 + P_e / \eta_{\text{gen}} \quad (2.1)$$

Kus Q on sisestatud soojusvõimsus [kW]

P_s - soojuse väljundvõimsus [kW]

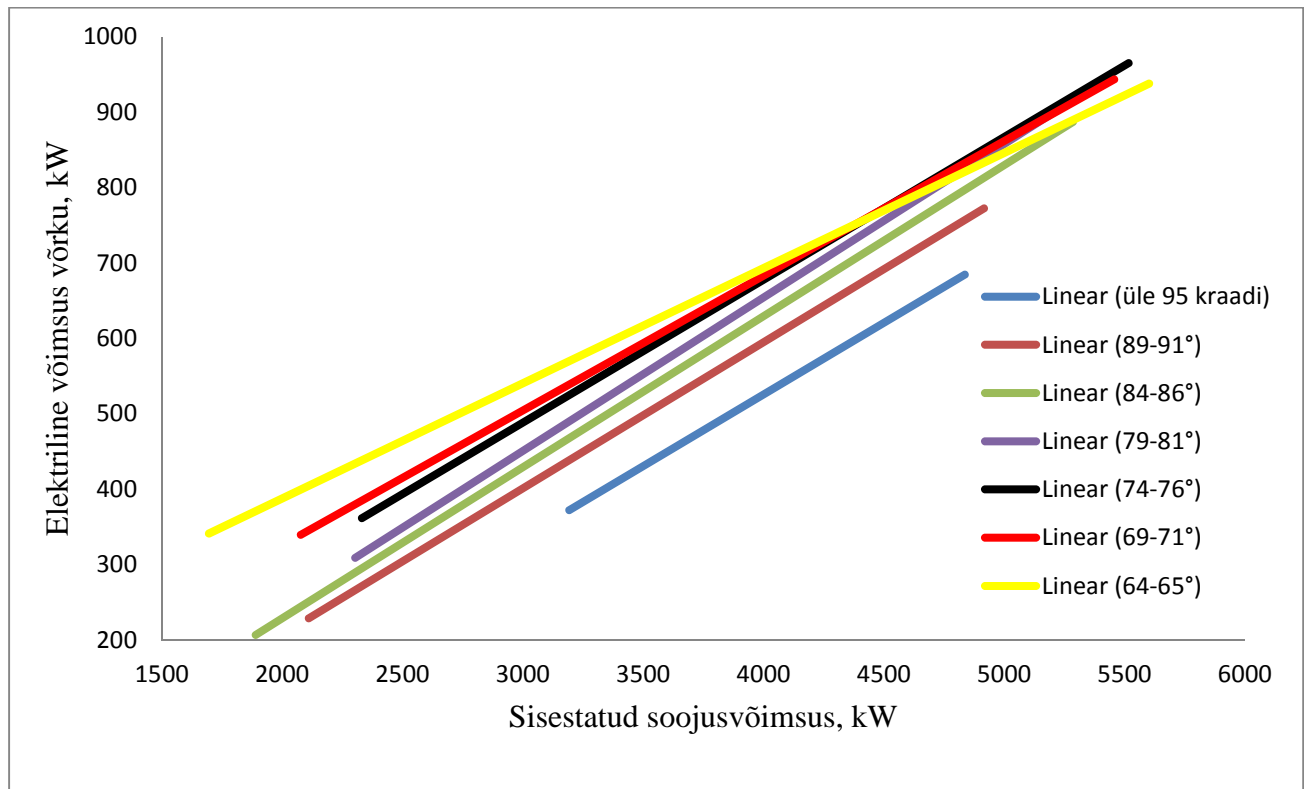
P_e –elektri väljundvõimsus [kW]

$\eta_{\text{gen}} = 96,5$ – Generaatori efektiivsus [%]



Sele 2.10 Elektrivõrku mineva võimsuse sõltuvus sisestatud soojusvõimsusest kondenseerumistemperatuuril 79 -81 ° C.

Sele 2.10 näitab, et elektrivõrku minev võimsus suureneb lineaarselt seoses sisestatud soojusvõimsuse kasvamisega. Koostan sarnased graafikud kondenseerumistemperatuuridel alates 65 °C kuni 95 °C. Temperatuuri sammuks valin 5 °C ja koostan graafiku valitud temperatuuril ∓ 1 °C. Graafiku parema loetavuse tagamiseks, leian graafikute keskmised kasutades Exceli funktsiooni „add linear trendline.“



Sele 2.11 Elektrivõrku mineva võimsuse sõltuvus sisestatud soojusvõimusest erinevatel kondenseerumistemperatuuridel.

Sele 2.11 näitab, et sarnastel sisestatud soojusvõimsustel, on elektriline võimsus suurem madalamal kondenseerumistemperatuuril. Antud katsetulemustel on sisestatud soojusvõimsustel 1500 – 4500 kW kõige efektiivsem töörežiim kondenseerumistemperatuuridel 64-65 °C. Alates sisestatud soojusvõimsusest 4500 kW, on sele 2.11 järgi efektiivseim elektritootmine kondenseerumisel temperatuuril 74-76 °C.

Koostan graafiku elektrilise efektiivsuse sõltuvusest kondenseerumistemperatuurist.

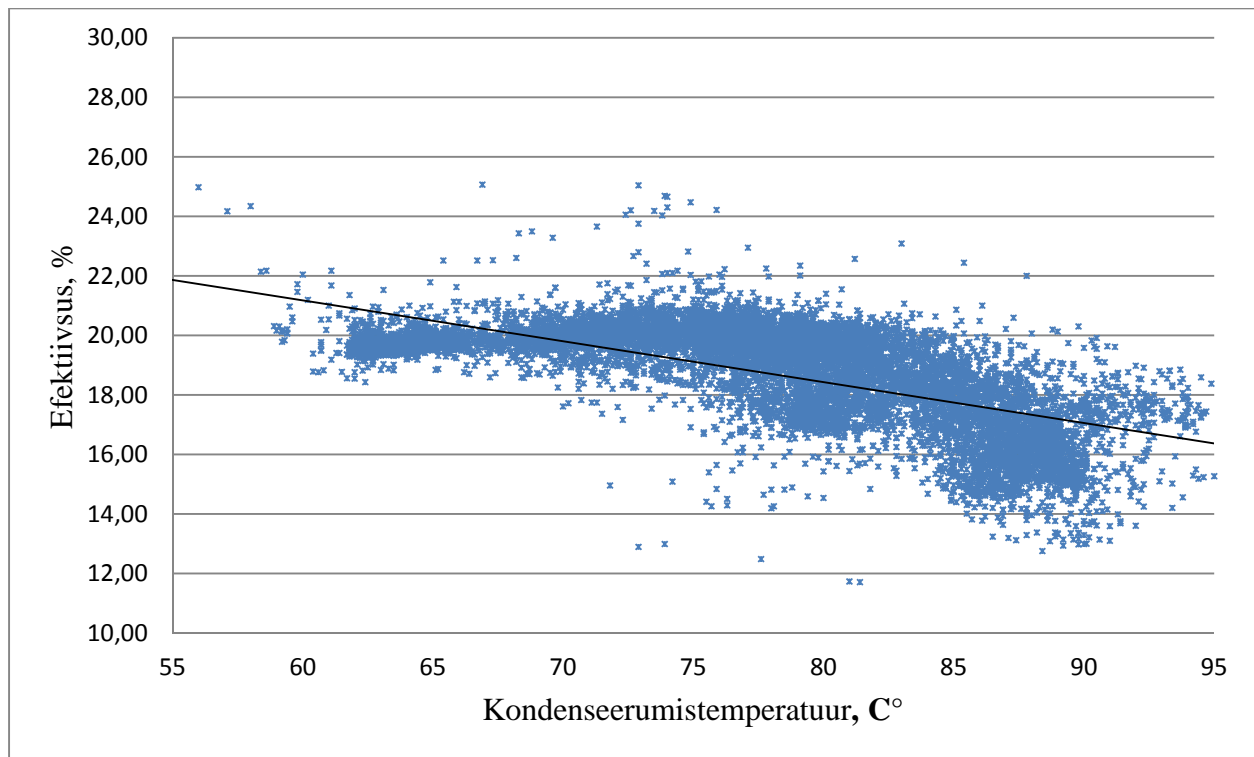
Efektiivsuse leian kasutades valemit:

$$\eta = \frac{Q}{P_e} * 100 \quad (2.2)$$

kus η - elektriline efektiivsus [%]

Q - sisestatud soojusvõimsus [kW]

P_e - Toodetud elektrivõimsus [kW]



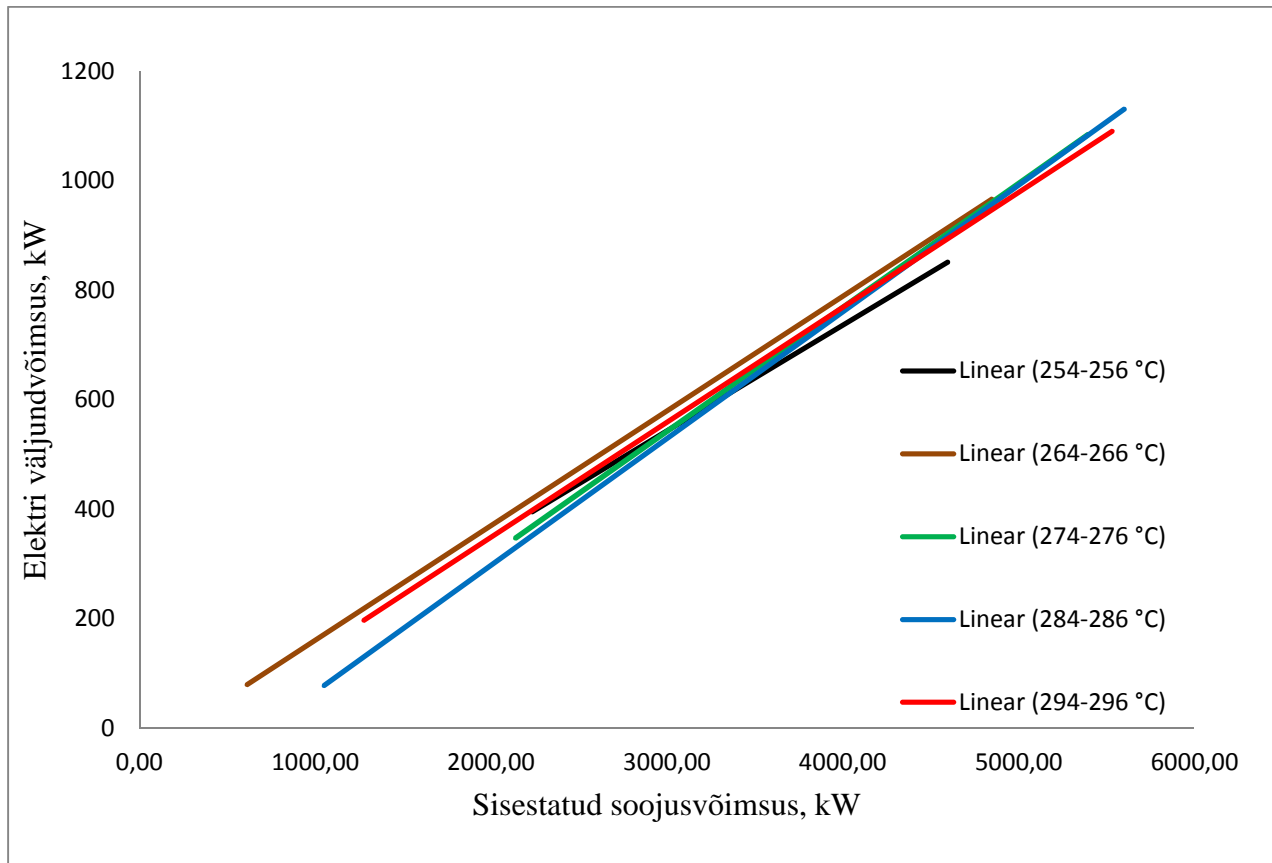
Sele 2.12 Efektiivsuse sõltuvus kondenseerumistemperatuurist.

2.3.3 Efektiivsuse sõltuvus silikoonõli aurustumistemperatuurist

Katsetel, kus töövedelikena kasutatakse tsükloheksaani, tolueeni ja dekaani selgub järgnev. Aurustumistemperatuuri mõju elektrilisele väljundvõimsusele ja efektiivsusele on järgnev: mida kõrgem temperatuur, seda kõrgem on mooduli efektiivsus. Lisaks, elektriline efektiivsus tõuseb märgatavalt regeneraatori kasutamisega. [19]

Analüüsitaval ajavahemikul on ORC-sse siseneva termaalõli temperatuur vahemikus 246,2 – 297,7 °C. Koostan graafiku valemi 2.1 abil leitud sisend soojusvõimuse suhte väljund elektrivõimsusesse. Temperatuuri sammuks valin 5 °C ja koostan graafiku valitud temperatuuril

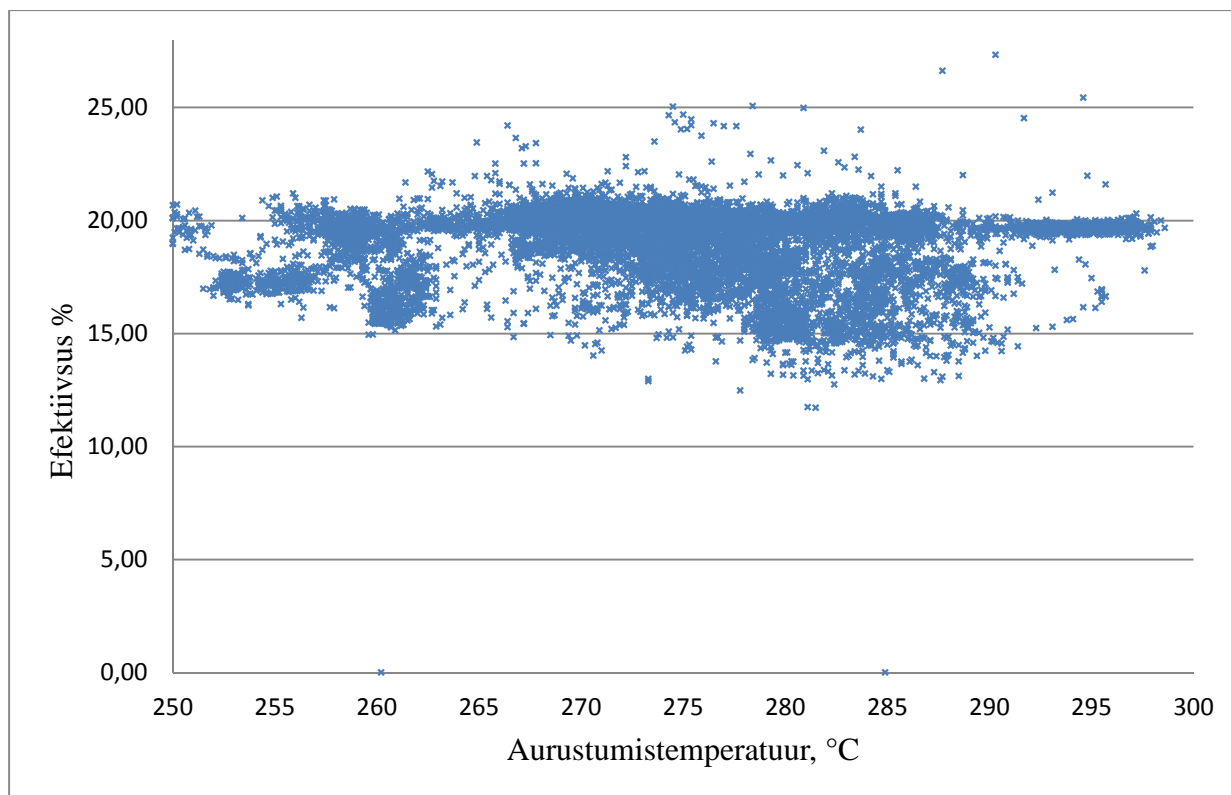
± 1 °C. Graafiku parema loetavuse tagamiseks, leian graafikute keskmised kasutades Exceli funktsiooni „add linear trendline.“



Sele 2.13 Elektrivõrku mineva võimsuse sõltuvus sisestatud soojusvõimusest erinevatel aurustumistemperatuuridel.

Analüüsitud andmete järgi saadud tulemused ei vasta alapunkti alguses esitatud teooriale. Sele 2.13 järgi on vastaval sisestatud soojusvõimsusel kõige suurem elektriline väljundvõimsus aurustumistemperatuuri vahemikus 264-266 °C.

Saadud tulemused näitavad, et aurustumistemperatuur mõjutab elektrilist efektiivsust minimaalselt (vt. Sele 2.13). Antud andmete paikapidamise kontrollimiseks tuleks sooritada katse, kus suurenda ühtlase kiiruslega termaalõlitemperatuuri ja salvestada väljundvõimsused. Töö kirjutamise ajal ei ole võimalik antud katset sooritada, kuna koostootmisjaam töötab madalal koormusel ja termaalõli temperatuuri tõstmise pole otstarbekas.

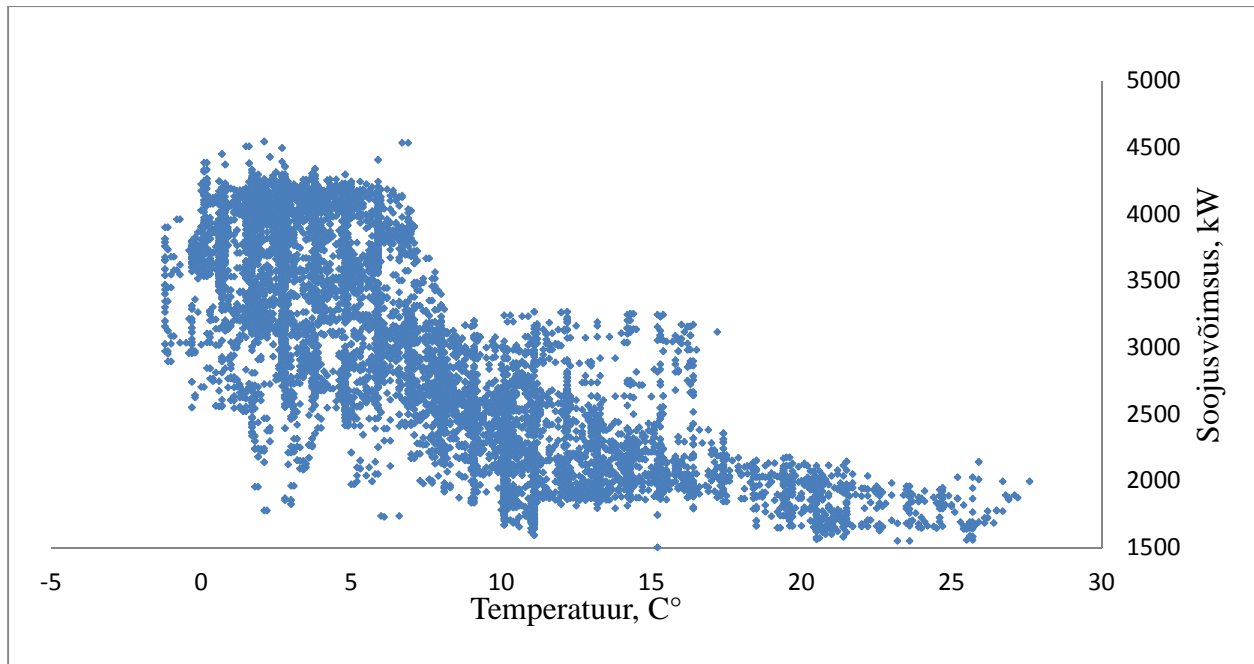


Sele 2. 14 Elektrilise efektiivsuse sõltuvus aurustumistemperatuurist.

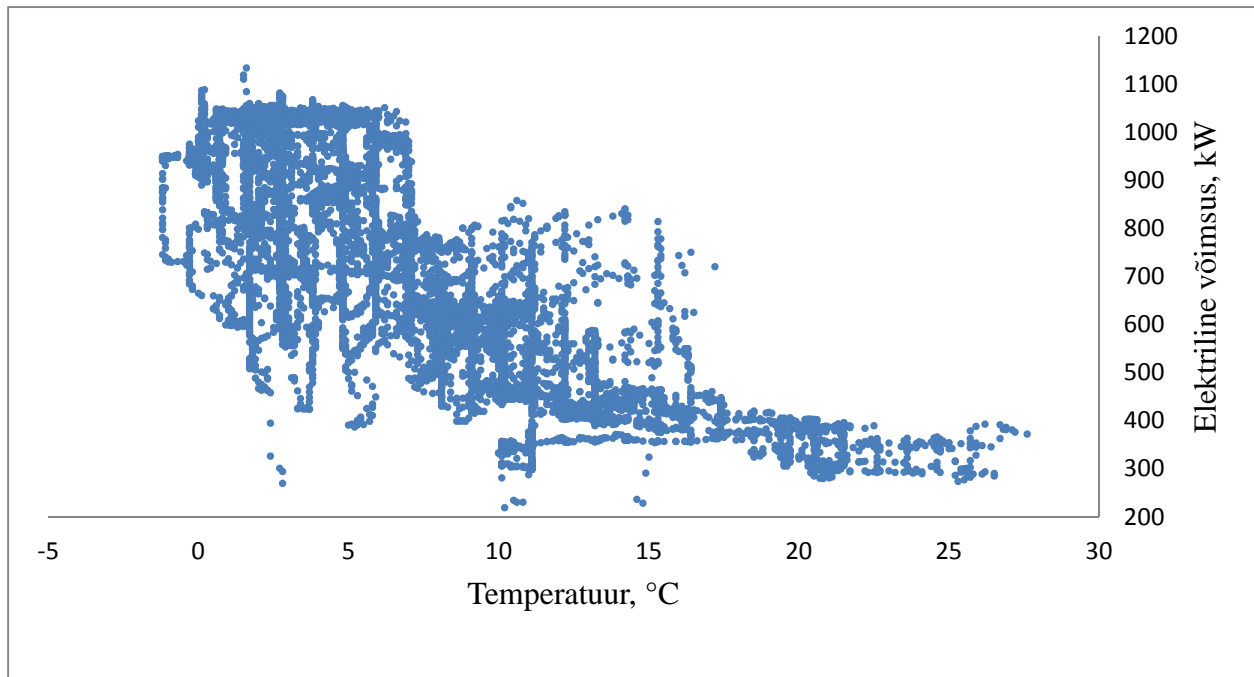
2.3.4 Tootlikuse sõltuvus välistemperatuurist

Rakvere Pääkese tn. koostootmisjaam on koostootmisrežiimis töötanud alates aprilli lõpust. Sellel ajavahemikul on olnud minimaalne välistemperatuur $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja maksimaalne temperatuur $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rakvere soojusvõrgu koormusgraafikult (Sele 2.5) on näha, et suvise soojuskoormuse katab Adven Eesti AS 2 MW soojusvõimsusega biomass katel. Töö kirjutamise ajal on antud katel remondis, seega katab Rakvere linna sooja tarbevee vajaduse Adven Eesti AS koostootmisjaam.

Välistemperatuuri tõustes väheneb soojusenergia tarbimine, siis väheneb ka koostootmisjaama koormus, sest liigse toodetud soojusenergia jahutamise võimalused on piiratud. Koostootmise protsess peab vastama Euroopa parlamendi ja nõukogu direktiivile 2004/8/EC [22]



Sele 2.15 Soojuse väljundvõimsuse sõltuvus välistemperatuurist.



Sele 2.16 Soojuse väljundvõimsuse sõltuvus välistemperatuurist.

2.3.5 Omatarve erinevatel väljundvõimsustel

Rakvere koostootmisjaama omatarve koosneb järgmistest tarbijatest [21] :

- Tsirkulatsioonipumbad
- Glükooli jahutusventilaatorid
- Ventilatsioon, valgus, elekter
- ORC moodul
- Katla ventilaatorid
- Eelkolde restide hüdraulika pumbad
- Märghaerastus konveier

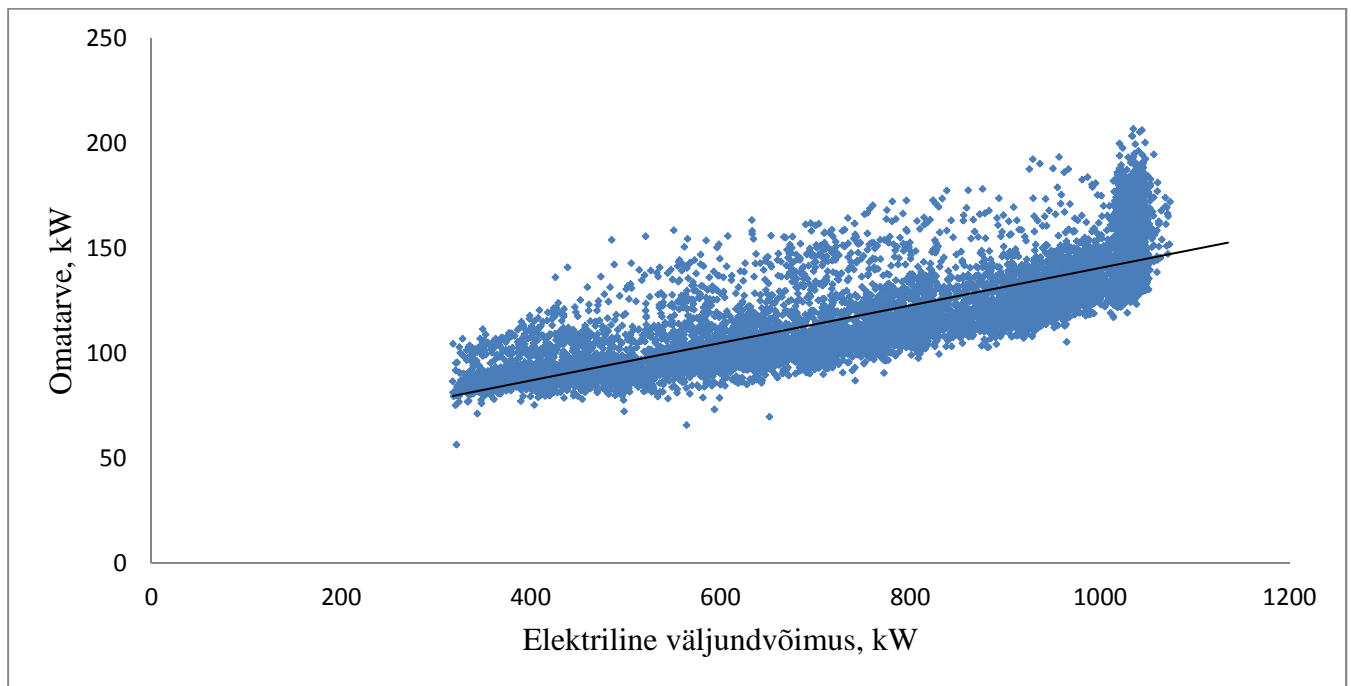
Täpset omatarbijate loetelu vaata Lisa 2 [21].

$$P_{oma} = P_e - P_{trafo} \quad (2.3)$$

Kus P_{oma} – Elektriline omatarbe võimsus [kW]

P_e – ORC mooduli elektriline väljundvõimsus [kW]

P_{trafo} – Trafost Rakvere elektrivõrku jõudev elektriline võimsus [kW]



Sele 2.17 Omatarve sõltuvus elektrilisest väljundvõimsusest

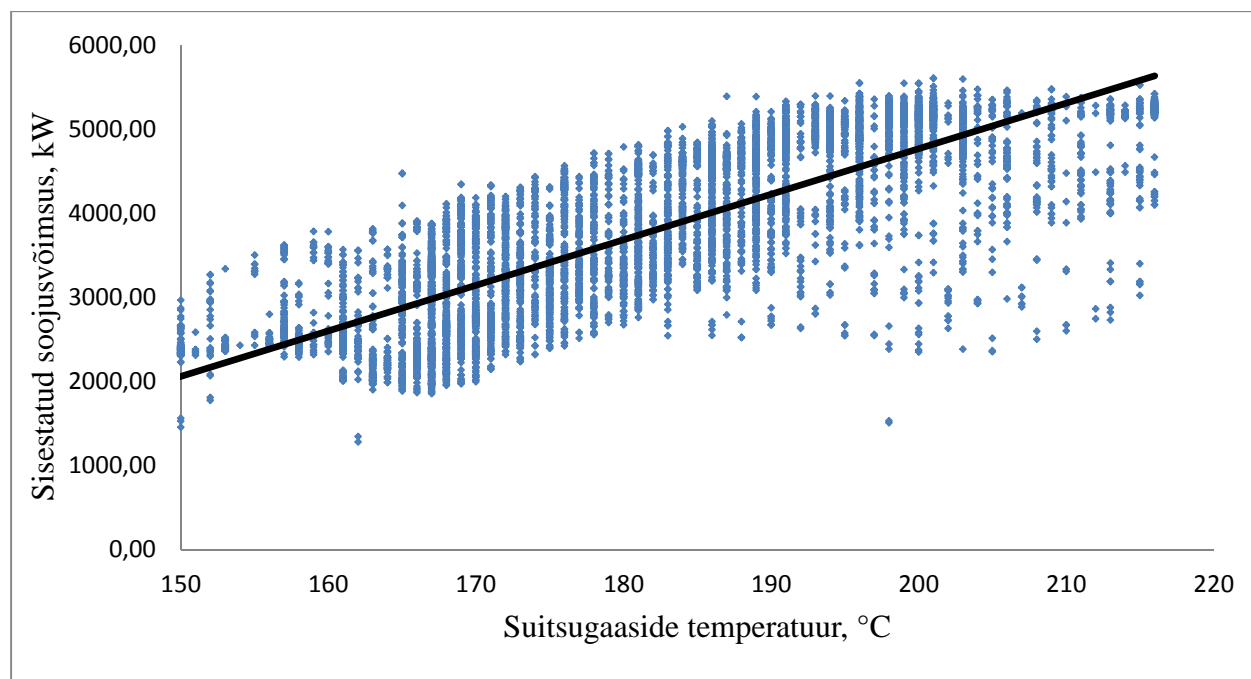
Suvel on nõutavad soojuskoormused väikesed. Koostan tabeli omatarbe suurusest erinevatel väikestel elektritootmise võimustel.

Elektriline võimsus	Keskmine omatarve
kW	kW
295 -305	86,06
320 -330	84,66
345-355	88,83
370 -380	90,28
395-405	90,77
420-430	93,87
445-455	93,86
470-480	94,89
495-505	92,20
520-530	98,14
545-555	100,17
570-580	103,85
595-605	102,96

Tabel 3. Omatarve väikestel elektrilistel võimsustel

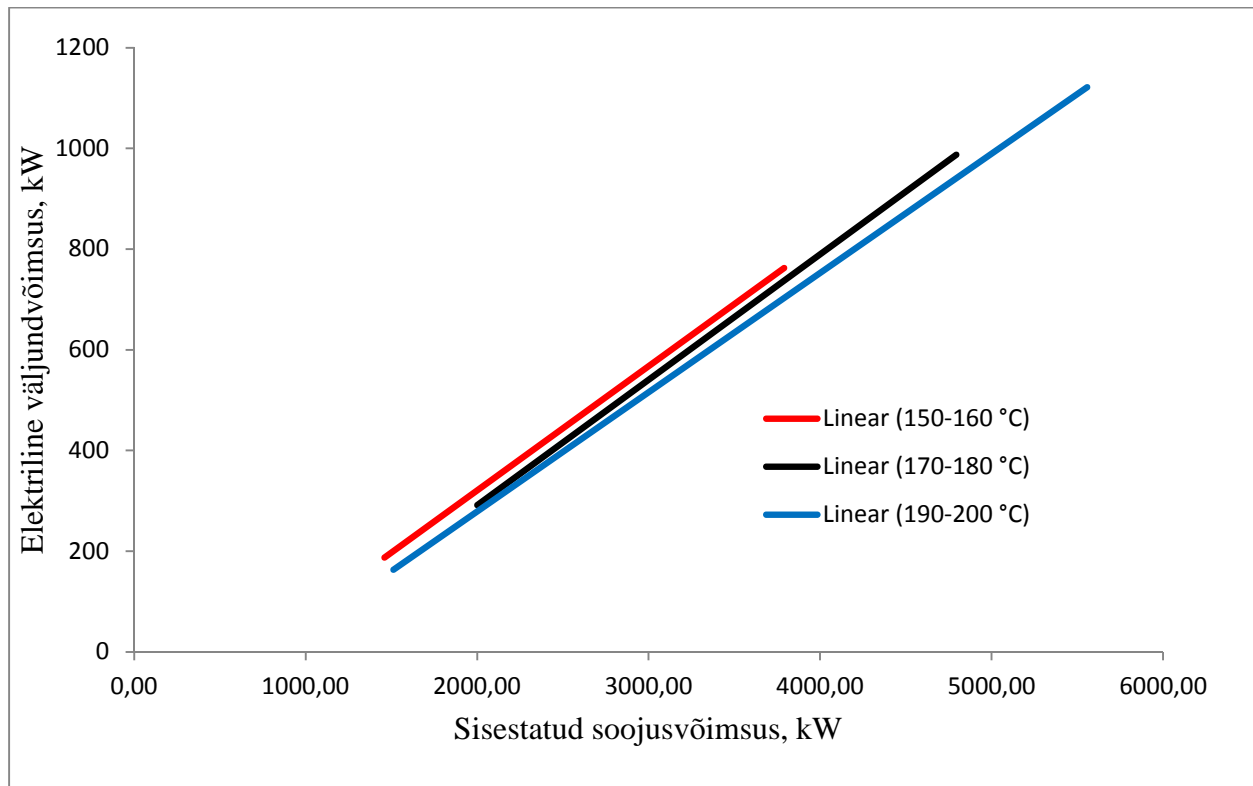
Tabelist 3. on näha, et omatarve võimsus suureneb elektrivõimsuse suurenedes. Mõnedes võimsusevahemikes on aga omatarve võrdne.

2.3.6 Efektiivsuse sõltuvus suitsugaaside temperatuurist



Sele 2.18 Sisestatud soojusvõimsuse suhe väljuvate suitsugaaside temperatuuri.

Suitsugaaside puhastamine, jahutamine ja koostis on selgitatud peatükis 2.2.4



Sele 2.19 Sisestatud soojusvõimsuse suhe elektrilisse väljundvõimsusesse erinevatel lahkvate gaaside temperatuuridel.

Sele 2.18 ja Sele 2.19 näitavad, et madalamatel koormustel on efektiivsem hoida lahkvate gaaside temperatuuri võimalikult madalal. Samas koormuse tõustes tuleb suurendada sisestatud soojusvõimsust ja sellega kaasneb lahkvate gaaside temperatuuritõus ja efektiivsuse vähenemine.

3 Kokkuvõte

Orgaanilisel Rankine tsüklil põhinevad koostootmisjaamad on väga efektiivsed kuni 2 MW_e võimsusega jaamade korral, mis kasutavad kütusena madala kütteväärtusega kütust, näiteks nagu biomass, geotermaalenergia, päikeseenergia ja tööstuse heitsoojus. Peamised eelised vett soojuskandjana kasutavate jaamade ees on : suur efektiivsus väikestel võimustel, väikesed pinged ja korrosiooni puudumine turbiinis ja madalad hoolduskulud.

Rakvere Päikese tn. koostootmisjaam koosneb biomassi eelkoldest, termaalõli katlast ja Turboden 10 CHP moodulist. Elektriline väljundvõimsus on ligikaudu 1 MW ja soojuslik väljundvõimsus ligikaudu 4 MW.

Töotsükli analüüsid selgus, et parim viis koostootmisjaama võimalikult kõrge efektiivsusega töotsükli tagamiseks on võimalikult väikese kondenseerumistemperatuuri tagamine. Kaugkütte trassi mineva vee temperatuur tuleb hoida sõltuvalt välistemperatuurist ja tarbimiskoormusest võimalikult madal. Teooria kohaselt peaks kõrgem termaalõlitemperatuur aurustis tagama kõrgema koostootmise efektiivsuse. Antud andmeid analüüsid aga autor selliste tulemusteni ei jõudnud. Põhjused võivad olla liiga lühike analüüsitava periood või liigselt varieeruvad koormused. Antud küsimuses peab tegema lisauuringuid. Analüüsi käigus selgus, et jaama omatarve kasvab seoses väljundvõimsuste kasvamisega. Suvistel madalatel väljundkoormustel on mõnede väljundkoormuste omatarbe võimsused saranased ja esitatud antud töös tabelina. Saranaste omatarvetega väljundkoormustel on otstarbekas valida kõrgem väljundvõimsus. Lisaks mõjutab jaama efektiivsust lahkuvate gaaside temperatuur. Madalamatel koormustel on efektiivsem hoida lahkuvate gaaside temperatuuri võimalikult väikesena. Samas koormuse tõustes tuleb suurendada sisestatut soojusvõimsust ja sellega kaasneb lahkuvate gaaside temperatuuritõus ja efektiivsuse vähenemine.

Autor sai antud tööd tehes hea ülevaate erinevatest ORC tehnoloogia rakendustest. Analüüsi tulemused kinnitavad aluseks võetud teooriate paikapidavust. Paremate analüüsi tulemuste saamise takistuseks oli liiga lühike analüüsitava periood, kuna kõrge välisõhutemperatuuri tõttu langes Rakvere linna tarbimiskoormus järsult. Antud töö tulemusi võetakse arvesse

koostootmisjaama edasisel käitamisel. Suvisel koorumusel alandati kaugkütte trassi mineva vee temperatuuri.

Autor soovib antud teemat arendada edasi magistrantuuri lõputöös. Kasutades analüüsiks pikema perioodi tulemusi ja analüüsides parameetreid nagu turbiini sisenev - ja väljuv rõhk ja erinevad soojusülekanDED aurustis ja kondensaatoris.

4 Summary

Cogeneration plants based on Organic Rankine Cycle are very effective in low power plants, what use fuels with low calorific value. For example biomass, geothermal energy, solar energy and industrial waste heat. The main advantages of the technology, compared to Rankine Cycle, are following : high efficiency in low power outputs, small stresses and the absence on corrosion in the turbine and low maintenance costs.

Rakvere cogeneration plant consists of : biomass combustor, thermal oil boiler and Turboden 10 CHP module. Electrical power output is 1 MW and thermal output is 4 MW.

The analysis of the working mode shows, that the best measure for working on high efficiencies is to keep the condensation temperature as low as possible. The district heating water must be low as possible considering ambient temperature and consumption of heat by the users. Theory says, the efficiency of the plant should be connected to the temperature of evaporation. The higher the temperature the higher the efficiency. The results of this analysis do not support that theory. The reason could be a too short testing period or the big variation of power output. This analysis shows that there is no correlation between the two parameters, further studies should be made. The captive consumption increases with the power output. A table in the study shows that on different output powers, captive consumption may have the same value. It is practical to use the higher output on similar captive consumptions. Furthermore, the temperature of flue gases exiting the chimney have an effect on the efficiency of the plant. In lower power outputs, it is more practical to keep the flue gas temperature as low as possible. When the power output increases, so does the temperature of the flue gases and the efficiency decreases.

The author got a good overview on different applications for ORC technology. The results of the analysis prove that the theories taken to considerations are true. A longer test period would have given better results, but due to high ambient temperature the consumption of decreased sharply. The results of the thesis are taken into consideration in running the cogeneration plant. The temperature of the district heating water was lowered. The author would like to develop the subject in his master's thesis and to give a more comprehensive analysis of the plant.

5 Kasutatud kirjandus

1. Jamal Nouman, Comparative studies and analyses of working fluids for Organic Rankine Cycles –ORC, KTH School of Industrial Engineering and Management, Division of Thermodynamics and Refrigeration, Stockholm, 2012
2. Roberto Bini, Marco Di Prima, Alessandro Guerico, Organic Rankine Cycle (ORC) in biomass plants : an overview on different applications, Turboden Srl, Brescia, Italy, 2010
3. Sylvain Quoilin, Vincent Lemort, Martijn Van Den Broek, Sebastian Declaye, Pierre Dewallef, Techno-Economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems, Thermodynamics Laboratory, University of Liege, Campus du Sart Tilman, B49, B-4000 Liège, Belgium, Howest—Thermodynamics Group, Graaf Karel de Goedelaan 5, 8500 Kortrijk, Belgium, Department of Flow, Heat and Combustion Mechanics, Ghent University—Ugent, Sint-Pietersnieuwstraat 41, 9000 Gent, Belgium, Renewable and Sustainable energy reviews, March 2013
4. <http://www.eng.usf.edu/~hchen4/Organic%20Rankine%20Cycle.htm>, 26.05.2014
5. <http://www.enertime.com/en/organic-rankine-cycle-machines/technology-and-principle>, 26.05.2014
6. Ignace Vankeirsbilck, Bruno Vanslambrouck, Sergei Gusev, Michel De Pape, Energetical, technical and economical considerations by choosing between a steam and an organic Rankine cycle for small scale power generation, Howest, University College of West Flanders, Kortrijk- Belgium, Department of Masters in Industrial Sciences, Gheent University, Belgium, Department of Flow, Heat and Combustion Mechanics, Delft, September 23th, 2011
7. Reza Rowshanzadeh, Performance and cost evaluation of Organic Rankine Cycle at different technologies (Master thesis), Department of Energy Technology, KTH, Sweden
8. Donna Guillen¹, Helge Klockow², Matthew Lehar³, Sebastian Freund³, Jennifer Jackson², Development of a direct evaporator for the Organic Rankine Cycle, ¹Idaho National Laboratory, Idaho Falls, USA, ²General Electric Co., One Research Circle,

- Niskayuna, NY USA ,³General Electric Co., Freisinger Landstrasse 50, Garching b. Muenchen, Germany, 2011 TMS Annual meeting, 2011
9. S. Poles, M. Venturin, Numerical Simulation of an Organic Rankine Cycle, [WWW] http://www.openeering.com/sites/default/files/Organic_Rankine_Cycle.pdf
 10. AS Tamult, Tööprojekt nr. TP-136
 11. Adven Eesti AS pildikogu
 12. Pääkese tänava koostootmisjaama biokütusekatla soojustehnilised katsetused, Tallinna Tehnikaülikool, Soojustehnika Instituut, 11.04.2014
 13. [WWW]<http://turboden.eu/en/references/references.php?country=EST&application=all&power=all>, 26.05.2014
 14. [WWW]<http://www.turboden.eu/en/public/downloads/Tabella%20Data%20CHP%20no%20SPLIT%20-%20ING%20LR.pdf>, 27.05.2014
 15. Organic Rankine Cycle Waste Heat Power Cogeneration [WWW]http://www.epa.gov/chp/documents/meeting_100511_ronzello.pdf, 05.2014
 16. Adven Eesti AS-is kasutusel oleva programmi Specview väljatrükk
 17. Priit Tiit, Adven Eesti koostootmisjaama roll Rakvere kaugküttes, Rakvere Targa Maja Teabekonverents „Targad küttelahendused energia tootmises. Milline on energia õige hind?“, 23.01.2014
 18. Ingwald Obernberger, Peter Thonhofer, Erwin Reisenhofer, Description and evaluation of the new 1000 KW_{el} Organic Rankine Cycle process integrated in the biomass CHP plant in Lienz, Austria, Euroheat & Power volume 10/2002
 19. Angelo Algieri, Pietropaolo Morrone, Energy analysis of Organic Rankine Cycle for biomass applications, Mechanics Department, University of Calabria, Italy,
 20. Donghong Wei, Xuesheng Lu, Zhen Lu, Jianming Gu, Performance analysis and optimization of organic rankine cycle for waste heat recovery, Institute of Refrigeration and Cryogenics, School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiao Tong University, 2006
 21. ITK inseneribüroo töö nr.1214 Rakvere Pääkese tn. 4 koostootmisjaam
 22. Andres Siirde, Tõhusa koostootmise viiteväärtused ja tõhusa koostootmise potentsiaal Eestis, Tallinna Tehnikaülikool, Soojustehnika Instituut, 2005

Lisad

Lisa 1. Näide analüüsitavaatest andmetest

Aeg	Katel 1 väljuv temp (°C)	ORC soojusvõimsus (kW)	ORC Elektriline võimsus
28.04.2014 0:00	285,2	2596	596
28.04.2014 0:01	283,6	2596	588,3
28.04.2014 0:02	283,6	2649	580
28.04.2014 0:03	286,8	2614	597,3
28.04.2014 0:04	286,8	2614	597,3
28.04.2014 0:05	287,1	2616	592,4
28.04.2014 0:06	287,6	2616	586,6
28.04.2014 0:07	287,6	2592	593
28.04.2014 0:08	287,2	2592	585,3
28.04.2014 0:09	287,2	2585	576,3
28.04.2014 0:10	286,5	2651	574,2
28.04.2014 0:11	286,5	2651	571,5
28.04.2014 0:12	286,5	2621	559,7
28.04.2014 0:13	286,2	2621	550,2
28.04.2014 0:14	286,2	2570	541,7
28.04.2014 0:15	286	2570	535,9
28.04.2014 0:16	286	2559	526,5
28.04.2014 0:17	286,2	2607	523,2
28.04.2014 0:18	286,2	2607	512,4

Lisa 2. Päikese tn. koostootmisjaama omatarve – tarbijate tabel [21]

Primaar pump	Glükooli jahutusventilaator 2.3	Suruõhukompressor
Primaarne tagavara pump	Glükooli jahutusventilaator 2.4	Valgus, elektrivarustus, ventilatsioon
Avariijahuti pump	Glükooli jahutusventilaator 2.5	Katlaruumi ventilatsioon 1
Äravoolu pump	Glükooli jahutusventilaator 2.6	Katlaruumi ventilatsioon 2
Öko 2 pump	Glükooli jahutusventilaator 2.7	Katlaruumi kalorifeer 1
Öko 2 tagavara pump	Glükooli jahutusventilaator 2.8	Katlaruumi kalorifeer 2
Glükoolipump	Glükooli jahutusventilaator 2.9	Katlamaja küttepump
Glükooli täitepump	Glükooli jahutusventilaator 2.10	Laopõranda küte
Glükooli jahutusventilaator 1.1	Glükooli jahutusventilaator 2.11	Boileri kütte
Glükooli jahutusventilaator 1.2	Glükooli jahutusventilaator 2.12	Katla siseringi pump
Glükooli jahutusventilaator 1.3	Puidukatla üld suitsuimeja	Pesuri pump
Glükooli jahutusventilaator 1.4	Puidukatla primaarõhu ventilator	Hüdraulika pump
Glükooli jahutusventilaator 1.5	Puidukatla sekundaarõhu ventilator	Tuha hüdraulika pump
Glükooli jahutusventilaator 1.6	Suitsu retsirkulatsiooni ventilator	Tuha hüdraulika pump
Glükooli jahutusventilaator 1.7	Söötja 1 hüdraulika pump	Tuhatigu
Glükooli jahutusventilaator 1.8	Söötja 2 hüdraulika pump	Suitsuimeja
Glükooli jahutusventilaator 1.9	Söötja 3 hüdraulika pump	Kütuse transportöör
Glükooli jahutusventilaator 1.10	Ülemise resti hüdraulika pump	Suur transportöör
Glükooli jahutusventilaator 1.11	Keskmise resti hüdraulika pump	Katla ventilaatorid
Glükooli jahutusventilaator 1.12	Alumise resti hüdraulika pump	Katla ventilaatorid
ORC ruumi ventilatsioon 1	Kütuse konveier	Katla ventilaatorid
ORC ruumi ventilatsioon 2	Kütuse tasandusrull 1	Tuhatigu
ORC ruumi ventilatsioon 3	Kütuse tasandusrull 2	Separatuur
ORC ruumi ventilatsioon 4	Laohüdraulika seade 1	Võrgupump
ORC modul supply	Laohüdraulika seade 2	Võrgupump
Power Generator	Märgtuhaäärastus konveier	Võrgupump
ORC lub.oil pump	Tuha rotaatorsiiber	Võrgupump
ORC Control	Tuhasüsteemi hüdraulika	ORC kondensaatori pump
Glükooli jahutusventilaator 2.1	Söötja tasandustigu	CC
Glükooli jahutusventilaator 2.2	2BCC	Veetrassi täitepump (trassipoolne)
kraana	kraana	Veetrassi täitepump (kondensaatori)

Lisa 3. Päikese tn. koostootmisjaama skeem [16]

