



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
MEHAANIKATEADUSKOND

Soojustehnika instituut

Soojusjõuseadmete õppetool

MSJ40LT

Sander Seeman

**KURESSAARE ORC KOOSTOOTMISJAAMA
ESIMESE AASTA TÖÖ EFEKTIIVSUSE HINNANG**
Bakalaureusetöö

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

“.....”.....201...a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

“.....”.....201...a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....”.....201... a.

..... allkiri

TTÜ soojustehnika instituut
Soojusjõuseadmete õppetool
Bakalaureusetööülesanne

2014 aasta 6. semester

Üliõpilane: Sander Seeman 113064

Õppekava MASB 02/09

Eriala Soojusenergeetika

Juhendaja: dotsent Aleksandr Hlebnikov

Konsultandid: Jaan Mehik AS Kuressaare Soojus juhatuse liige

BAKALAUREUSETÖÖ TEEMA:

(eesti keeles) Kuressaare ORC koostootmisjaama esimese aasta töö efektiivsuse hinnang
(inglise keeles) The evaluation of the work efficiency of Kuressaare ORC CHP plant in its first year

Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	AS Kuressaare Soojuses materjalide ja andmete saamise kooskõlastamine	11.03.2014
2.	Seadmete ja soojuskandjate ülevaade	15.04.2014
3.	Kasutegurite ja primaarenergia säästu arvutused	12.05.2014
4.	Lõputöö vormistamine	22.05.2014

Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid: Anda hinnang Kuressaare koostootmisjaama esimese aasta tööle.

Täiendavad märkused ja nõuded:

Töö keel: Eesti keel

Kaitsmistaotlus esitada hiljemalt

Töö esitamise tähtaeg.....

Üliõpilane Sander Seeman

/allkiri/

kuupäev.....

Juhendaja Aleksandr Hlebnikov

/allkiri/

kuupäev.....

Konfidentsiaalsusnõuded ja muud ettevõttepoolsed tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA.....	6
SISSEJUHATUS.....	7
1. ÜLEVAADE KURESSAARE KOOSTOOTMISJAAMAST.....	8
2. KÜTUSE ETTEANNE	10
3. HÜDRAULILISE RESTIGA PÕLEMISÜSTEEM	12
3.1 Süsteemikirjeldus	12
3.2 Põlemisseadme kontrollsüsteem	13
3.2.1 Alarõhu kontrollsüsteem	13
3.2.2 Kolde temperatuuri kontrollimine.....	13
3.2.3 Hapniku kontrollsüsteem.....	14
3.2.4 Võimsuse kontrollsüsteem	14
3.2.5 Hüdraulilised restid	15
4. TERMOÕLIKATEL	16
5. SUITSUGAASIDE JAHUTUS- JA PUHASTUSSEADMED.....	17
5.1 Ökonomaiser	17
5.2 Multitsüklon	18
5.3 Õhuelsoojendi.....	19
5.4 Suitsugaasi kondensaator	20
6. KASUTATAVAD SOOJUSKANDJAD	21
6.1 Termaalõli	21
6.2 Silikoonõli	22
6.3 Soojuskandjate suletud ringlused	25
7. TURBIIN.....	27
8. KASUTEGURID	28
8.1 Koostootmisjaama elektriline ja soojuslik kasutegur.....	28
8.2 Orgaanilise rankine'i ringprotsessi kasutegurid	29
8.3 Kasutegurid osalise koormusega töötamisel	31
8.4 Turbiini elektrilise kasuteguri ja võimsuse tõstmine.....	32
9. ORC EELISED JA PUUDUSED.....	34
10. KURESSAARE KOOSTOOTMISJAAMA PRIMAARENERGIA SÄÄST	35
KOKKUVÕTE.....	37

SUMMARY	38
KASUTATUD KIRJANDUS	39
LISAD	42
Lisa 1. Koostootmisjaama juhtimise arvutist tehtud ekraanipilt katla poolest.....	42
Lisa 2. Koostootmisjaama juhtimise arvutist tehtud ekraanipilt turbiini poolest.....	43

Tabelite loetelu

Tabel 1.1. Ülevaade koostootmisjaamast	8
Tabel 6.1. Termaalõli omadused	21
Tabel 6.2. Orgaanilise vedeliku soovitatavad omadused	23
Tabel 6.3. Silikoonõli omadused.....	24
Tabel 7.1. Sõlmede ja turbiini ülevaade	27
Tabel 8.1. Jaama esimese kümne kuu toodangud ja kasutegurid	28
Tabel 8.2. Toodangud ja kasutegurid jaanuaris 2014.....	30
Tabel 8.3. Toodangud ja kasutegurid osalisel koormusel	32
Tabel 10.1. Koostootmisjaama primaarenergia sääst.....	35

Selede loetelu

Sele 1.1. Kuressaare soojuse tootmise jaotumine	9
Sele 1.2. Soojuskoormuse kestvusgraafik	9
Sele 2.1. Söötismehhanism	10
Sele 2.2. Kütusesöötur.....	11
Sele 5.1. Ökonomaiser	17
Sele 5.2. Multitsüklon.....	18
Sele 5.3. Õhuelsoojendi.....	19
Sele 6.1. Märja vedeliku küllastuskõver	22
Sele 6.2. Isoentroopse vedeliku küllastuskõver	22
Sele 6.3. Kuiva vedeliku küllastuskõver	23
Sele 6.4. Silikoonõli ringlus ja T-s diagramm.....	25
Sele 6.5. Termaalõli ringlus parameetritega.....	26
Sele 8.1. Kütusega sisseantava energia jaotus.....	28
Sele 8.2. Esimese kümne kuu toodangud ja kasutegurid	29
Sele 8.3. Soojuse jagunemine ORC protsessis.....	30
Sele 8.4. Toodangud ja kasutegurid jaanuaris.....	31

EESSÕNA

Käesoleva lõputöö teema kujunes välja autori isiklikust huvist Kuressaares kasutatava tehnoloogia vastu, mis on Eestis esimene koostootmisjaam, kus on kasutusel orgaanilise rankine'i ringprotsess.

Autor soovib siinkohal tänada Kuressaare Soojuse juhatuse liiget Jaan Mehikut, kes aitas töö kirjutajat Kuressaare koostootmisjaama töö põhimõtete selgeks tegemisel ning jagas lahkesti vajalikke andmeid. Lisaks oli suureks abiks juhendaja Aleksandr Hlebnikovi poolt antud soovitused töö struktuuri ülesehitamiseks.

SISSEJUHATUS

Bakalaureusetöö eesmärgiks oli anda ülevaade Kuressaare koostootmisjaamast ja seal kasutatavast orgaanilise rankine'i ringprotsessi (ORC) tehnoloogiast, mis tähendab, et soojuskandjatena kasutatakse kõrgmolekulaarseid orgaanilisi vedelikke (termaalõli ja silikoonõli). ORC tehnoloogial on mitmeid eeliseid, millest olulisemad on järgmised: puudub vee keemiline ettevalmistus ja lai koormuste diapason.

Kõik lõputöös esinevad viitamata seled ja arvutuste algandmeid sisaldavad tabelid ning paljude seadmete, samuti soojuskandjate, tehniline dokumentatsioon on pärit AS Kuressaare Soojusest. Palju on kasutatud Tallinna Tehnikaülikooli Raamatukogu andmebaasidest leitud teadusartikleid ning turbiini tarnija Turbodeni kodulehel olevat informatsiooni.

Töö esimeses pooles antakse ülevaade Kuressaare koostootmisjaamast, kus on välja toodud olulised andmed ja Kuressaare linna soojuse tootmist ja tarbimist iseloomustavad seled. Edasi antakse ülevaade kasutatavatest seadmetest (peatükid 2-5), alustades kütuse etteandest ja lõpetades suitsugaaside kondensaatoriga.

Töö teise poole alguses, alates peatükist kuus, antakse ülevaade soojuskandjatest ning tuuakse välja nende olulisemad parameetrid. Jaama töö seisukohast on kõige olulisem turbiinis tööd tegeva vedeliku valimine ning seepärast on põhjalikumalt käsitletud orgaaniliste vedelike erinevust traditsioonilisest soojuskandjast veest.

Edasi leitakse koostootmisjaama ja ORC protsessi soojuslikud ning elektrilised kasutegurid nii nominaalkoormusel, kui ka osakoormusel töötamisel ning võrreldakse neid ettenähtud väärtustega. Lõpetuseks arvutatakse Kuressaare koostootmisjaama primaarenergia sääst, mis koos koostootmisjaama üldkasuteguriga näitab, kas antud koostootmine kvalifitseerub tõhusa koostootmise alla või mitte.

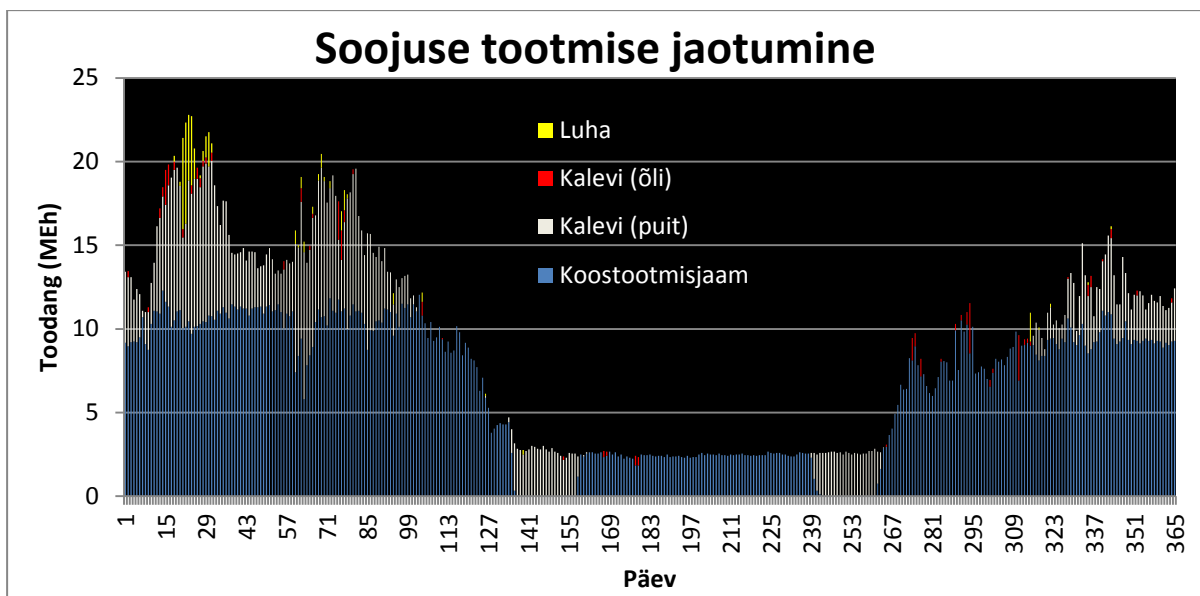
Viimase kahekümne aasta jooksul on see tehnoloogia väga palju arenenud ja selle tulemusena on maailmas ehitatud juba sadu jaamu. 2013. aastal valminud Kuressaare soojuse ja elektri koostootmisjaam on Eestis esimene, mis sellel põhimõttel töötab ning see oligi suureks põhjuseks teema valimisel. Aastase töötamisperioodi jooksul on Kuressaare jaam andnud palju tagasidet uue tehnoloogia kohta, näidates selle positiivseid ja negatiivseid külgi ning selle sobivusest väikese soojuskoormusega piirkonda.

1. ÜLEVAADE KURESSAARE KOOSTOOTMISJAAMAST

Kuressaare koostootmisjaama ehitusega alustati 2011. aasta oktoobris ning esimene elekter toodeti võrku 15. novembril aastal 2012. Jaama ehitustööd lõpetati 2013. aasta märtsis ning jaam avati pidulikult 26 aprill 2013. Tabelis 1.1 on sulgudes välja toodud esimese aasta (03.2013-03.2014) tegelikud toodangud.

Tabel 1.1. Ülevaade koostootmisjaamast

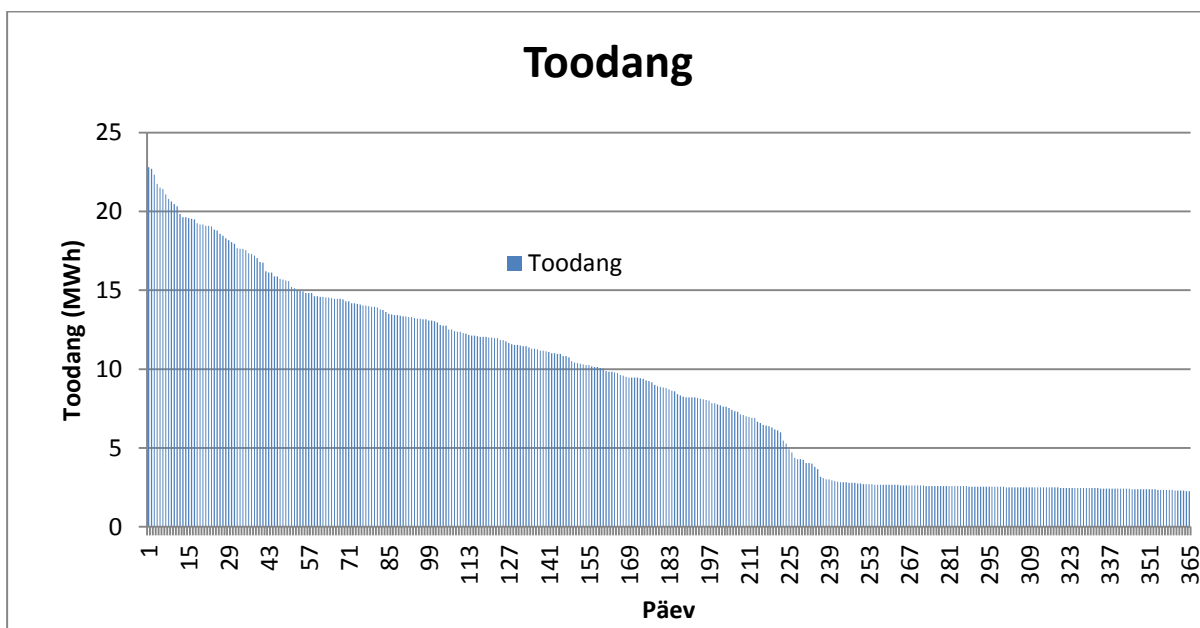
Ülevaade	
• Elektriline võimsus	2,4 MW
• Soojuslik võimsus	9,6 MW
• Kütused	Puiduhake
• Kütusetarvidus aastas	120 000 m ³
• Planeeritud elektritoodang aastas	12 000 MWh (11 935 MWh)
• Planeeritud soojuse toodang aastas	58 000 MWh (57 956 MWh)
• Planeeritud elektrimüük aastas	9600 MWh (9403 MWh)
• Kasutegur (ilma pesurita)	85 %
Põhiseadmed	
Tarnijad ja tööde teostajad	
• Kütuse etteanne	Polytechnik
• Restkoldega biomassi põletusseade	Polytechnik
• Termoõlikatel	Polytechnik
• Ökonomaiser	Maxxtec
• Multitsüklon	Polytechnik
• Õhuelsoojendi	Polytechnik
• Skraber	Condens Heat Recovery Oy
• Turbiin	Turboden
• Generaator	ABB
• Üldehitustööd	AS Tesman
• Elektritööd	Napal AS



Sele 1.1. Kuressaare soojuse tootmise jaotumine

Antud sele 1.1 on koostatud märtsist 2013 kuni veebruarini 2014, mis tähendab, et seel päevad 60 kuni 365 on aasta 2013 ja päevad 1 kuni 59 on aasta 2014. Samal perioodil (märts 2013 kuni veebruar 2014) on koostatud ka soojuskoormuse kestvusgraafik (sele 1.2).

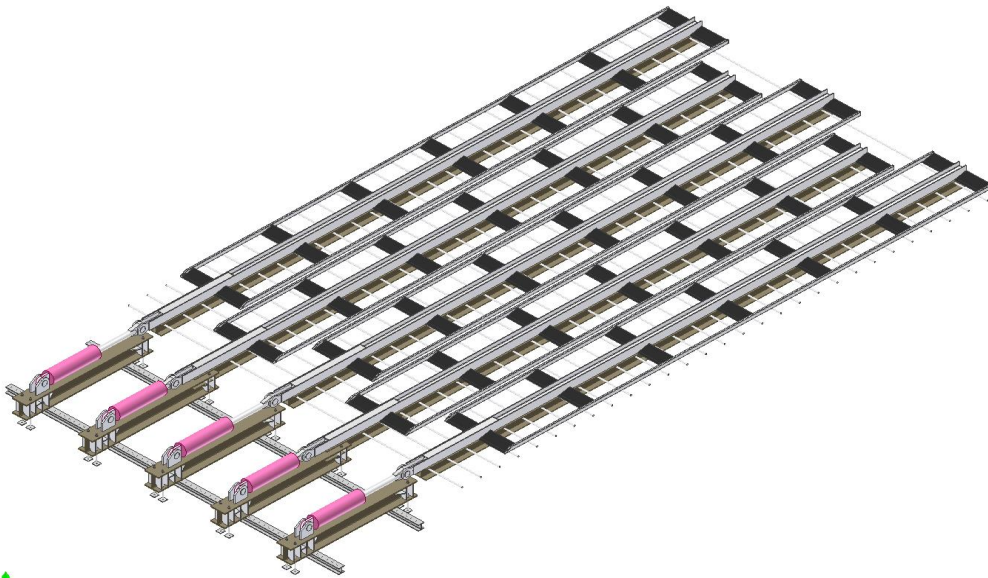
Kuressaare Soojusele kuulub kaks katlamaja – Kalevi katlamaja ja Luha katlamaja. Kalevi katlamajas on neli veesoojenduskatelt koguvõimsusega 29 MW, millest kahe kütuseks on hakkpuit ning kahel põlevkiviõli. Luha katlamajas on kaks veesoojenduskatelt koguvõimsusega 16 MW ja mõlema kütuseks on põlevkiviõli ning need käivitatakse, kui välisõhu temperatuur langeb alla miinus viie kraadi [1].



Sele 1.2. Soojuskoormuse kestvusgraafik

2. KÜTUSE ETTEANNE

Kütuseks kasutatava puiduhakke hoiustamiseks on ehitatud biomassi ladu, mille maht on umbes 1000 m³. See kujutab endast esiküljelt avatud ja neljaks eraldatud sektsiooniks jagatud varjualust, mille põrandas paikneb biokütuse sөөtmismehhanism, ning varjualuse taga paiknevat konveieriruumi, mis on ühekorruseline põrandakanaliga ruum, milles paiknevad sөөtmismehhanismi silindrid ja põrandakanalis asuva biomassi katlaruumi transportiv konveier [2].



Sele 2.1. Sөөtmismehhanism [3]

Edasi liigub kütus kraaptransportööri abil katlaruumis paiknevasse kütusepunkrisse.

Transportööril transporditavale materjalile on esitatud järgmised nõuded: [4]

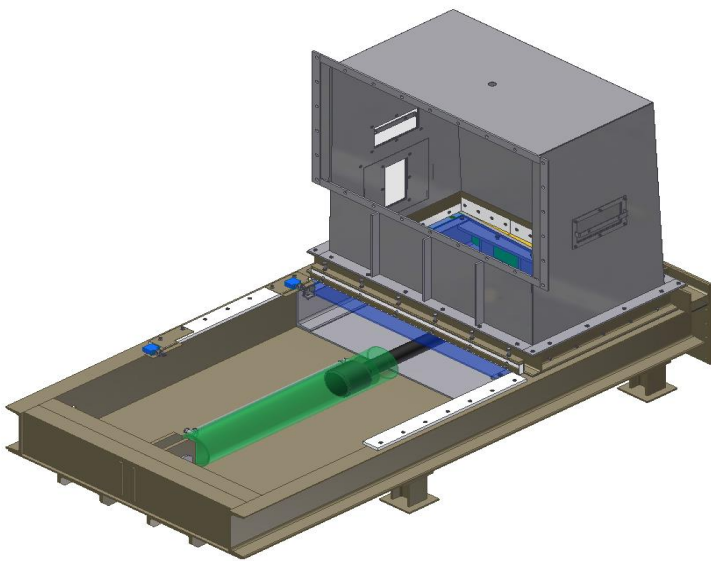
- 1) Tihedus: 0,4 t/m³ ehk 400 kg/m³
- 2) Tüki suurus: 1 – 100 mm
- 3) Materjali niiskus: 25 – 65 %
- 4) Ümbritseva keskkonna temperatuur: -15 – +35 °C
- 5) Materjali temperatuur: 0 – 30 °C

Transportööri iseloomustavad suurused: [4]

- 1) Võimsus: 15,0 kW

- 2) Kiirus: 0,32 m/s
- 3) Maht voolamine: 68,58 m³/h
- 4) Mass voolamine: 27,43 t/h ehk 27430 kg/h

Punkrisse kogunenud materjal suunatakse vastava sööturiga katlasse. Seda liigutab edasi ja tagasi hüdrauliline silinder [5]. Saab seadistada ajad, millise ajaintervalliga peab etteandeseade toimetama materjali põlemissüsteemi, olenevalt nõutavast võimsusest. Mida rohkem võimsust on vaja, seda lühem peab olema töötamispaus ja vastupidi [6].



Sele 2.2. Kütusesöötur [5]

3. HÜDRAULILISE RESTIGA PÕLEMISÜSTEEM

3.1 Süsteemikirjeldus

Põlevmaterjal jagatakse koldes kolme liikuva hüdraulilise resti vahel ära ja liigutatakse seda edasi, et võimaldada optimaalne põlemise kulg. Restid liiguvad hüdraulilisel jõul. Põlevmaterjali põlemine põlemissüsteemis toimub reguleeritud primaar- ja sekundaarõhuvarustuse tingimustes. Kolde ehituse abil saavutatakse see, et kuum gaas püsib pikka aega põlemiskambris. Põhiliste ventilaatorite pöörlemiskiirust reguleeritakse sagedusmuundurite abil [6].

Põlemiskamber on kaetud erinevate tulekindlate materjalidega, mille alla on paigaldatud mitmekihiline isolatsioon, et põlemiskamber oleks soojuslikult isoleeritud vähendamaks soojuskadusid. Resti võib jagada kolmeks tsooniks [7]:

- 1) Värske kütus soojeneb, sellest eralduvad niiskus ja lendosised
- 2) Põhiline põlemise tsoon, kus toimub kütuses oleva süsiniku põlemine
- 3) Tekkinud tuha suunamine vastavasse šahti [7]

Põlemiskamber on ehitatud nii, et gaasidel oleks võimalikult pikk põlemise teekond enne termoõlikatlasse jõudmist. Selleks, et seda tehes hoida kokku ka ruumi, on ehitatud üksteise kohal paiknevad mitmekorruselised võlvid. See pikendab suitsugaasides olevate kahjulike ühendite väljapõlemise aega ja vähendab emissioonide ohtlikust. Võlvid on vooderdatud tulekindlatest tellistest [7].

Tuhk, mis jääb restide peale lükatakse vastavasse šahti. Restide alla kogunev tuhk lükatakse tuhašahitudesse ja nende tühjendamine toimub tuhasiibri avamise teel ning tuhk kukub tuhakonveierile. Tekkinud tuhk transporditakse tuhakonveieri ja tigukonveieri abil vastavasse konteinerisse. Põlemisseadmes tekkinud energia juhitakse edasi termoõlikatla [6].

3.2 Põlemisseadme kontrollsüsteem

3.2.1 Alarõhu kontrollsüsteem

Reguleeritava pöörlemiskiirusega suitsugaasiventilaator tagab, et põlemissüsteemist väljutatakse alati suurem hulk suitsugaasi kui sinna sisse suunatakse põlemisõhku. Selleks, et suitsugaas põlemissüsteemist välja ei pääseks, on seal vaja tagada pidev alarõhk (rõhk põlemissüsteemis on madalam kui katlamajas). Kuna biomassi põlemise käigus muutuvad rõhutingimused süsteemis pidevalt, kohandub suitsugaasiventilaatori pöörlemiskiirus jooksvalt vastavalt käesoleval hetkel valitsevatele tingimustele. Mõõtmist teostatakse diferentsiaalrõhu mõõteriista abil. Mõõteriistal on õhurõhu mõõtmiseks kaks ühenduskohta. Ühte ühenduskohta kasutatakse põlemissüsteemi jaoks ja teist katlamaja õhurõhu mõõtmiseks. Diferentsiaalrõhu mõõteriist teisendab saadud tulemuse (see on mõõdetud vahe kahe mõõtetulemuse vahel) normeeritud voolusignaalsiks (mA). Vastav tarkvara töötleb seda signaali ja juhib suitsugaasiventilaatori sagedusmuundurit vastavalt sellele [6].

3.2.2 Kolde temperatuuri kontrollimine

See koosneb järgmistest komponentidest: [6]

- a) 5 temperatuuriandurit (Ni-Cr-Ni termoelemendiga, mis võimaldab mõõta temperatuuri vahemikus 0 – 1200 °C
- b) Montaažiadapter (metallist liigend temperatuurianduri kinnitamiseks põlemiskorpusele)
- c) Põlemiskorpuse ühendus (5/4-tolline välise keermega toru, keevitatud põlemissüsteemi metallkonstruktsioonile)
- d) Kompensatsioonitoru Ni-Cr-Ni (temperatuurianduri ühendamiseks mõõtemuunduriga, mis paikneb klemmikarbis)
- e) Mõõtemuundur mV-pinge normeeritud voolusignaalsiks (4-20mA) muundamiseks
- f) Signaali hindamissüsteem SPSis (SPS/PLC – programmable logic controller)

Liiga kõrge kolde temperatuuri tulemus on järgmine:

- 1) Lüheneb šamotikihi eluiga
- 2) Räbu teke šamotikihile
- 3) Termiliste lämmastikoksiidide (Nox) suurenenud teke

Liiga madala kolde temperatuuri tulemus on järgmine: [6]

- 1) Šamoti pealispinnale ladestuvad ärapõlemata (kondensaat, tõrv jne)
- 2) Põlemine on mittetäielik, sest šamotikihi kiirguse mõju on liiga väike ja seetõttu tekib vingugaas (CO)

3.2.3 Hapniku kontrollsüsteem

Kontrollsüsteemi eesmärk on põlemisprotsessi suunata ainult nii palju värsket õhku (sekundaarõhku), kui on vajalik optimaalseks põlemiseks. Tavaliselt on hapniku sisaldus suitsugaasis umbes 6 protsenti, kuid see oleneb kütuse kvaliteedist ja koostisest. Kui hapniku sisaldus heitgaasides on liiga madal, moodustub palju vingugaasi (CO) ja seetõttu ei toimu täielikku põlemist. Kui hapniku sisaldus põlemisgaasides on liiga suur, saab põlemissüsteem liiga palju värsket õhku. Selle tulemuseks on katelseadme jõudluse vähenemine ja suitsugaasi ventilaatori pöörlemiskiirus osutub mittevajalikult kõrgeks [6].

Hapniku mõõtmine suitsugaasis toimub hapnikumõõtesondiga, mis paigaldatakse suitsugaasitorusse. Sondi sees on keemiline kamber ja seda soojendatakse elektriliselt (ca 600 °C). See mõõdab jääkhapnikusisaldust suitsugaasis ja annab hapniku moodulile väikest pingesignaali. Hapnikumoodulis genereeritakse normeeritud voolusignaali (4...20 mA), mis saadetakse edasi juhtimissüsteemile (SPS). Juhtimissüsteemis hinnatakse signaali ja reguleeritakse hapnikuväärtusele vastavalt sekundaarõhu ventilaatori pöörlemiskiirust ning sekundaarõhuklapi asendit [6].

3.2.4 Võimsuse kontrollsüsteem

Võimsuse kontrollsüsteemi moodustab PID-regulaator, millele edastatakse termoõlikatla pealevoolutemperatuur mõõteväärtusena ning soovitud pealevoolutemperatuur ettenähtud väärtusena. Mida suurem on seadistusväärtus, seda rohkem võimsust nõuab see katlalt [6].

Kui termaalõli pealevoolutemperatuur tõuseb, siis: [6]

- a) Langetatakse primaarõhu ventilaatori pöörlemiskiirust
- b) Langetatakse etteandeseadme töötamis-/pausiaja suhet
- c) Langetatakse hüdrauliliste restide töötamis-/pausiaja suhet
- d) Langetatakse primaarõhuklappide asendit

Kui termaalõli pealevoolutemperatuur langeb, siis: [6]

- a) Tõstetakse primaarõhu ventilaatori pöörlemiskiirust
- b) Tõstetakse etteandeseadme töötamis-/pausiaja suhet
- c) Tõstetakse hüdrauliliste restide töötamis-/pausiaja suhet
- d) Tõstetakse primaarõhuklappide asendit

3.2.5 Hüdraulilised restid

Hüdrauliliste restide juhtimine toimub vastavalt võimsusele ja see sõltub ka põlemissüsteemis paiknevatest fotosilmadest. Võimsuse kontrollsüsteemi seadistusväärtus edastatakse hüdrauliliste restide tarkvaramoodulile. Selles moodulis arvutatakse restide vajalik töötamispaus süsteemihälbe ja kahe seadistatava ettenähtud väärtuse (minimaalne ja maksimaalne töötamispaus) alusel. Mida rohkem võimsust on vaja, seda lühem peab olema töötamispaus ja vastupidi. Sisseehitatud fotosilmad peavad reageerima ainult põlevmaterjali kihi paksuse maksimumpiirile. Minimaalsed ja maksimaalsed piirväärtused on seadistatud nii, et põlevmaterjal jaotuks resti peale ühtlaselt. Resti lõpuosas peab silmas pidama, et tuhaarastuspunkrisse ei satuks hõõguvaid osakesi ega põlevmaterjali. Kui põlemissüsteemis on liiga palju materjali, blokeerib fotosilm vastava resti, et põlevat materjali ei kantaks edasi tuhaarastuspunkrisse [6].

Kasutusel on restide jahutussüsteem, mille ülesandeks on jahutada hüdraulilisi reste ning seeläbi pikendada nende eluiga ja ennetada ülekuumenemist. Reste jahutatakse neid läbiva veega ning jahutussüsteemi siseneb umbes 70 kraadine vesi ja süsteemist väljub umbes 76 kraadine vesi. Tekkinud soojus antakse soojusvahetis üle kaugkütteele [8].

4. TERMOÕLIKATEL

Termoõlikatel koos ökonomaiseriga on projekteeritud sundlābivooluga otsevoolumatjana. Soojuskandja sundlābivool saavutatakse kahe ringluspumba abil, millest tōotab alati ainult ūks sest teine on paigaldatud tagavarapumbaks [6].

Seadme tehnilised andmed: [9]

1) Nimivōimsus:	10639 kW
2) Maksimaalne pealevoolutemperatuur:	340 °C
3) Temperatuuri erinevus peale- ja tagasivoolu vahel:	57,5 °C
4) Nimimahtvool:	307,0 m ³ /h
5) Minimaalne mahtvool:	291,6 m ³ /h
6) Soojuskandja:	MarlothermSH (termaalōli)
7) Soojuskandja kogus:	15410 l
8) Lubatud tōōlerōhk:	13 bar
9) Tōōtemperatuur:	350 °C
10) Arvutuslik temperatuur:	400 °C
11) Kūttepind:	647,3 m ²
12) Kihttemperatuur:	345,7 °C

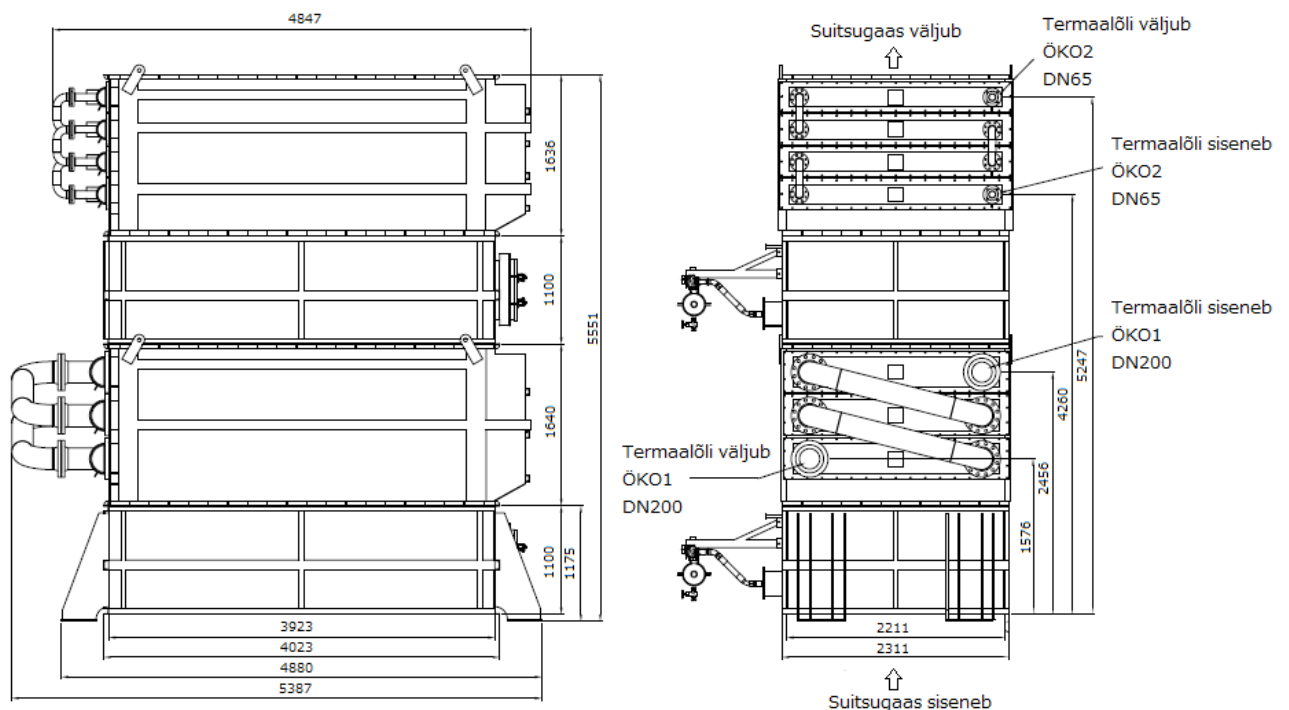
Katlas on soojuskandjaks termaalōli, mis soojendatakse umbes 310 kraadini. Kasutatava termaalōli omadused on vālja toodud tabelis 6.1 ja termaalōli ringluse skeem seel 6.5.

5. SUITSUGAASIDE JAHUTUS- JA PUHASTUSSEADMED

5.1 Ökonomaiser

Termoõlikatlast väljunud suitsugaas liigub edasi ökonomaiserisse, kus siledaseinaliste torudega soojusvahetites jahutatakse termaalõli soojendamiseks põlemisprotsessis tekkinud suitsugaase [10].

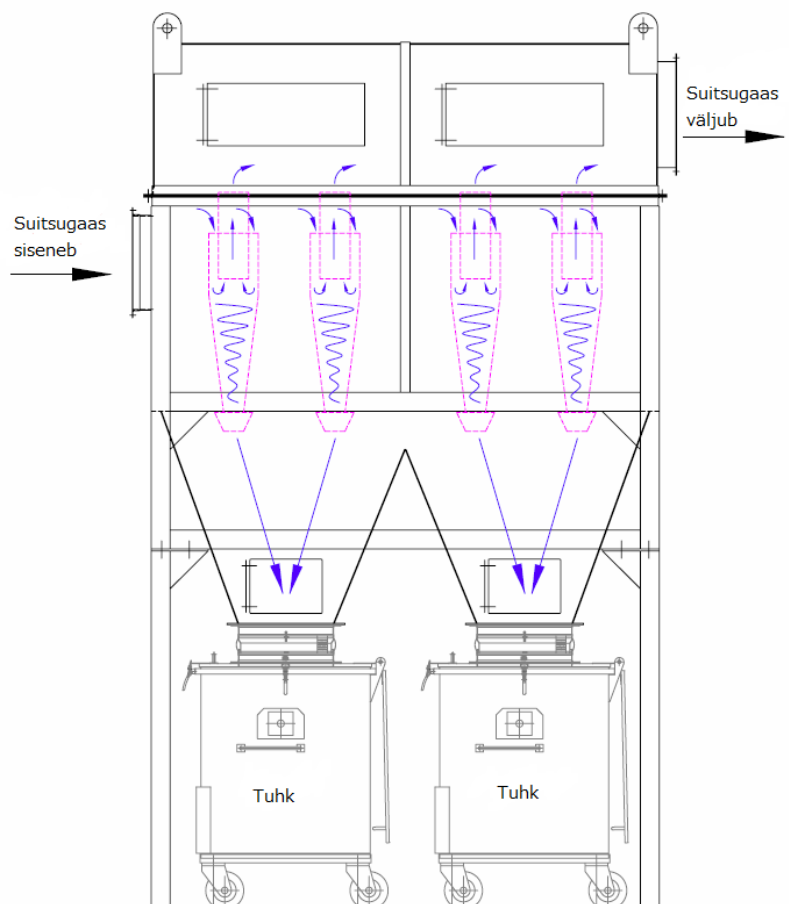
Ökonomaiser koosneb kahest eraldi olevast osast (ÖKO1 ja ÖKO2). Esmalt läbib termoõlikatlast väljunud suitsugaas ÖKO1 osa, kus termaalõli soojeneb 250 kraadilt umbes 260 kraadini. Seejärel läbib suitsugaas ÖKO2 osa, kus termaalõli soojeneb 130 kraadilt umbes 240 kraadini. Termaalõli ringluskeem koos vastavate parameetritega on väljatoodud seel 6.5.



Sele 5.1. Ökonomaiser [11]

5.2 Multitsüklon

Seadme tööks on lendtuha tahkete osakeste eraldamine suitsugaasidest tsentrifugaaljõu mõjul. Katlast väljunud puhastamata suitsugaas läbib esmalt ökonomaiseri ja siseneb siis puhastusseadmesse. Kõrge eraldustakistuse tõttu jagatakse suitsugaas eraldiseisvatesse keeristajatesse, mis panevad selle kiiresti pöörlema. Puhastussüsteem koosneb erinevatest eraldamise torudest, mis on paralleelselt ühendatud terakujuliste seadmetega, mille tööks on suunata gaasis sisalduvad tahked osakesed pöörlevasse liikumise nii, et see eraldatakse tsentrifugaaljõu toimetel. Osakesed pressitakse jõu mõjul vastu eraldustorude seina ja libisevad spiraalse liikumisega alla. Võimalik on eraldada ka suhteliselt peeneid osakesi. Selel 5.2 on kujutatud, et tuhk kogutakse seadme all paiknevatesse konteineritesse, aga Kuressaares suunatakse tekkiv tuhk tuhakonveierite abil samasse konteinerisse kuhu kogutakse ka põletusseadmes tekkiv koldetuhk. Puhastatud suitsugaas liigub edasi puhtasse gaasi kambrisse [12].



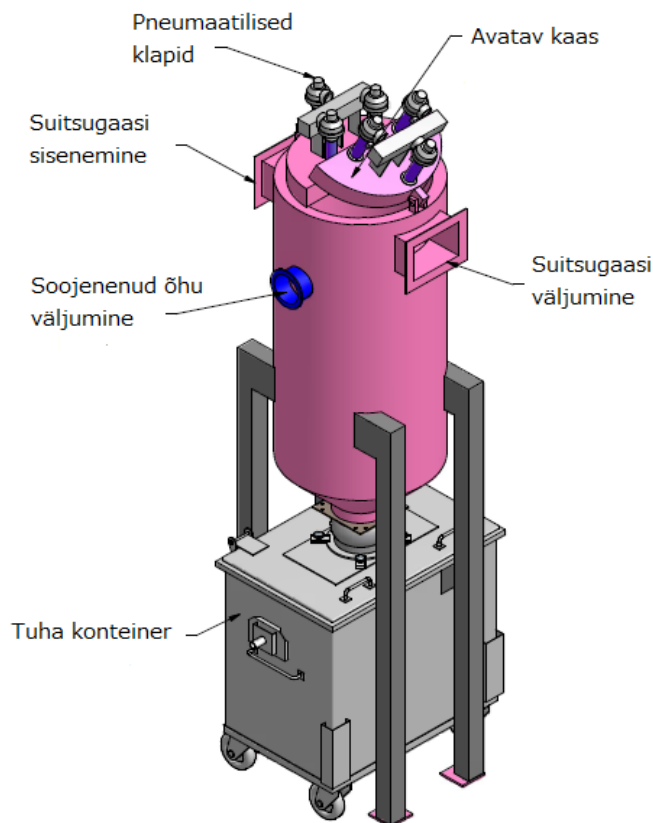
Sele 5.2. Multitsüklon [12]

5.3 Õhuelsoojendi

Õhuelsoojendis soojenenud õhk tõstab põlemistemperatuure põletusseadmes ja vähendab suitsugaaside temperatuuri. Primaarõhu- ja sekundaarõhuventilaatorid on ühendatud õhuelsoojendiga. Saavutamaks täpsemat kontrolli põlemisõhu temperatuuri üle, on ventilaatorite ja eelsoojendi vahele lisatud külmaõhuklapp. Selle abil segatakse soojenenud õhku külmema õhuga, et saavutada optimaalne põlemisõhu temperatuur, mis oleks vastavuses kütuse kvaliteediga ja põlemistemperatuuridega põletusseadmes [13].

Suitsugaas siseneb õhuelsoojendisse ja jõuab suitsugaasi torude esimese paketini. Läbinud need jõuab suitsugaas torude teise paketini ja sealt väljudes jõuab gaas suitsukambrini ning lahkub õhuelsoojendist [13].

Selel 5.3 esinev tuhakonteiner ei eksisteeri Kuressaare jaamas, sest tekkinud tuhk suunatakse tuhakonveierite abil ühisesse tuha kogumise konteinerisse.



Sele 5.3. Õhuelsoojendi [13]

5.4 Suitsugaasi kondensaator

Suitsugaasi kondensaatorisse sisenenud põlemisgaas jahutatakse allapoole kastepunkti ja saadakse kütuses sisaldava vee aurustamiseks kulunud soojus kondenseerumissoojusena tagasi. Seade töötab ka täiendava suitsugaaside puhastajana lendosakekestest. Mida suurem on kütuse niiskus, seda rohkem on võimalik saada täiendavat soojust suitsugaaside kondensaatoriga. Seade tõstab koostootmisjaama soojuslikku kasutegurit ja sellega väheneb kütuse kulu vajaliku soojushulga tootmiseks [14]

Kondenseerija võimsus on umbes 3 MW ning esimese tööaasta jooksul (03.2013-03.2014) oli toodetud energia 6618 MWh.

Kasutusel on suitsugaaside märgpuhastus. Kuna suitsugaas sisaldab tolmu, siis on arvestatud ka tekkiva mudaga seadmes, mis eraldatakse suitsugaaside kondensaatori põhjast vastava pumba abil. Kuna hakkepuut sisaldab vähesel määral agressiivseid ühendeid, nagu väävel ja kloor, siis kasutatakse materjalina roostevaba terast. Seadmes kasutatav heitvesi neutraliseeritakse leelisega (naatriumhüdroksiidiga ehk seebikiviga) [15].

6. KASUTATAVAD SOOJUSKANDJAD

Erinevalt traditsioonilistest lahendustest, kus soojuskandjaks katlas on vesi ja turbiinis veeaur, siis Kuressaare koostootmisjaamas kasutatakse katlas soojuskandjana termaalõli ja turbiinis teeb tööd silikoonõli.

Silikoonõli on tuleohtlik vedelik (leektäpp 30 kraadi) ja õhuga segunedes moodustab plahvatusohu. Silikoonõli kasutatakse jaama turbiinis, kinnises ahelas [2].

Termaalõli ei ole tuleohtlik vedelik, kuna tema leektäpp on kõrgem kui 55 kraadi (leektäpp 200 kraadi) ja õhuga segunedes ei teki plahvatusohtu [2].

6.1 Termaalõli

Termaalõli kasutatakse soojuskandjana katlas, kus see soojeneb umbes 310 kraadini. Õlis sisalduv soojus antakse soojusvahetis üle silikoonõlile ning jahtunud termaalõli liigub uuesti katlasse.

Järgmises tabelis on välja toodud Kuressaares kasutatava termaalõli põhilised omadused.

Tabel 6.1. Termaalõli omadused [16]

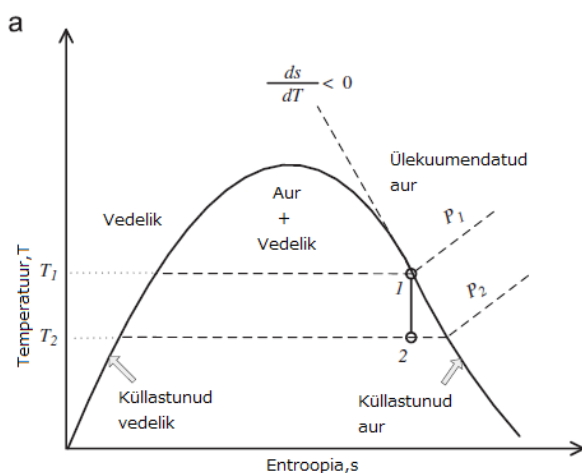
Omadus	Väärtus
Tihedus (20 °C)	1040-1050 kg/m ³
Viskoossus (20 °C)	42-52 mm ² /s
Keemistemperatuur (rõhul 101 kPa)	385-395 °C
Hangumistemperatuur	-34 °C
Leektäpp	200 °C
Süttimistemperatuur	450 °C
Erisoojus (20 °C)	1,55 kJ/(kg*K)
Soojusjuhtivus (°C)	0,131 W/(m*K)

6.2 Silikoonõli

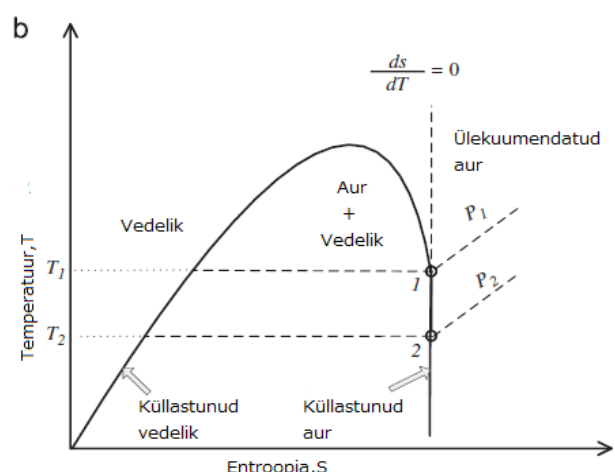
Turbiinis tööd tegeva vedeliku valimine on jõudluse ja ökonoomsuse seisukohalt väga oluline. Valiku tegemine mõjutab süsteemi efektiivsust, jaama opereerimise tingimusi, keskkonda, seadmete valikuid jne. Valiku võimalusi on palju: süsivesinikud, eetrid, siloksaanid, külmutusagensid jne [17]

Töötavaid vedelikke saab jagada kolmeks: märjad, kuivad ja isoentroopsed. Nende omavaheliseks võrdlemiseks on sobivad küllastunud auru kõverad. See karakteristik puudutab vedeliku sobivust, kogu tsükli efektiivsust ja kogu seadmete töö korraldust. Nagu temperatuuri-entroopia (T-s) diagrammidelt näha jaotatakse vedelikud kolmeks nende küllastunud auru kõvera kalde järgi: kuiv vedelik positiivse kaldega (c), märg vedelik negatiivse kaldega (a) ja isoentropne vedelik vertikaalse kaldega (b). Märg vedelik on näiteks vesi ja ammoniaak [17].

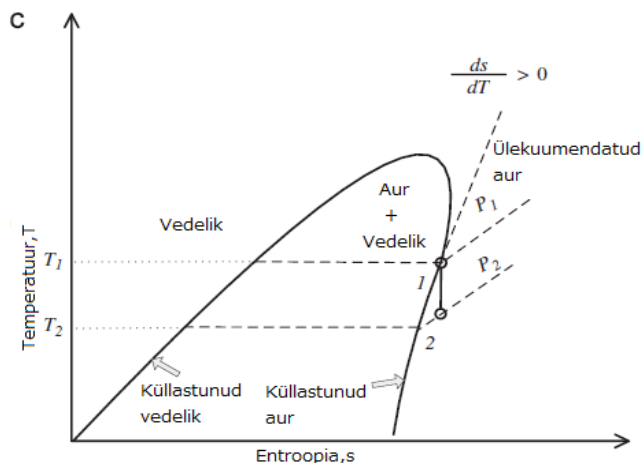
Negatiivse kalde tõttu sisaldab märja vedeliku aur turbiinist väljudes piisku, mis kahjustavad oluliselt turbiini labasid ja viivad alla kasutegurit. Tavaliselt hoitakse turbiinist väljunud auru kuivusaste üle 85% ja selle saavutamiseks peab turbiini sisenev aur olema ülekuumendatud olekus. Isoentropiline ja kuiv vedelik ei vaja ülekuumendamist (seega ei ole vaja ka ülekuumendamise seadmeid) ning seejuures ei satu turbiini ka vedeliku piisku. Seetõttu on need kaks vedelikku ORC protsessi jaoks sobivamad. Kui kuiv vedelik on liiga „kuiv“, siis turbiinist lahkuv aur on veel märkimisväärses ülekuumendatud olekus, mis oleks oluline energia raiskamine [17].



Sele 6.1. Märja vedeliku küllastuskõver [17]



Sele 6.2. Isoentropse vedeliku küllastuskõver [17]



Sele 6.3. Kuiva vedeliku küllastuskõver [17]

Järgmises tabelis on kirjas, millised peaksid olema orgaanilise vedeliku valimisel erinevad omadused.

Tabel 6.2. Orgaanilise vedeliku soovitatavad omadused [18]

Kriteerium	Omadus	Kirjeldus	Siht
Termodünaamiline	Vedeliku tihedus	Peab olema võimalikult kõrge, et suurendada massivoolukiirust ja vähendada seadmete suurust	Kõrge
	Latentse soojuste aurustumine	Peab olema võimalikult kõrge, et neelata soojust aurustumis protsessis	Kõrge
	Vedeliku soojusmahtuvus	Peab olema madal, et säilitada nõutav kogus jääsoojust	Madal
	Viskoossus	Peab olema madal, et vähendada pumba energiatarvet	Madal
	Soojusjuhtivus	Peab olema kõrge, et saavutada kõrge soojuslähikandetegur kondensaatoris ja aurustis.	Kõrge
	Keemispunkt	Peab olema väike temperatuuri erinevus kriitilisest temperatuurist	Madal
	Kriitiline temperatuur	Peab olema kõrgem, kui jääsoojuse temperatuur	Kõrge
Keskkond	Osoonikihi kahandamise potentsiaal	Peab olema võimalikult madal	Madal
	Globaalse soojenemise potentsiaal	Peab olema võimalikult madal	Madal
Ohutus	Tuleohtlikkus	Peab olema võimalikult madal, kuna see võib põhjustada plahvatuse	Madal
	Toksilisus	Peab olema võimalikult madal, et tagada ohutus jaamas	Madal
Majanduslik	Hind	Peab olema võimalikult madal	Madal

Tabelis on küll toodud soovitatud hinnangud, millised peaksid olema vastavad omadused, kuid ei ole olemas ühte kindlat vedelikku, mis vastaks kõikidele nõuetele. Igal vedelikul, mis tänapäeval kasutatakse on erinevad omadused ja seega peab soojuskandja valimisel kaaluma nende eelised ning puuduseid [19].

Kuressaare koostootmisjaamas kasutatav soojuskandja on silikoonõli, mis on kuiv vedelik.

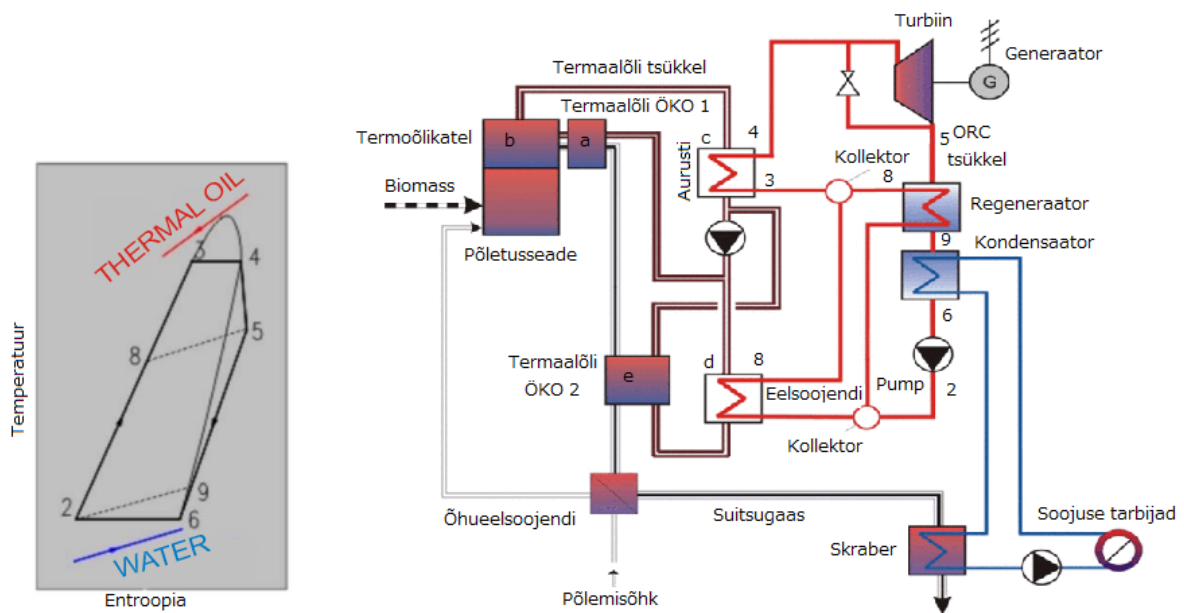
Silikoonõli koosneb 95% ulatuses oktametüültrisiloksaanist ($C_8H_{24}Si_3O_2$). Siloksaanid kuuluvad orgaaniliste ühendite gruppi, mis sisaldavad räni, hapniku ja süsivesinikke. Nende eelised on: madal toksilisus, hea termiline stabiilsus, piiratud süttivus, head termodünaamilised omadused kõrgete ja keskmiste temperatuuride rakendamisel, head määrideomadused [20].

Järgnevas tabelis on toodud kasutatava silikoonõli põhilised omadused, kus võrdlusena on välja toodud ka vee vastavad väärtused.

Tabel 6.3. Silikoonõli omadused [21, 22]

Omadus	Silikoonõli	Vesi
Keemistemperatuur	152 °C	100 °C
Kriitiline temperatuur	291 °C	374 °C
Hangumistemperatuur	-85 °C	-
Leektäpp	30 °C	-
Auru rõhk (50 °C)	100 000 Pa	12 350 Pa
Tihedus (20 °C)	820 kg/m ³	998 kg/m ³
Dünaamiline viskoossus (20°C)	0,001 Pa s	0,001 Pa s
Murdumisnäitaja	1,3825	1,3330
Soojusjuhtivus	0,1 W/(m*K)	0,58 W/(m*K)

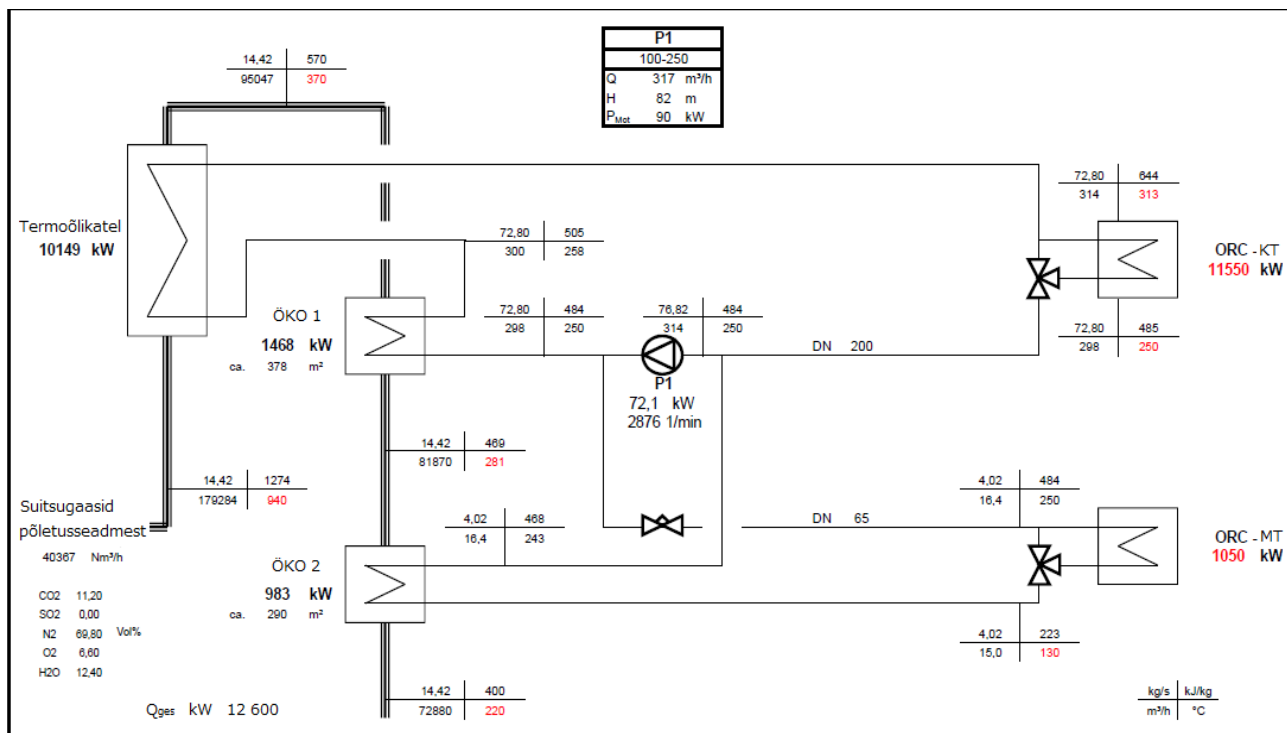
6.3 Soojuskandjate suletud ringlused



Sele 6.4. Silikoonõli ringlus ja T-s diagramm [23, 24]

Aurustis toimub termoõlikatlas kuumutatud termaalõli kasutamine, et soojendada ja aurustada silikoonõli (8-3-4). Aurustunud silikoonõli paisub turbiinis (4-5), mis on sama võlli abil ühendatud elektrigeneraatoriga. Paisunud aur liigub läbi regeneraatori (5-9), kus see eelsoojendab aurustisse minevat silikoonõli (2-8). Seejärel aur kondenseeritakse soojusvahetis (9-6), kus soojus antakse kaugkütte veele. Kondenseeritud õli rõhku tõstetakse pumba abil (6-2) ning õli pumbatakse edasi regeneraatorisse ja vajadusel ka eelsoojendisse (silikoonõli soojendatakse samuti termaalõliga) ning nendest edasi aurustisse, ning suletud silikoonõli ring hakkab uuesti pihta [23].

Toon siinkohal välja ka termaalõli võimalikud liikumised kinnises kontuuris. Soojuse ära andnud õli siseneb ökonomaiserisse 1 (a), kus suitsugaasidelt saadud soojuse arvel õli soojeneb. Seejärel siseneb õli termoõlikatlasse (b), kus see kuumutatakse umbes 310 kraadini ning liigub sealt aurustisse (c), kus annab osa oma soojusest ära silikoonõlile ja temperatuur langeb 310 kraadilt umbes 250 kraadini ning seda nimetatakse kõrge temperatuuriliseks sõlmeks (KT). Nüüd läbib vedelik eelsoojendi (d), kus soojendatakse samuti silikoonõli ja termaalõli temperatuur langeb 250 kraadilt umbes 130 kraadini ning seda nimetatakse madala temperatuuriliseks sõlmeks (MT). Seejärel liigub õli ökonomaiserisse 2 (e), kus tõstetakse temperatuur 245 kraadini, ja sealt edasi ökonomaiserisse 1 (a) ning termaalõli tsükkel hakkab algusest peale. Järgmisel seel on välja toodud termoõliringlus, koos parameetritega [25].



Sele 6.5. Termaalõli ringlus parameetritega [25]

Kuussaare koostootmisjaamas on kasutusel kaheks jaotatud süsteem. See tehnoloogia võimaldab tänu suurenenud termaalõli tsükli sidumise tõttu täiendavalt kasutada suitsugaasides sisalduvat soojust teises termaalõli ökonomaiseris (ÖKO 2). Võrreldes süsteemiga, kus on ainult üks ökonomaiser, suurem hulk suitsugaasides sisalduvast energiast kantakse üle ORC protsessi, mis omakorda suurendab kogu seadme elektrilist kasutegurit. Samas vajab see süsteem täiendavaid soojusvaheteid ja hüdraulilisi komponente, mis muudavad algse investeeringud suuremaks [24].

7. TURBIIN

Kasutusel on vasturõhuturbiin, mis tähendab, et toodetav võimsus sõltub täielikult väljastatavast soojuskoormusest linna kaugküttevõrku.

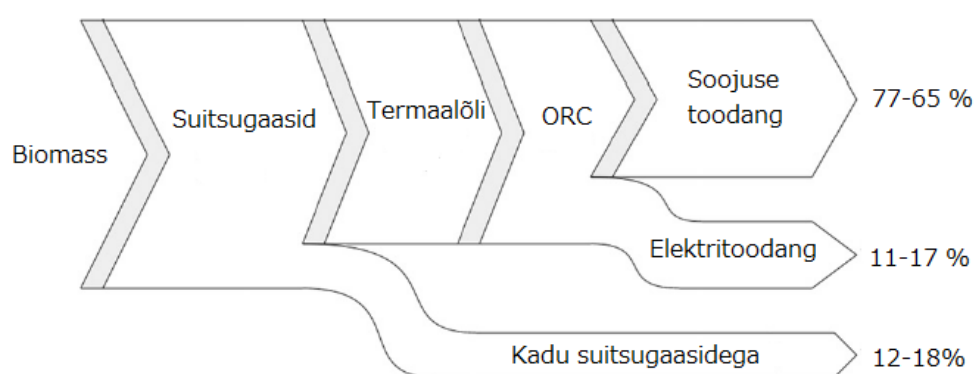
Tabel 7.1. Sõlmede ja turbiini ülevaade [26]

Sisend - Termaalõli		
Nominaalne temperatuur „KT“ sõlmes (sisse/välja)	°C	309/249
Üldine sisend soojusvõimsus „KT“ sõlmes	kW	10 975
Nominaalne temperatuur „MT“ sõlmes (sisse/välja)	°C	249/130
Üldine sisend soojusvõimsus „MT“ sõlmes	kW	1045
Summaarne sisend soojusvõimsus	kW	12 020
Väljund - Jahutusvesi		
Temperatuur (sisse/välja)	°C	60/90
Soojusvõimsus jahutusveele	kW	9598
Karakteristika		
Toodetav elektriline võimsus	kW	2304
• Kasutegur	%	19,3
Oma energiatarve	kW	98
Võrku antav elektriline võimsus	kW	2221
• Kasutegur	%	18,5

8. KASUTEGURID

8.1 Koostootmisjaama elektriline ja soojuslik kasutegur

Koostootmisjaama elektrilise ja soojusliku kasuteguri arvutamisel on arvestatud ka katla kasuteguriga. Järgmisel seel on kujutatud Kuressaare koostootmisjaama kasutegureid, kus ei ole arvestatud suitsugaaside kondenseerumisel saadava energiaga, mis puiduhakke kasutamisel annab tagasi suure osa kütuses oleva niiskuse aurustumiseks kulunud energia. Seel kujutatud protsentide vahemikud on arvatud tabeli 8.1 põhjal.



Sele 8.1. Kütusega sisseantava energia jaotus [19]

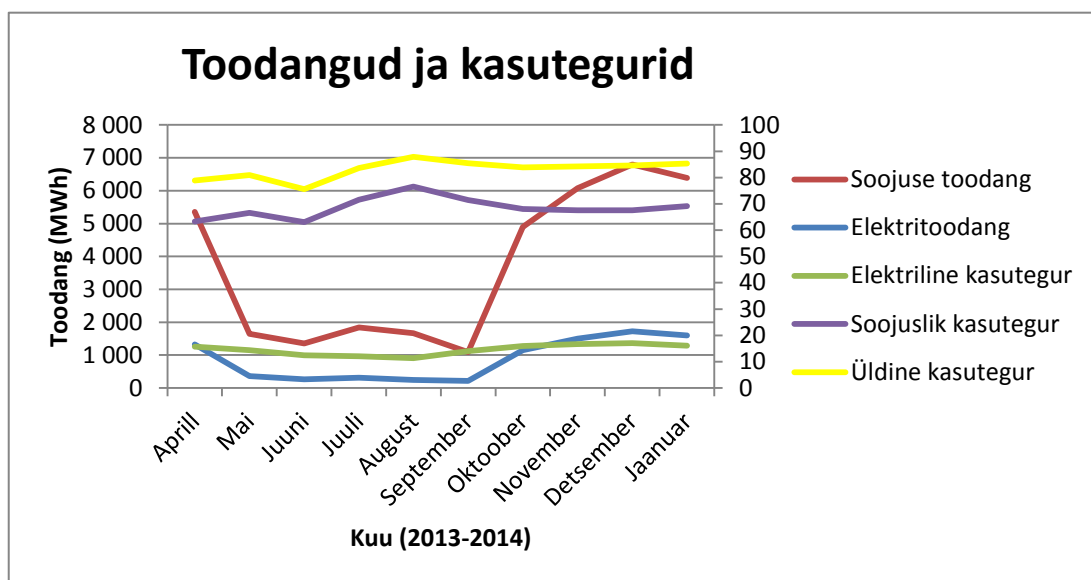
Kuressaare koostootmisjaama elektriline kasutegur on arvatud järgmiselt: toodetud elektrienergia on jagatud süsteemi sisseviidud kütuse energiaga. Soojuslik kasutegur on arvatud järgmiselt: toodetud soojusenergia on jagatud süsteemi sisseviidud kütuse energiaga. Üldise kasuteguri leidmiseks tuleb eelnevalt mainitud kasutegurid kokku liita [27].

Tabel 8.1. Jaama esimese kümne kuu toodangud ja kasutegurid

Kuu (2013-2014)	Elektri- toodang (MWh)	Soojuse toodang (MWh)	Kütuse energia (MWh)	Elektriline kasutegur (%)	Soojuslik kasutegur (%)	Üldine kasutegur (%)
Aprill	1325,0	5 352	8 461,8	15,66	63,25	78,9
Mai	356,2	1649	2 475,9	14,39	66,60	81,0
Juuni	266,8	1350	2 140,2	12,47	63,08	75,5
Juuli	310,7	1845	2 579,3	12,05	71,53	83,6
August	245,4	1667	2 175,9	11,28	76,61	87,9
September	213,4	1092	1 527,2	13,97	71,50	85,5
Oktoober	1145,2	4901	7 206,3	15,89	68,01	83,9
November	1503,6	6076	8 995,4	16,71	67,55	84,3
Detsember	1720,6	6 799	10 069,1	17,09	67,52	84,6
Jaauar	1593,7	6384,0	9878,0	16,1	69,2	85,3

Aprillis ja juunis oli üldine kasutegur alla 80 protsendi, mis ei ole kindlasti oodatav kasutegur, kuid see võis olla tingitud uue jaama puhul tekkivatest probleemidest ja kogenumatusest jaama optimaalse töö korraldamisel.

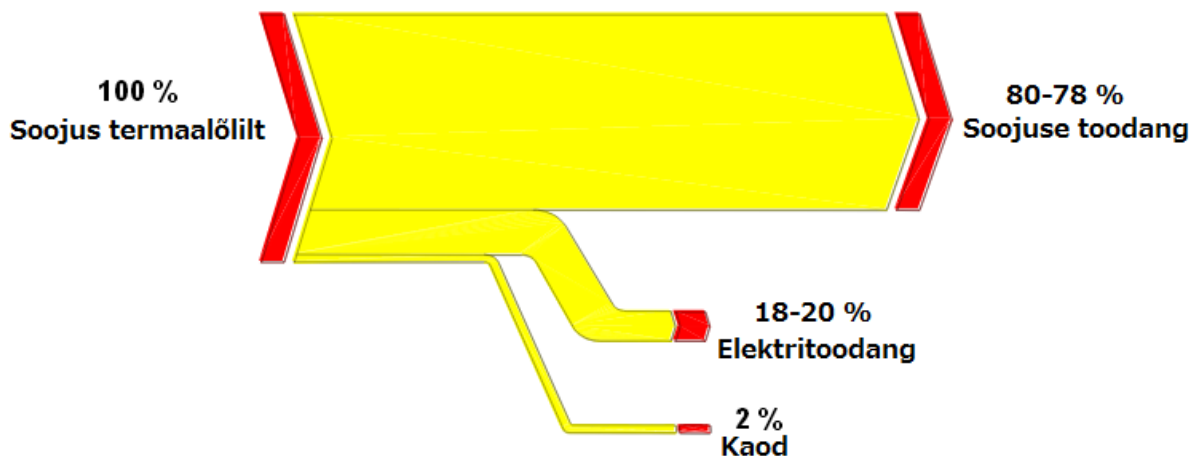
Koostootmisel sõltub elektritoodang soojuse toodangust, mis tähendab seda, et soojuse toodangu suurenemisel suureneb ka elektritoodang ja vastupidi. Kui kütusega antakse süsteemi 100% soojust, siis soojuslik ja elektriline kasutegur näitavad mitu protsenti sellest soojusest kasutatakse vastavalt soojuse ja elektri tootmiseks. Järgneval seel on välja toodud koostootmisjaama esimese kümne kuu toodangud ja kasutegurid.



Sele 8.2. Esimese kümne kuu toodangud ja kasutegurid

8.2 Orgaanilise rankine'i ringprotsessi kasutegurid

ORC ringprotsessi kasutegurite arvutamisel ei ole süsteemi sisenev soojus mitte kütusest eralduv energia, vaid termaalõliga ORC protsessi antav soojus. Ka turbiini karakteristika tabelis 7.1 olevad kasutegurid väljendavad ORC protsessi efektiivsust. Olukorda kirjeldab järgmine sele.



Sele 8.3. Soojuse jagunemine ORC protsessis [28]

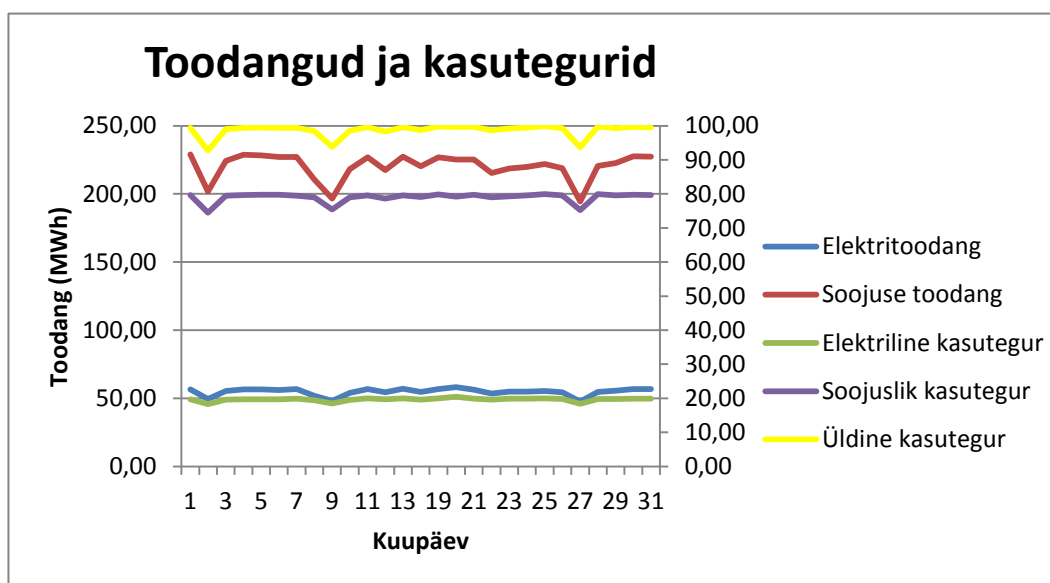
Järgnevas tabelis on kirjas kogu jaanuari andmed, kus elektriline kasutegur arvutatakse järgmiselt: elektritoodang tuleb jagada termaalõliga protsessi antava soojushulgaga. Soojuslik kasutegur arvutatakse analoogiliselt: soojuse toodang tuleb jagada termaalõliga protsessi antava soojushulgaga. Üldise kasuteguri leidmiseks liidetakse eelnevad kasutegurid kokku [27].

Tabel 8.2. Toodangud ja kasutegurid jaanuaris 2014

Jaanuar (2014)	Elektri- toodang (MWh)	Soojuse toodang (MWh)	Termaalõliga protsessi antav energia (MWh)	Elektriline kasutegur (%)	Soojuslik kasutegur (%)	Üldine kasutegur (%)
01.01	56,62	228,91	287,28	19,71	79,68	99,39
02.01	49,47	201,63	270,79	18,27	74,46	92,73
03.01	55,27	224,22	282,17	19,59	79,46	99,05
04.01	56,64	228,80	287,16	19,72	79,68	99,40
05.01	56,44	228,20	286,19	19,72	79,74	99,46
06.01	56,12	227,19	284,89	19,70	79,75	99,45
07.01	56,83	227,15	285,72	19,89	79,50	99,39
08.01	51,86	210,60	266,59	19,45	79,00	98,45
09.01	48,14	196,50	260,55	18,48	75,42	93,89
10.01	53,88	218,18	276,05	19,52	79,03	98,55
11.01	56,84	226,87	284,97	19,95	79,61	99,56
12.01	54,46	217,49	276,64	19,69	78,62	98,30
13.01	56,95	227,31	285,56	19,94	79,60	99,55
14.01	40,90	163,99	288,33	14,19	56,88	71,06
15.01	0,58	29,64	272,56	0,21	10,87	11,09
16.01	27,36	117,46	265,73	10,30	44,20	54,50
17.01	44,98	188,53	279,31	16,10	67,50	83,60
18.01	54,69	220,21	278,45	19,64	79,09	98,73
19.01	56,68	226,81	284,14	19,95	79,82	99,77
20.01	58,27	225,35	284,63	20,47	79,17	99,65
21.01	56,21	225,23	282,44	19,90	79,75	99,65

22.01	53,56	215,32	272,66	19,64	78,97	98,61
23.01	54,79	218,77	275,77	19,87	79,33	99,20
24.01	54,88	219,87	276,18	19,87	79,61	99,48
25.01	55,46	222,03	277,85	19,96	79,91	99,87
26.01	54,36	218,86	275,19	19,75	79,53	99,28
27.01	47,58	194,52	258,55	18,40	75,24	93,64
28.01	54,71	220,59	276,04	19,82	79,91	99,73
29.01	55,49	222,77	280,09	19,81	79,53	99,35
30.01	56,78	227,49	285,15	19,91	79,78	99,69
31.01	56,73	227,44	285,49	19,87	79,67	99,54

Tabelist on selgelt näha, et perioodil 14-17 jaanuar koostootmisjaam ei töotanud nominaal koormusel ja kasutegurid langesid madalale. Järgneval seel 8.4 on see periood välja jäetud, et kujutada ORC protsessi kasutegureid, siis kui jaam töötab täiskoormusel.



Sele 8.4. Toodangud ja kasutegurid jaanuaris

Üldjoontes töötab ORC protsess etteantud kasuteguritel, kus elektritoodang on 18-20 protsenti ja soojuse toodang vastavale 80-78 protsenti. Protsessi kaod on sel juhul väikesed (alla kahe protsenti). Turbiini karakteristik tabelis 7.1 on märgitud seadme elektriliseks kasuteguriks 19,3 % ning jaanuarikuu turbiini elektriline kasutegur vastas ettenähtud väärtusele.

8.3 Kasutegurid osalise koormusega töötamisel

Kuressaare koostootmisjaam töötab osalisel koormusel kütteperioodi välisel ajal. See on tavaliselt mai algusest kuni septembri lõpuni, aga võib natuke muutuda olenevalt

klimaatilisest tingimustest. Sel perioodil väljastatakse soojust ainult soojavee tarbimiseks, seega töötab koostootmisjaam umbes 20-35 protsendilise koormusega täiskoormusest. Järgnevas tabelis on valikuliselt toodud mõned kuupäevad, kus jaam töötab osalisel koormusel.

Tabel 8.3. Toodangud ja kasutegurid osalisel koormusel

2013	Elektri- toodang (MWh)	Soojuse toodang (MWh)	Termaalõliga protsessi antav energia (MWh)	Elektriline kasutegur (%)	Soojuslik kasutegur (%)	Üldine kasutegur (%)	Jaama osakoormus (%)
09.07	8,20	55,77	66,34	12,37	84,07	96,44	23,03
14.07	8,27	55,79	64,17	12,89	86,95	99,8	22,28
06.08	9,35	58,05	68,58	13,63	84,66	98,29	23,81
26.08	9,14	62,15	71,60	12,76	86,79	99,55	24,86
25.09	17,66	86,38	105,27	16,78	82,06	98,83	36,55

Tabelist on näha, et osalisel koormusel langeb elektriline kasutegur märgatavalt, kuid ORC protsessi üldine kasutegur jääb kõrgeks. Jaama koormuse tõusuga kaasneb ka elektrilise kasuteguri tõus ja toodetakse rohkem elektrit.

8.4 Turbiini elektrilise kasuteguri ja võimsuse tõstmine

Turbiinis toodetud võimsus (P) arvutatakse järgmise valemiga: [29]

$$P = m \cdot (h_4 - h_5) = m \cdot \Delta h_p \quad [\text{W}] \quad (8.1)$$

Kus auru massivoolukiirus (m) on korrutatud auru entalpiate vahega turbiini sisenedes (h_4) ja sealt väljudes (h_5)

Kondensaatoris kaugkütteveele antud soojushulk (Q) arvutatakse järgmise valemiga: [29]

$$Q = m \cdot (h_9 - h_6) = m \cdot \Delta h_q \quad [\text{W}] \quad (8.2)$$

Kus auru massivoolukiirus (m) on korrutatud entalpiate vahega kondensaatorisse sisenedes (h_9) ja sealt väljudes (h_6)

Kuna antud süsteemil on veel regeneraator, siis saab ka seal silikoonõlile ülekantava soojushulga arvutada analoogilise valemiga, kus auru massivoolukiirus tuleb korrutada entalpiate vahega regeneraatorisse sisenedes ja sealt väljudes.

Turbiinis toodetud võimsuse suurendamiseks on valemi (8.1) põhjal kaks võimalust. Esiteks tuleks suurendada auru massivoolukiirust või suurendada entalpiate vahet. Kuna entalpia on sõltuvuses temperatuurist (entalpia kasvab temperatuuri tõustes ja vastupidi), siis saab entalpiate vahet suurendada nii, et tuleb vähendada turbiinist väljuva auru temperatuuri (siseneva auru temperatuuri tõstmine on keeruline). See omakorda tähendab, et regeneraatorisse siseneb madalama entalpiaga (temperatuuriga) aur ja sama suure soojushulga ülekandmiseks regeneraatoris tuleb vähendada sealt väljuva auru temperatuuri nii, et entalpiate vahe jääks algse olukorraga võrreldes samaks. Kondensaatorisse jõuab algse seisuga võrreldes madalama entalpiaga (temperatuuriga) aur ning kaugkütteveele antakse väiksem soojushulk. See tähendab, et pealevoolutemperatuur on algsest madalam. Seega kaugküttevee pealevoolutemperatuuri langetamine suurendab turbiini võimsust tingimusel, et regeneraatorist väljunud auru entalpia on algsega võrreldes madalam. Juhul kui regeneraatorist väljub aur sama entalpiaga, mis esialgsetel tingimustel, siis kantakse pealevooluveele ikka algse olukorraga sama suur soojushulk ja temperatuur jääb samaks mis algtingimustel. Turbiinis toodetud võimsus küll suureneb, kuid see ei ole tingitud pealevoolutemperatuuri vähenemisest, vaid sellest, et regeneraatoris silikoonõli soojendamiseks ülekantud soojushulk on võrreldes esialgsega väiksem.

Kui turbiinis toodetud võimsus suureneb tingimusel, et protsessi antav soojushulk jääb konstantseks, siis suureneb ka turbiini elektriline kasutegur.

9. ORC EELISED JA PUUDUSED

Kuressaare koostootmisjaamas esinenud suuremad probleemid esimesel tööaastal: [30]

- Ringluspumba kinnikiilumine (veebruar 2013)
- Õlitusseadme manomeetri purunemine (juuli 2013)
- Turbiini laagri purunemine (jaanuar 2014)
- Turbiini võllitihendi leke

ORC seadmete üldised eelised: [31, 32]

- Kõrge ringprotsessi kasutegur
- Väga kõrge turbiini kasutegur (üle 90 protsendi)
- Puudub korrosioon ja turbiini labad ei kulu, sest puudub niiskus auru düüsidest
- Keemilist vee ettevalmistust pole vaja
- Automatiseeritud seadmed
- Madalad hoolduskulud
- Termoõli on madala rõhu ja temperatuuriga
- Väga lai koormuste diapsoon ja kõrge kasutegur madalatel koormustel

ORC seadmete üldised puudused: [31]

- Suhteliselt uus tehnoloogia
- Soojuskandjad on kergesti süttivad
- Suhteliselt suured investeeringud

10. KURESSAARE KOOSTOOTMISJAAMA PRIMAARENERGIA SÄÄST

Primaarenergia sääst näitab kui palju primaarengiat hoitakse kokku soojuse ja elektri koostootmisel võrreldes sellega, kui sama kogus elektrit ja sooja toodetaks eraldi.

Primaarenergia sääst (PES) arvutatakse järgmise valemiga: [33]

$$PES = \left[1 - \frac{1}{\frac{CHPH\eta}{REFH\eta} + \frac{CHPE\eta}{REFE\eta}} \right] * 100\% \quad (10.1)$$

kus PES – primaarenergia sääst

CHPH η – kasuliku soojuse kasutegur

REFH η – soojuse eraldi tootmise viiteväärtus

CHPE η – koostoodetud elektrienergia kasutegur

REFE η – elektrienergia eraldi tootmise viiteväärtus

Viiteväärtusega võrreldakse antud koostootmisseadet samal aastal ehitatud tehnoloogiliselt ja majanduslikult parimate eraldi elektri ja soojuse tootmisseadmetega. Kuressaare koostootmisjaama viiteväärtused on järgmised: REFH η =86% ja REFE η =34%. [33]

Järgnevas tabelis on arvutatud primaarenergiasäästu tulemused välja toodud aprillist kuni käesoleva aasta jaanuarini. Näiteks aprilli primaarenergia sääst arvutatakse tabelist 8.1 saadud andmete põhjal järgmiselt:

$$PES = \left[1 - \frac{1}{\frac{63,25}{86} + \frac{15,66}{34}} \right] * 100\% = 16,39\% \quad (10.2)$$

Tabel 10.1. Koostootmisjaama primaarenergia sääst

Kuu (2013-2014)	Elektriline kasutegur (%)	Soojuslik kasutegur (%)	Üldine kasutegur (%)	PES (%)
Aprill	15,66	63,25	78,9	16,39
Mai	14,39	66,60	81,0	16,50
Juuni	12,47	63,08	75,5	9,11
Juuli	12,05	71,53	83,6	15,69
August	11,28	76,61	87,9	18,21
September	13,97	71,50	85,5	19,51
Oktoober	15,89	68,01	83,9	20,52

November	16,71	67,55	84,3	21,69
Detsember	17,09	67,52	84,6	22,34
Jaanuar	16,1	69,2	85,3	21,81

Koostootmist loetakse tõhusaks kui vasturõhutorbiini kasutades on aruandlusperioodil üldkasutegur vähemalt 75 protsenti ja primaarenergia sääst vähemalt 10 protsenti [31].

Tabelist on näha, et üldkasutegur on vaadeldava perioodi jooksul olnud pidevalt üle 75 %. Primaarenergia sääst on olnud alla kümne protsenti juunis, mis tähendab, et sel perioodil ei olnud tegu tõhusa koostootmisega, kuid vaatamata sellele võib Kuressaare koostootmist lugeda tõhusaks, sest üldkasutegur ja primaarenergia sääst ületavad ülejäänud kuudel etteantud piirnorme märgatavalt.

KOKKUVÕTE

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli anda ülevaade Kuressaare koostootmisjaamast ja seal kasutusel olevast orgaanilise rankine'i ringprotsessist (ORC) ning hinnata kas ehitatud koostootmisjaam kvalifitseerub tõhusaks koostootmiseks või mitte.

Kuressaare koostootmisjaama soojuslik võimsus on 9,6 MW, millele lisandub suitsugaasidelt kondenseerumisel vabanev soojus, mis annab kokku soojuslikuks võimsuseks umbes 10-12 MW. Kuna talvine koormus on keskmiselt 15 MW ja tippkoormus ulatub isegi üle 20 MW, siis selle katmiseks töötavad talvel tippkoormus katlamajad. Jaama elektriline võimsus on 2,4 MW.

Jaamas kasutatavate seadmete ülevaade algab kütuse etteandest ja lõpeb suitsugaaside kondensaatoriga, mis on kahtlemata üks olulisemaid seadmeid, sest lisaks suitsugaaside puhastamisele aitab see tagasi saada kütuses sisalduva niiskuse aurustumiseks kulunud energia. Jaama kõige olulisemad seadmed, lisaks turbiinile, on puiduhakke põletusseade ja termoõlikatel, kus soojuskandjaks on termaalõli.

Soojuskandjatena kasutusel olevatest orgaanilistest vedelikest on põhjalikumalt uuritud silikoonõli omadusi, sest turbiinis tööd tegeva vedelikuna on tema tähtsus suurem. Silikoonõli erineb veest, mida kasutatakse traditsiooniliselt soojuskandjana, nii põhiliste omaduste poolest, kui ka sellepoolest, et seda ei ole vaja ülekuumendada, sest tulenevalt küllastunud auru kõvera positiivsest kaldest on silikoonõli turbiinist väljudes endiselt ülekuumendatud olekus.

Töö ühes kõige olulisemas osas arvutati koostootmisjaama üldine kasutegur ja ORC protsessi elektriline ja soojuslik kasutegur. Kuressaare koostootmisjaama üldine kasutegur ilma suitsugaaside kondensaatorita on umbes 85 %. ORC protsessi elektriline ja soojuslik kasutegur on vastavalt 18-20 % ja 80-78 %, mis tähendab, et protsessi kaod on väga väikesed (umbes 2 %). Leitud kasutegurid vastavad etteantud väärtustele.

Töö kõige olulisemas punktis arvutati koostootmisjaama primaarenergia sääst ning saadud tulemuste ja üldise kasuteguri põhjal oli võimalik hinnata, et Kuressaarde rajatud koostootmisjaama puhul on tegemist tõhusa koostootmisega.

SUMMARY

Purpose of present thesis is to give overview about Kuressaare CHP plant and organic rankine cycle (ORC) used in that plant, also to analyze whether this CHP plant is qualified for efficient cogeneration.

Thermal output of Kuressaare CHP plant is 9,6 MW, additional heat released from the condensation of flue gases increases total thermal output to 10-12 MW. As Kuressaare`s winter average heat consumption is 15 MW and reaches occasionally up to 20 MW, additional peak load plants are needed. Electrical output of Kuressaare CHP plant is 2,4 MW.

Thesis includes overview about equipment used in CHP plant, starting from fuel feed and concluding with flue gas condenser. Condenser is also one of the most important device in whole process, because in addition to cleaning flue gases, it also captures energy that has been used for evaporation of humidity from the wood chips. In addition to turbine, very important equipment is also wood chips burner and thermal oil boiler.

There are different organic fluids used in the Kuressaare CHP plant as heat carriers. Present thesis examines qualities of silicon oil in more detail, because of its importance being working fluid in turbine. Traditionally water is used as heat carrier in plants. Silicon oil differs from water with many basic qualities, including no need for extensive superheating, because positive slope of saturation vapor curve of silicon oil grants superheated condition also after exit from turbine.

As important part of present thesis, overall efficiency of CHP plant and ORC process electrical and thermal efficiencies had been calculated. Kuressaare CHP plant overall efficiency without flue gas condenser is around 85 %. ORC process electrical and thermal efficiencies are 18-20 % and 80-78 % accordingly, which means that energy losses in whole process are very low - only around 2 %. Calculated efficiencies are in line with given values.

In most important part of the thesis, primary energy savings of Kuressaare CHP plant had been calculated. Based on these results and overall efficiency of the plant, it can be concluded that Kuressaare CHP plant corresponds to efficient cogeneration.

KASUTATUD KIRJANDUS

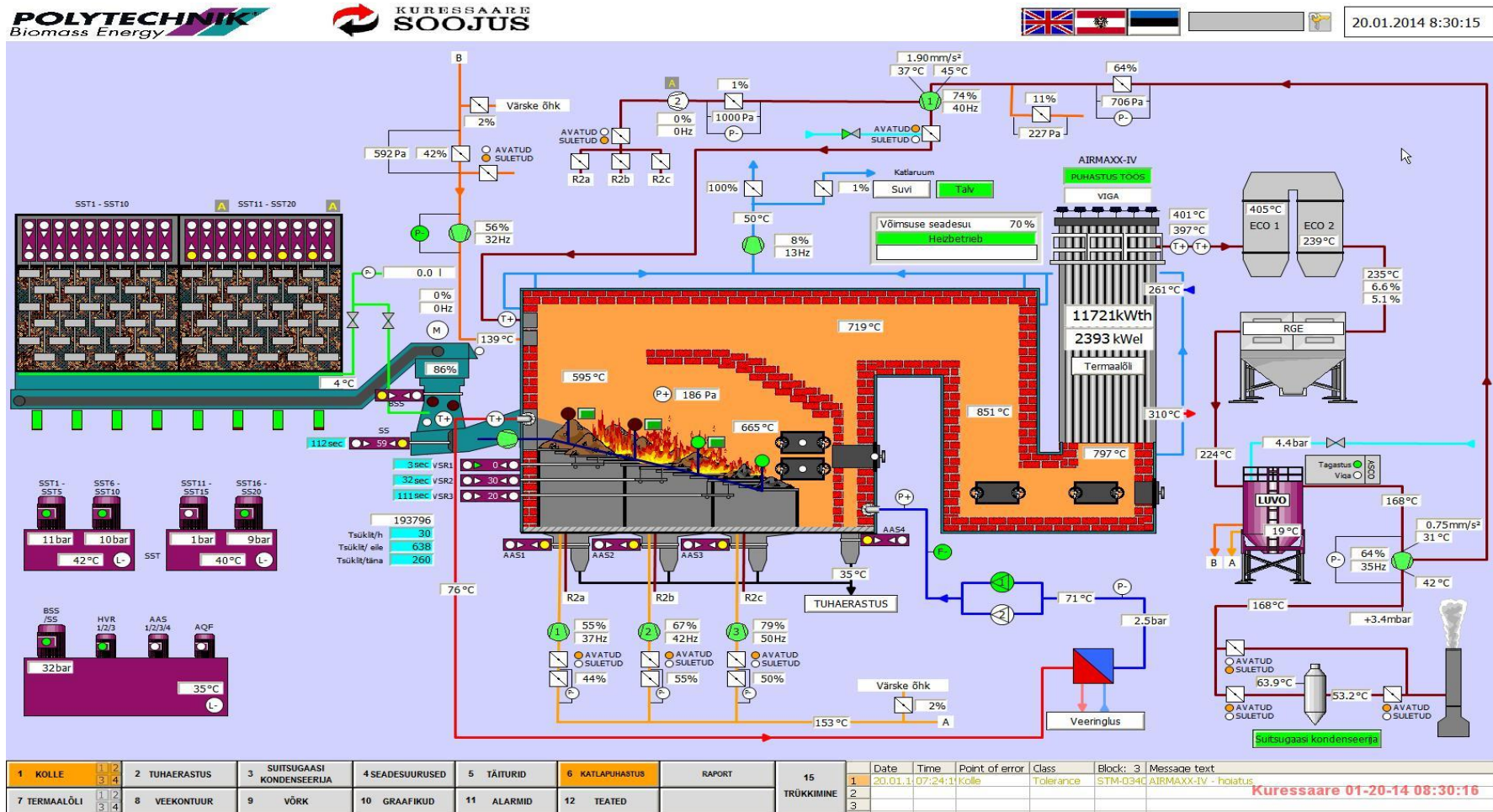
1. AS Kuressaare Soojus kodulehekülj [WWW] http://www.kuressaaresoojus.ee/?page_id=6 (16.05.2014)
2. Tehniline dokumentatsioon. Piko projekt. Kuressaare koostootmisjaam: Eelprojekt. Tallinn 2011.
3. Tehniline dokumentatsioon. Polytechnik. Data sheet for Pushing Rods. 2010.
4. Tehniline dokumentatsioon. Knoblinger. Technical data sheet KFD. 2012.
5. Tehniline dokumentatsioon. Polytechnik. Operating manual for the Polytechnik push feeder ss. 2012.
6. Tehniline dokumentatsioon. Polytechnik. Kasutusjuhend: hüdraulilise restiga põlemissüsteem ja termoõlikatel. 2013.
7. Tehniline dokumentatsioon. Polytechnik. Operating manual for the Polytechnik Moving Grate Furnace HVR. 2011.
8. Tehniline dokumentatsioon. Polytechnik. Kasutusjuhend veesüsteem. 2013.
9. Tehniline dokumentatsioon. maxxtec. Allgemeines—General: Seadme tehnilised andmed. 2012.
10. Tehniline dokumentatsioon. maxxtec. Economiser: Paigaldus-, käitamis-, hooldus- ja ladustamiseeskirjad Maxxtec'i ökonomaiseritele. 2007.
11. Tehniline dokumentatsioon. maxxtec. Economiser: Eco Turm. 2011.
12. Tehniline dokumentatsioon. Polytechnik. Operating manual for the POLYTECHNIK Flue gas dedusting unit RGE. 2011.
13. Tehniline dokumentatsioon. Polytechnik. Data sheet for Air preheater (LUVO). 2010.
14. Vares, V., Kask, Ü., Muiste, P., Pihu, T., Soosaar, S. Biokütuse kasutaja käsiraamat. Tallinn: TTÜ kirjastus, 2005.
15. Tehniline dokumentatsioon. condens heat recovery oy. DOCUMENTATION FOR DELIVERY P114 KURESSAARI. 2012.

16. Tehniline dokumentatsioon. sasol. Product information: Marlotherm SH Heat Transfer Fluid.
17. Bao, J., Zhao, L. (2013). A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle. – *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24. 325 – 342. [Online] ScienceDirect (18.04.2014).
18. Handayani, T., Harvey, A, P., Dalton, J., Reay, D. (2012). Selection of the Optimum Working Fluids in Organic Rankine Cycles Using TOPSIS. – *Chemical Engineering Transactions*, 29. 139 – 144. [Online] Aidic (18.04.2014).
19. Quoilin, S., Broek, M, V, D., Declaye, S., Dewallef, P., Lemort, V. (2013). Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. – *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22. 168 -186. [Online] ScienceDirect (19.04.2013).
20. Suitability of siloxanes for a mini ORC turbogenerator based on high-speed technology [WWW]<http://orc2011.fyper.com/uploads/File/presentations3/Suitability%20of%20siloxane%20for%20a%20mini%20ORC%20turbogenerator%20based%20on%20highspeed%20technology.pdf> (21.04.2014).
21. Tehniline dokumentatsioon. BRB. Material Safety Data Sheet. 2011.
22. Properties of water [WWW] http://en.wikipedia.org/wiki/Properties_of_water (20.04.2014).
23. Organic Rankine Cycle (ORC) in Biomass-Fueled CHP [WWW] www.canbio.ca/events/ottawa10/theuer_e.pdf (20.04.2014).
24. Description of the ORC technology for biomass Combined Heat and Power plants as well as further possibilities for process integration [WWW] <http://www.bios-bioenergy.at/en/electricity-from-biomass/orc-process.html> (20.04.2013).
25. Tehniline dokumentatsioon. Polytechnik. PFD Thermoölsystem. 2011.
26. Turboden Combined Heat & Power (CHP) Units WITH SPLIT [WWW] <http://www.turboden.eu/en/public/downloads/Tabella%20Data%20CHP%20with%20SPLIT%20-%20ING%20LR.pdf> (22.04.2014).

27. Hlebnikov, A. Elektri ja soojuse koostootmine sise- ja välispõlemise mootoritega: referaat. Tallinn, Tallinna Tehnikülikool, 2003.
28. State of the art of ORC technology for biomass plants [WWW] http://www.ieabcc.nl/workshops/task32_Copenhagen/06%20Bini%20-Turboden.pdf (25.04.2014).
29. Modelling and control of a district heating system [WWW] <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:461661/FULLTEXT01.pdf> (26.04.2014).
30. „Esimese tööaasta probleemid“. AS Kuressaare Soojus.
31. Paist, A. Soojuse ja elektri koostootmise tehnoloogiast. – Eesti põlevloodusvarad ja – jäätmed, 2013, 17, (36), 6 – 9.
32. Technical and economic aspects of Biomass fuelled CHP plants based on ORC turbogenerators feeding existing district heating networks [WWW] http://www.turboden.eu/en/public/downloads/09A06400_paper_orc_turboden_clotilde.pdf (02.05.2014)
33. Tõhuse koostootmise nõuded. – *Riigi Teataja*, RTL 2007, 41, 696.

LISAD

Lisa 1. Koostootmisjaama juhtimise arvutist tehtud ekraanipilt katla poolest



Lisa 2. Koostootmisjaama juhtimise arvutist tehtud ekraanipilt turbiini poolest

