



1918

TALLINNA  
TEHNIKAÜLIKOOL

SOOJUSTEHNKA INSTITUUT

Soojusenergeetika õppetool

MSE70LT

**Jaak Kimmel**

**PUIDUTÖÖSTUSETTEVÕTTE OPTIMAALSE  
ENERGIALAHENDUSE LEIDMINE JELD-WEN EESTI  
AS NÄITEL**

Autor taotleb tehnikateaduse magistri akadeemilist kraadi

Tallinn

2015

## 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 professor Aadu Paisti ja keemia doktorandi Marti Tutt'i juhendamisel

“.....” .....2015.a. Töö autor ..... allkiri

Töö vastab magistritööle esitatavatele nõuetele “.....” .....2015. a.

Juhendaja ..... allkiri

Kaasjuhendaja ..... allkiri

Lubatud kaitsmisele

..... õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....” .....2015. a.

..... allkiri

TTÜ soojustehnika instituut

# MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE

2015 aasta kevadsemester

Üliõpilane: Jaak Kimmel 143662  
Õppesuund: Soojusenergeetika  
Juhendaja: Professor Aadu Paist  
Konsultant: Marti Tutt, Adven Eesti AS energialaheduste arendusspetsialist

## Lõputöö teema:

(eesti keeles) Puidutööstusettevõtte optimaalse energialahenduse leidmine JELD-WEN Eesti AS näitel  
(inglise keeles) Optimal energy solution for a wood industry based on Jeldwen Eesti Ltd .

## Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	Olemasoleva tehnilise lahenduse kirjeldus	01.04.15
2.	Kuivatite kirjeldus, temperatuuri reguleerimise võimalused	20.04.15
3.	Võimalike kütelahenduste kirjeldus/tutvustus	04.05.15
4.	Võimalike kütelahenduste majanduslik tasuvus	11.05.15
5.	Analüüs, kokkuvõte	25.05.14

## Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:

Lõputöö eesmärgiks on anda ülevaade erinevatest tööstusettevõtete kütelahendustest. Analüüsida lahenduste tehnoloogilist ja majandusliku tasuvust. Lisaks analüüsitakse tootmises tekkivate jääkide kasutamist kütusena.

**Täiendavad märkused ja nõuded:**.....

**Töö keel:** .....

Kaitsmistaotlus esitada dekanaati hiljemalt ..... **Töö esitamise tähtaeg**.....

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

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

**Kaasjuhendaja** Marti Tutt /alkiri/ ..... kuupäev.....

Konfidentsiaalsusnõuded ja muud ettevõttepoolsed tingimused formuleeritakse pöördel.

## SISUKORD

AUTORIDEKLARATSIOON .....	2
MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE .....	3
SISUKORD .....	4
EESSÕNA .....	7
1 SISSEJUHATUS .....	8
2 JELD-WEN EEsti AS Energia tootmine ja Tarbimine .....	9
2.1 JELD-WEN Eesti AS tutvustus .....	9
2.2 JELD-WEN Eesti AS soojuse tootmine .....	9
2.2.1 Biomassi katlamaja .....	10
2.2.2 Gaasikatlamaja .....	13
2.2.3 Kerge kütteõli katlamaja .....	16
2.2.4 Soojuse tootmise kokkuvõte .....	18
2.3 JELD-WEN Eesti AS soojuse ja elektri tarbimine .....	18
2.3.1 Kuivatid .....	18
2.3.2 Elektrienergia tarbimine .....	19
3 Võimalikud energialahendused .....	20
3.1 Kasutusele võetav uus kütus .....	20
3.1.1 Saepuru ja puukoore segu .....	20
3.1.2 Saepuru ja koore omadused .....	22
3.2 Soojuse tootmine uuest kütusest veekatlaga .....	24
3.2.1 Biokütuse põletustehnoloogiate alused .....	24

3.2.2 5 MW Biomassi katlamaja Tamulti PreBio SCF – 5. 50% näitel .....	26
3.3 Elektri- ja soojuse koostootmine .....	27
3.3.1 Elektri ja soojuse koostootmise alused.....	27
3.3.2 Tõhusa koostootmise nõuded .....	29
3.3.3 Rankine´i tsüklil põhinev koostootmine .....	30
3.3.4 Koostootmisjaama näide - ICS Energietechnik 1 MW <sub>e</sub> .....	32
3.3 Koostootmine ORC( Organic Rankine´ Cycle) põhineva tehnoloogiaga .....	38
3.3.1 ORC (Organic Rankine´ Cycle) teoreetilised alused .....	38
3.3.2 ORC tehnoloogias kasutatavad orgaanilised vedelikud .....	41
3.3.3 ORC tehnoloogial põhinev koostootmisjaam Rakvere näitel .....	42
3.3.4 JELD-WEN Eesti AS-le sobilik ORC moodul .....	46
3.4 Kuivatite töötemperatuuri alandamise võimalused .....	47
4 Majandusliku tasuvuse analüüs .....	49
4.1 Majandusliku tasuvusanalüüsi alused ja komponendid .....	49
4.1.1 Majandusliku tasuvusanalüüsi teoreetilised alused.....	49
4.1.2 Majandusanalüüsi algandmed .....	51
4.1.3 Elektri hind.....	51
4.1.4 Keskkonna Investeeringute Keskuse toetused .....	52
4.1.5 Kuiva kütuse müümine pelletitehasele.....	52
4.1.6 Praegune soojuse hind.....	53
4.2 5 MW katlamaja majanduslik analüüs .....	54
4.3 Koostootmisjaama majandulik analüüs.....	55
4.4 ORC tsüklil põhineva koostootmisjaama majanduslik analüüs .....	59
5 Kergekütteõli katlamaja asendamine .....	62
5.1 Kergekütteõli hinnatõus .....	62

5.2 Kergekütteõli katlamaja asendamise võimalused .....	62
5.2.1 Soojustorustiku ehitamine .....	63
5.2.2 Gaasitorustiku ehitamine ja põleti paigaldamine .....	63
5.2.4 LPG mahuti ja aurusti paigaldamine .....	64
5.2.5 Kergekütteõli katlamaja asendamise kokkuvõte .....	65
6 JÄRELDUSED.....	67
KOKKUVÕTE.....	68
SUMMARY .....	69
Kasutatud Kirjandus .....	70

## EESSÕNA

Lõputöö teema pakkus välja ettevõtte Adven Eesti AS, kus töö autor töötab. Töö eesmärk on Adven Eesti poolt pakkuda JELD-WEN Eesti AS-le parim võimalik energialahendus. Töö valmis professor Aadu Paistu juhendamisel. Kaasjuhendaja andis suure panuse töö valmimisse AS Adven Eesti energialahenduste spetsialist ja keemia doktorant Marti Tutt. Autor soovib tänada koostöö ja vastutulelikkuse eest JELD-WEN Eesti AS esindajat Kaidu Nõmmikut. Lisaks aitasid töö tegemisel kaasa Adveni arendusjuht Priit Tiit, müügijuht Kaspar Kasepõld ja projektijuht Raimo Rebo. Samuti tänab autor erinevate ettevõtete esindajaid, kes olid lahkelt valmis jagama erinevate kütuste ja teenuste eelarvelisi hindasid.

# 1 SISSEJUHATUS

Magistritöö teema pakkus välja ettevõtte Adven Eesti AS, kus autor töötab. Teema oli huvipakkuv, sest hõlmab ettevõtte terviklahendust. Töö käsitleb olemasolva olukorra analüüsi ja probleemide tuvastamist, erinevate potentsiaalsete kütuste kasutamise analüüsi, optimaalse soojustootmise lahenduse valikut, kuivatite omaduste uurimist ja lahenduste majandusliku tasuvuse uurimist. Autori eesmärk on saada selge ettekujutus tööstusettevõttele sobiva energialahenduse leidmisest ja milliseid küsimused ja probleemid selle käigus tekkivad. Töö eesmärk on tekkivatele küsimustele vastused leida ja jõuda AS JELD-WEN Eesti AS-le sobivaim ja majanduslikult kasulikum lahendus.

JELD-WEN Eesti AS on puidutööstus ettevõtte, mis tegeleb puituste ja lengide tootmisega. Tootmisprotsess sisaldab saematerjali eeltöötlust, kuivatamist ja toodet valmistamist. Ettevõttes töötab 700 inimest ja toodang eksporditakse Euroopasse. Saematerjali töötlemisel tekib erinevaid tootmisjääke, mida on võimalik kasutada soojuse tootmiseks. Hetkel on ettevõttel kasutusel kolm kütust: biomass, maagaas ja kergekütteõli. Hetkel on aktuaalne kergekütteõli hinnatõus, töö üks eesmärkidest on leida sellele alternatiivne lahendus.

Enamustes eesti puidutööstuses kasutatakse soojuse baaskoormuse tootmisel biomassi, mis ei ole tootmisprotsessi jaoks sobiv: puiduhake, saepuru, puukoor. Tipu katmiseks kasutatakse maagaasi ja kütteõlisid. Euroopa suurim pelleti tootja Graanul Invest on ehitanud oma tootmisüksuste juurde 2 koostootmisjaama ja hetkel käib veel kahe jaama ehitamine. Käesoleva töö eesmärk on uurida koostootmise võimalikust näitena kasutatavas ettevõttes.

Töö koosneb järgnevatest peatükkidest. Olemas olev olukord – kirjeldatakse ettevõtte tootmisprotsessi, kasutatavaid kütuseid, katlamaju ja tarbitava soojuse kogust. Teine peatükk kirjeldab võimalike energialahenduste teoreetilisi aluseid ja toob iga lahenduse kohta näite. Kolmas peatükk sisaldab lahenduste majandulikkude analüüsi ja neljas peatükk sisaldab kergekütteõli asendamise võimalusi. Töö lõpus tehakse tehtud tööst järeldused. Töö tegemisel on kasutatud tarkvara MS Word ja MS Excel.



## **2 JELD-WEN EESTI AS ENERGIA TOOTMINE JA TARBIMINE**

### **2.1 JELD-WEN Eesti AS tutvustus**

Rakvere külje all asuv JELD-WEN Eesti AS kuulub ülemaailmsesse ettevõttesse, mille omanikud on Ameerika äriperekond Wendt. JELD-WEN-i tootmis – ja logistikauksused asuvad üle maailma. Hetkel on laienemata Aafrikasse ja Hiinasse. 50% tootmisüksustest paiknevad Ameerika Ühendriikides. Firmal on kokku 160 tehas ja ligikaudu 24 000 töötajat. 2006. aastal ostis JELD-WEN Taani firma Vest-Wood-i, selle käigus omandati ka Rakveres asuv tehas. Ettevõtte tootmine on üsnagi kitsalt spetsialiseeritud. Rakveres asuval tehasel on kaks põhilist spetsialiteeti: täispuidust ukselekid ning täispuidust siseuksed. Tootmisprotsessis kasutatakse männi- ja kuusepuitu. Umbes pool toormaterjalist imporditakse. Aastane toodang on ligikaudu 200 000 täispuidust siseust ja 1 000 000 lengikompleti. Tootmistsükkel hõlmab saeveskit, puidu kuivatamist ja lõpptöötlust. [1]

Tootevalikus on siseuksed, liuguksed saunauksed, rõduuksed, välisuksed ja aiamaajauksed. Tehas pakub tööd ligikaudu 700-le inimesele. Rakveres asub ka terminal, mis teenindab Baltimaid. Ettevõtte on pühendunud jätkusuutlikumale äripraktikale ja keskkonnahoiule. Tootearendusprotsessis on kehtestatud materjalide ümbertöötlemise ja taastuvenergiaga seotud põhimõtted. AS JELD-WEN omandas hiljuti FSC<sup>TM</sup> (Forest Stewardship Council<sup>TM</sup>) ja PEFC mitmeid tegevuskohti katva tarneahela juhtimissüsteemi sertifikaadid, mis keskenduvad vastutustundlikule metsamajandamisele. [2]

### **2.2 JELD-WEN Eesti AS soojuse tootmine**

JELD-WEN Eesti AS tehasekompleks koosneb mitmest tootmishoonest ja asub suurel territooriumil ( vt. Sele 2.1). Soojuse tootmiseks territooriumil kasutatakse kolme erinevat katlamaja ja kütust: gaas, kergekütteeõli ja biomass. Sele 2.1 näitab katlamajade asukohta Maaameti geoportaali kaardil. [6]



Sele 2.1 Katlamajade asukohad AS JELD-WEN Eesti AS territooriumil. [6]

### 2.2.1 Biomassi katlamaja

Kütusena kasutatakse tootmisprotsessis tekkivat saepuru- ja puidulaastkütust. Katlamajas on kasutusel restkoldega veekatel võimsusega 4 MW. Maksimaalne vee temperatuur on 120 °C ja tööõhk 6 bar-i. Veemaht on 6,7 m<sup>3</sup>, küttepinna soojuskoormus 14 kW/m<sup>2</sup> ja kolde soojuskoormus 300 kW/m<sup>3</sup>. Maksimaalne kütuse niiskus 30%. Tootmisprotsessi jäägina saadav kütus liigub saepuruhooldlasse kraaptransportööri. Sealt suunatakse hüdraulilise ettekande süsteemiga katlaruumi. Kütus suunatakse katlasse kahe tigutransportööri. Kütust tekib tootmisprotsessis ca 15 000 tonni. Üle jääv saepuru müüakse teistele ettevõtetele. [6]

Töö autor võttis 04.05.15 katlamajast kütuseproovi (vt. Sele 2.2) Proovi niiskus määrati TTÜ Soojustehnika Instituudi kütuse katselaboris vastavalt standardile EVS-EN 14774 (Tahked biokütused. Niiskusesisalduse määramise meetodid-Termostaadis kuivatamise meetod. Osa 2: Koguniiskus. Lihtsustatud meetod.) Nimetatud standardi järgi kuivatatakse proovi temperatuuril 105 ± 2°C. Õhuvoolu kiirus ahjus peab olema piisavalt madal, et proovi osakesed kuivatusanumast välja ei lendleks. Proov kaalutakse enne ja pärast kuivatamisprotsessi. Niiskus arvutatakse järgneva valemiga [3]:

$$M_{ar} = \frac{(m_2 - m_3) + m_4}{(m_2 - m_1) + m_4} * 100 \text{ [3]}$$

kus,

$m_1$  – tühja kuivatus konteineri mass, [g]

$m_2$  – konteineri ja niiske proovi mass, [g]

$m_3$  – konteineri ja kuiva proovi mass, [g]

$m_4$  – pakkimisega seotud niiskuse mass, [g]

Kütuseproovi tulemused on näha tabelist 2.1 [4] ja kütuseproovi pilt on toodud Selel 2.2.

Tabel 2.1 Kütuseproovi tulemused [4]

Määratav parameeter	Sisaldus	Standard
Niiskus (laast)	10,00%	EVS-EN 14774



Sele 2.2 Puidulaastu kütuseproov [5]

Niiskuse põhjal saab arvutada kütuse kütteväärtuse. Kütteväärtus on soojushulk, mis eraldub ühe kg puidu täielikul põlemisel. Kui põlemisel tekkinud veeaur kondenseeruks ja vabastaks kondensatsioonisoojuse, siis vaadeldav soojushulk oleks ülemine kütteväärtus. Kui aga tekkinud veeaur ei kondenseeru, siis on tegemist alumise kütteväärtusega. Ainult niiskusest olenev valem on järgnev [7]:

$$Q_a^t = Q_a^k(1 - M^t/100) - 2,44 \frac{M^t}{100} \quad [7]$$

kus,

$Q_a^t$ - tarbimisaine alumine kütteväärtus [MJ/kg],

$Q_a^k$ - kuivaine alumine kütteväärtus [MJ/kg],

$M^t$ -tarbimisaine niiskus [%].

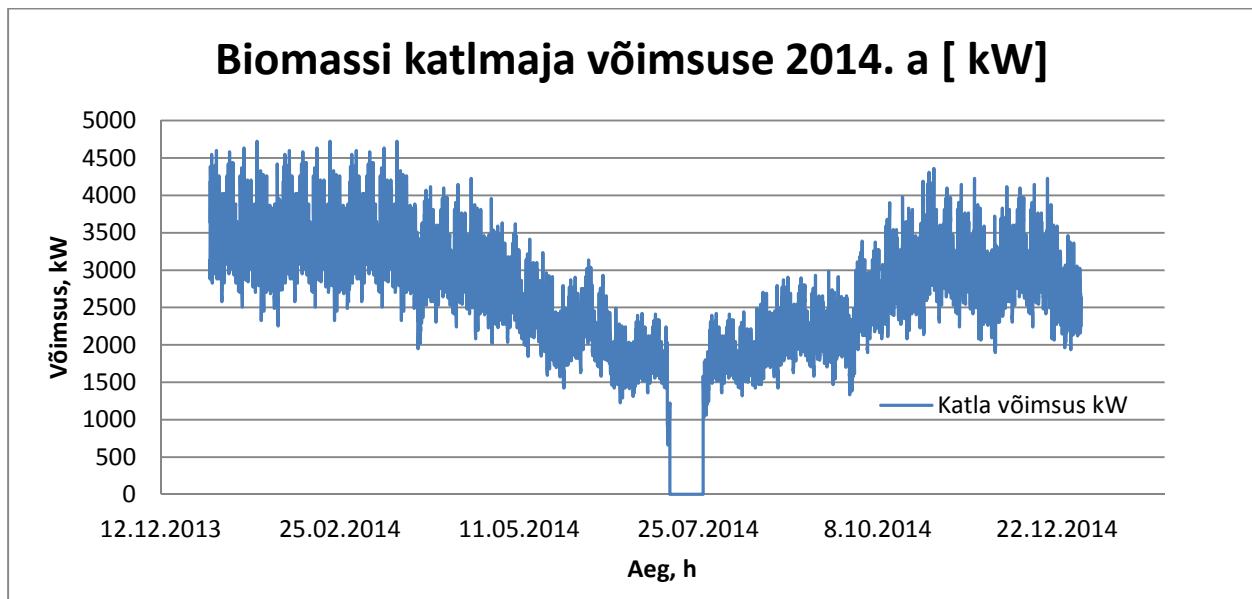
$$19,4(1 - 10/100) - 2,44 \frac{10}{100} = 15,02 \text{ MJ/kg}$$

Enamus biomassi katla toodetud soojusest tarbitakse kuivatite poolt. Lisaks kasutatakse soojust tootmisprotsessis ja tootmishoonete kütteks. Tabel 2.2 näitab toodetud soojusenergia hulka kuude kaupa. [6]

Tabel 2.2 Biomassi katlaga toodetud soojus 2014. aastal. [6]

Kuu	Toodang, MWh
jaanuar	2462
veebruar	2271
märts	2472
aprill	2164
mai	1803
juuni	1447
juuli	699
august	1416
september	1552
oktoober	2102
november	2114
detsember	2144
<b>KOKKU</b>	<b>22645</b>

Autoril on 2014. aasta katla võimsuse andmed mõõdetuna iga tunni aja tagant. Nende abil on töö autor koostanud katla 2014. a võimsusgraafiku. Graafik on toodud Selet 2.3. [6]



Sele 2.3 2014. aasta katla keskmine võimsus [6]

Sele 2.3 näitab, et katel töötab terve aasta, välja-arvatud 2 nädalane kollektiivpuhkus juuli kuus. Katla aastane töötundide arv arvestades kollektiivpuhkest ja katla hooldust on 8265 h/a.

## 2.2.2 Gaasikatlamaja

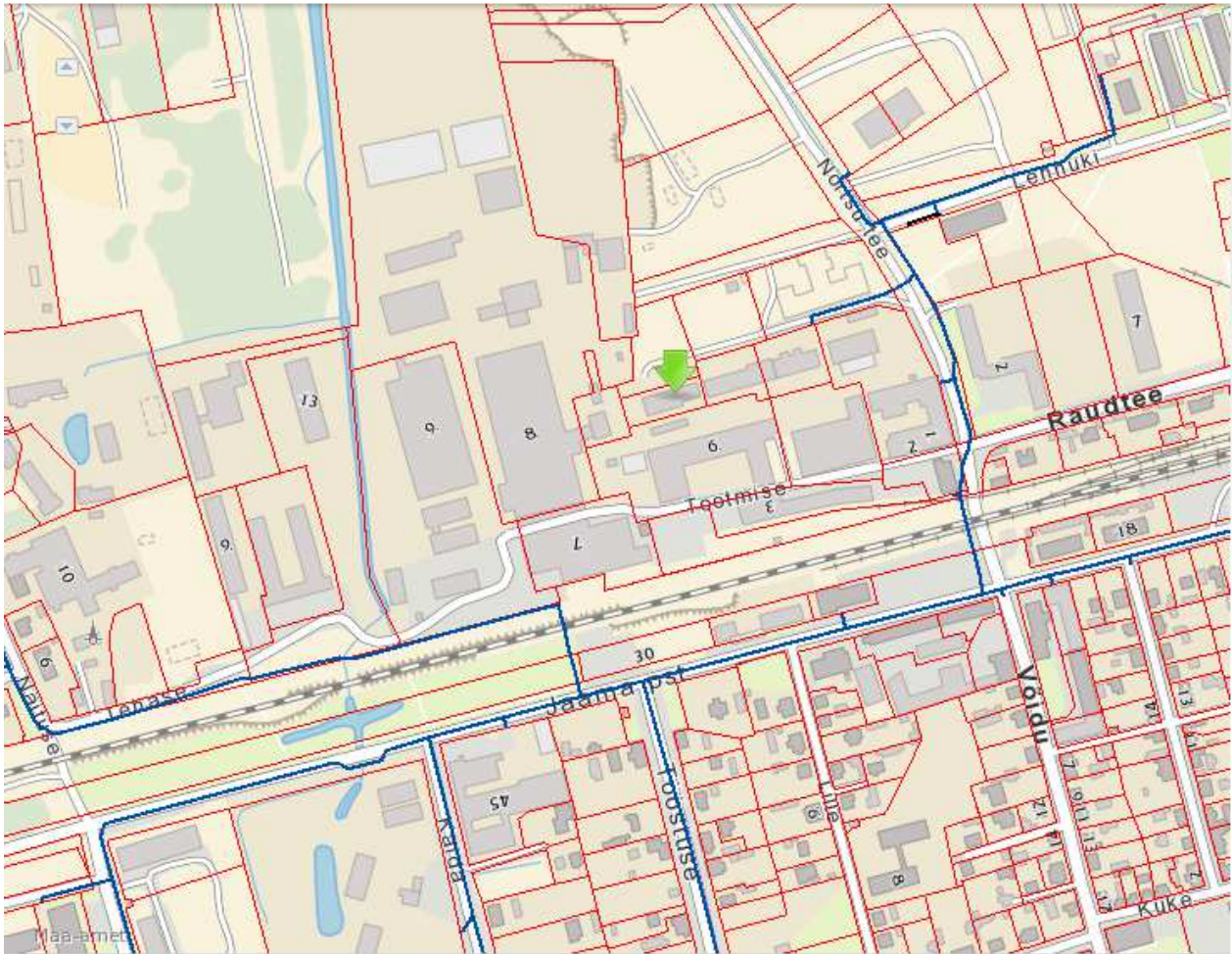
Gaasikatlamajas kasutatakse kütusena maagaasi. Maagaas on looduslikest allikatest (puuraukudest) nafta tootmisprotsessis või eraldi eralduv metaani ja väiksemas mahus etaani, propaani, butaani, kõrgemate süsivesinike fraktsioonide ning inertgaaside segu. Eestisse tarnitakse maagaasi läbi torustike Venemaalt. Ühe kuupmeetri gaasi põlemisel tekib 9,3-9,4 kWh soojusenergiat. Gaasi füüsikalised ja keemilised omadused on järgnevad[7,8]:

- Veeauru kastepunkt (absoluutsel rõhul 40 bar-i)  $\leq -10$  °C.
- Süsivesinike kastepunkt (absoluutsel rõhul 25-75 bar-i)  $\leq -2$  °C.
- Väävlisisaldus  $\leq 30$  mg/m<sup>3</sup>.
- Ülemine kütteväärtus (temperatuuril 20 °C ja abs. Rõhul 1, 01325 bar)  $\geq 35,27$  MJ/m<sup>3</sup>.



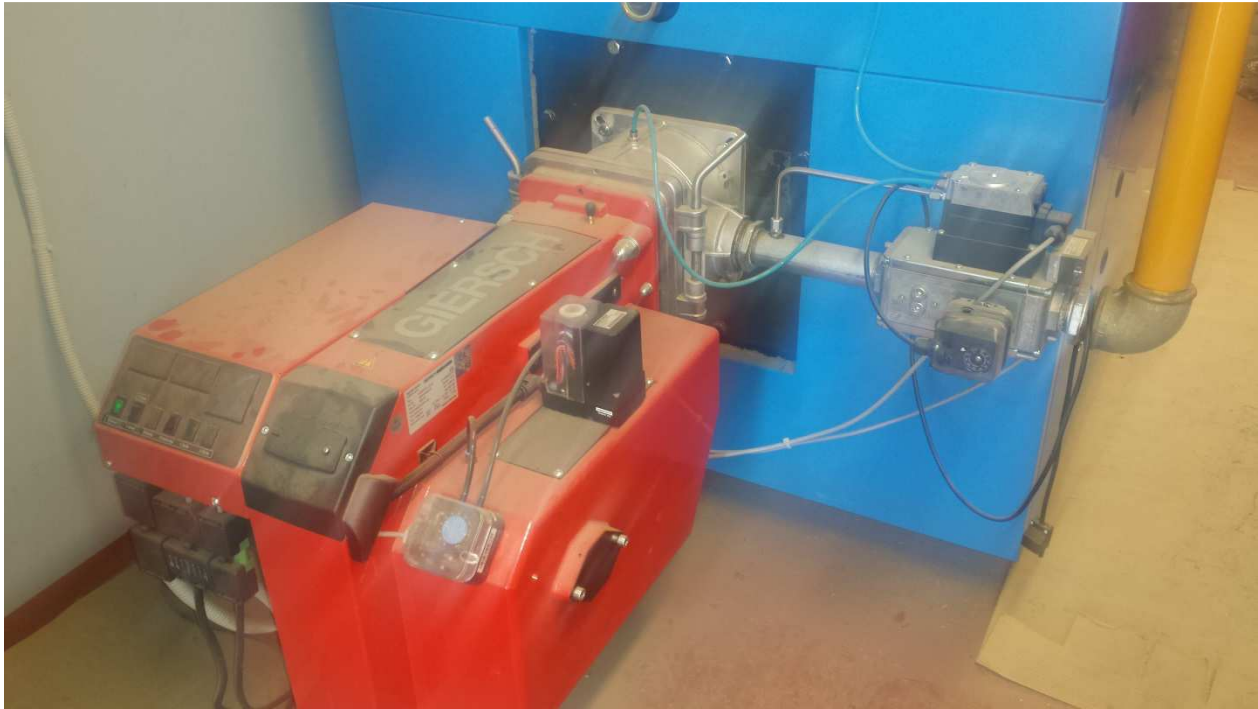
- Tahkete lisandite sisaldus  $1 \text{ mg/m}^3$ .

Maagaasi katlamaja on ühendatud maagaasi jaotusteenust osutava ettevõtte AS Gaasivõrgud võrku. AS Gaasivõrgud kodulehel asuv gaasitrasside kaardirakenduse väljavõte näitab lähima jaotusvõrgu asukohta. Seel 2.4 on välja toodud jaotusvõrgu skeem JELD-WEN Eesti AS territooriumi lähiümbruses. Seel on jaotusvõrk tähistatud sinise joonega ja skeemi järgi on jaotusvõrguga liitumispunkt ligikaudu 10ne meetri kaugusel katlamajast.



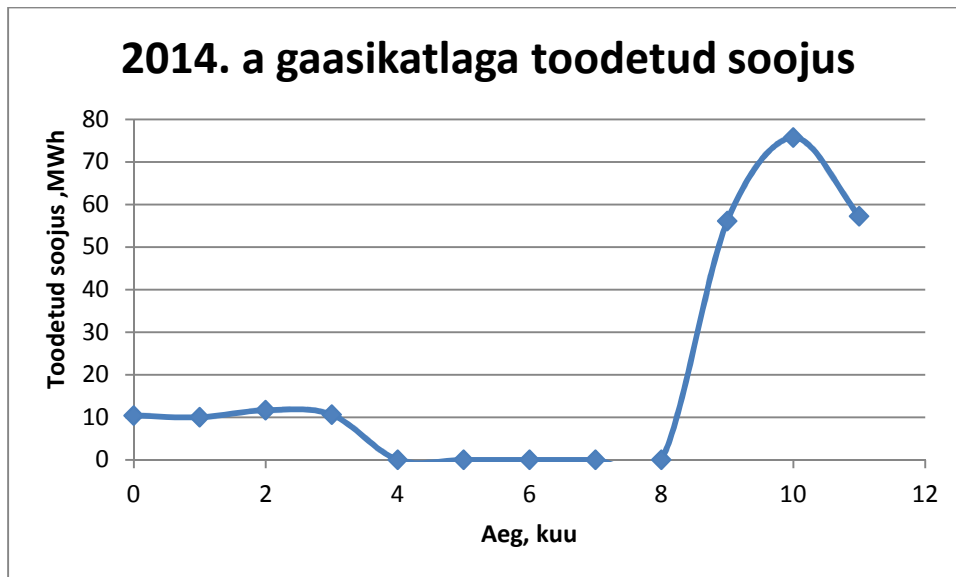
Sele 2.4 AS Gaasivõrgud kodulehe kaardirakenduse väljavõte JELD-WEN AS ümbruses [9]

Gaasi põletatakse leeksuitsutoru katlas. Moduleeriv põleti on firmalt Giersch ja on võimeline töötama võimsusvahemikus 300-1350 kW. Põleti pilt on toodud seel 2.5. Gaasikatelt kasutatakse tootmishoonete kütteks ja osaliselt tootmisprotsessis.



Sele 2.5 Gaasikatlamaja põleti. [5]

2014. a toodetud soojus on toodud välja kuude kaupa Selel 2.6. Antud graafik näitab, et gaasi suvel ei tarbitud . Perioodil oktoober- detsember on gaasi tarbimine ligikaudu 5 korda suurem kui perioodil jaanuar-aprill.



Sele 2.6 2014. Aastal gaasi katlamajaga toodetud võimusus [6]

### 2.2.3 Kerge kütteõli katlamaja

Kerge kütteõli mobiilse ja suure kütteväärtusega kütusena on kasutusel peamiselt lokaalkatlamajades. Suvine ja talvine kergekütteõli on erinevate viskoossustega. Eestis kasutusel olev talvine kergekütteõli hangumispunkt on  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , üldine väävlisisaldus kuni 0,5% ja veesisaldus kuni 0,03%. Kergekütteõli alumine kütteväärtus on piirides 11,4 - 11,9 MWh/t. Kergel kütteõli imporditakse Eestisse Leedust, Soomest ja Venemaalt. Tabelis 2.3 tuuakse välja kergekütteõli keemilised – ja füüsilised omadused. [7]

Tabel. 2.3 Kerge kütteõli füüsilised- ja keemilised omadused [7]

Näitaja	Suvine		Talvine	
	Ühik	Norm	Ühik	Norm
Tihedus 15 °C	kg/m <sup>3</sup>	max 860	kg/m <sup>3</sup>	max 860
Viskoossus (50 °C) mm <sup>2</sup> /s	80...100	95	140...180	170
Fraktsioonikoostis				
10% mahust aurustunud	°C	min 160	°C	min 160
50% mahust aurustunud	°C	max 280	°C	max 280
100% mahust aurustunud	°C	max 360	°C	max 360
Kinemaatiline viskoossus (20 °C)	mm <sup>2</sup> /s	max 5,2	mm <sup>2</sup> /s	max 4,0
Leekpunkt	°C	min 42	°C	min 42
Hägustumispunkt	°C	max -5	°C	max -24
Filtreeritavuspunkt	°C	ei normita	°C	max -30
Hangumispunkt	°C	< -15	°C	< -35
10% jäägi koksiarv	massiprotsent	< 0,35	massiprotsent	< 0,35
Tuhasus	massiprotsent	< 0,02	massiprotsent	< 0,02
Üldine väävlisisaldus	massiprotsent	< 0,5	massiprotsent	< 0,5
Veesisaldus	massiprotsent	< 0,03	massiprotsent	< 0,03
Kütteväärtus	MJ/kg	min 41,0	MJ/kg	min 41,0

Kergekütteõli konteinerkatlamaja kasutakse tööstuse territooriumil jõe läänekaldal asuva tootmishoone tootmisprotsessis ja hoone kütteks. Katlamaja pilt on näidatud seel 2.6. Kergekütteõli kulu on järgnev – perioodil jaanuar- aprill 17 m<sup>3</sup> ja perioodil oktoober-detsember 13,5 m<sup>3</sup>. Suvel kergekütteõli ei kasutata. Leian 2014. aasta kerge kütteõli katlamaja soojustoodangu, kasutades järgnevaid valemeid. [6]



$$m = \rho \times V$$

kus,

m- tarbimisaine mass [kg],

$\rho$  – tarbimisaine tihedus [kg/m<sup>3</sup>],

V-tarbimisaine ruumala [m<sup>3</sup>].

$$860 \times 17 = 14620 \text{ kg} = 16,62 \text{ t}$$

$$860 \times 13,5 = 11610 \text{ kg} = 11,61 \text{ t}$$

Kuna kergekütteõli alumine kütteväärtus on piirides 11,4 - 11,9 MWh/t, siis leian ligikaudse toodetud võimsuse. [7]

Perioodil jaanuar- aprill:

$$16,62 \text{ t} \times 11,65 \text{ MWh/t} = 193,6 \text{ MWh}$$

Perioodil oktoober- detsember:

$$11,61 \text{ t} \times 11,65 \text{ MWh/t} = 135,3 \text{ MWh}$$



Sele 2.7 Kerge kütteõli konteinerkatlamaja. [5]

## 2.2.4 Soojuse tootmise kokkuvõte

Soojust toodetakse kolmes katlamajas. Tabelis 2.4 on toodud välja katlamajade soojuse toodang 2014. aastal ja kogu AS JELD WEN AS soojustoodang.

Tabel 2.4 Ettevõtte 2014 . aasta soojuse tootmismahude tabel [6]

Kütus	Toodetud soojus, MWh
Biomass niiskusega 10%	22645
Maagaas	232
Kergekütteõli	329
<b>SUMMA</b>	<b>23206</b>

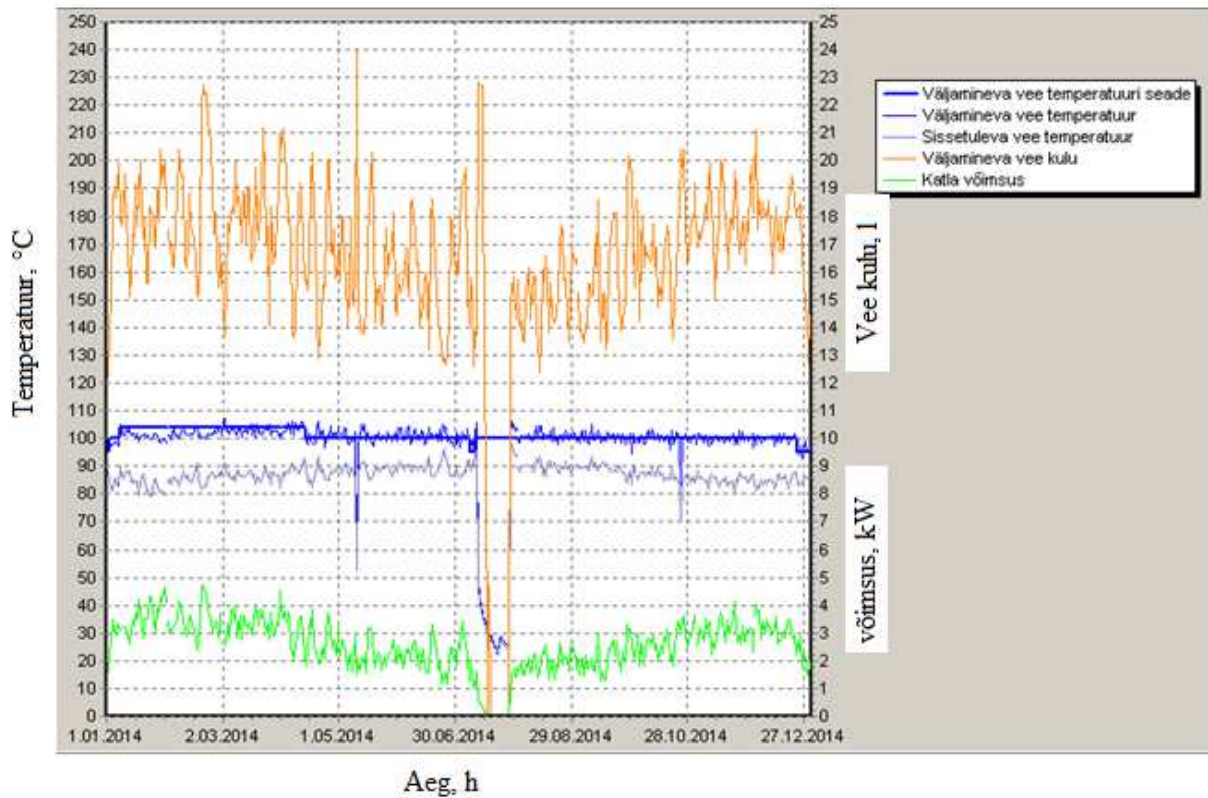
## 2.3 JELD-WEN Eesti AS soojuse ja elektri tarbimine

### 2.3.1 Kuivatid

Energiamahukaim protsess tootmisprotsessis on puidu kuivatamine. Kuivatamisprotsess on niiskuse eraldamine materjali pinnalt ja tema seesmistest kihtidest. Soojusliku kuivatamise korral aurustatakse materjalis olev niiskus ja aurud eemaldatakse. Tööstuses kuivatatakse materjale kuivatusaparaatides, kus on kunstlikult loodud sobivad tingimused. Protsessi käigus toimub soojuse üleandmine materjalile, soojuse levimine materjalis, niiskuse difundeerumine pinnale ja sealt aurustumine. Kuivatusprotsessi ajal toimub nii soojuse- kui ka massilevi. Konvektiivkuivatamisel on materjal vahetus kontaktis kuivatusagensiga , milleks on õhk või suitsugaas. Agens annab materjalile soojust, materjalist aurustunud niiskus eraldatakse koos agensiga. Protsess toimub enamasti atmosfäärirõhul. [10]

JELD-WEN Eesti AS-il on kaks kuivatit. Üks 1,5 MW võimsusega 8-kambriline kuivati ja üks 0,3 MW võimsusega 3-kambriline kuivati. Kuivatav materjal on 95% mänd ja 5% kuusk niiskusega 30-50%. Kuivatuseaeg sõltub ristlõike suurusest ja materjali algniiskusest, ligikaudu 210 tundi. Erinevate toodete jaoks on materjali ristlõiked vahemikus 19×75 kuni 65×240. [6]

Kuivatitesse mineva vee temperatuuri graafik on toodud seel 2.8. Graafik näitab, et kuivatitesse mineva vee temperatuur on stabiilselt ligikaudu 100 °C. Tagastuva vee temperatuur varieerub aasta lõikes. Talvekuudel on tagastuv temperatuur ligikaudu 85 °C ja suvekuudel ligikaudu 90 °C. Tagastuva vee temperatuuri kõikumise põhjustab välistemperatuuri erinevus. [6]



Sele 2.8 Kuivatitesse mineva ja tagastuva vee temperatuur

### 2.3.2 Elektrienergia tarbimine

Tööstus on ühendatud kahe peavõrgu liiniga. Kokku on 5 liitumispunkti ja 7 trafot. Aastane elektri tarbimine on ligikaudu 12 MWh aastas.[6]

## 3 VÕIMALIKUD ENERGIALAHENDUSED

### 3.1 Kasutusele võetav uus kütus

#### 3.1.1 Saepuru ja puukoore segu

Võimalikud energialahendused on üles ehitatud uue kütuse kasutuselevõtmisele. Nimelt tekib JELD-WEN Eesti AS-il tootmisprotsessis tootmisjäätina ca 2800 tonni puukoort ja ca 11600 tonni saepuru. Nende kokkusegamisel saadakse kütus, mida hakatakse kasutama uute lahenduste korral. Töö autor võttis 05.05.2015 eespool mainitud kütuse proovi ja TTÜ Soojustehnika Instituudi kütuse laboris määrati kütuse niiskus vastavalt standardile EVS-EN 14774. Kütus koosneb 95% männipuidust ja 5% kuusepuidust. Tulemused on nähtavad tabelis 3.1 ja kütuseproovi pilt Selet 3.1 [6]

Tabel 3.1 Kütuseproovi tulemused. [4]

Määratav parameeter	Sisaldus	Standard
Niiskus (saepuru ja koore segu)	52,20%	EVS-EN 14774



Sele 3.1 05.05.2015 võetud märja kütuse kütuseproov [5]

Uus kütus koosneb 95% männipuidust. Seega võtan kütteväärtuse arvutamisel aluseks hariliku männi kütteväärtused. Kasutan sama valemit, mida punktis 2.2.1

$$Q_a^t = Q_a^k(1 - M^t/100) - 2,44 \frac{M^t}{100} [7]$$

Hariliku männi kogu tüve alumine kütteväärtus on 19,33 MJ/kg. Hariliku männi koore alumine kütteväärtus on 19,53 MJ/kg [12]

Saepuru tarbimisaine kütteväärtuse leidmisel kasutan kogu tüve kütteväärtust:

$$19,33(1 - 52,2/100) - 2,44 \frac{52,2}{100} = 7,97 \text{ MJ/kg}$$

Koore tarbimisaine kütteväärtus:

$$19,53(1 - 52,2/100) - 2,44 \frac{52,2}{100} = 8,06 \text{ MJ/kg}$$

Edasistes arvutustes võtan uue kütuse ligikaudseks kütteväärtuseks 8,01 MJ/kg.

Antud kütust tekib aastas ca 14400 tonni. Arvestades leitud kütteväärtust 8,01 MJ/kg, leian potentsiaalse aastase toodetud soojushulga.

$$144 \cdot 10^5 \text{ kg} \cdot 8,01 \text{ MJ/kg} = 116 \cdot 10^5 \text{ MJ} = 32 \, 222 \text{ MWh}$$

Vastavalt 09.11.2009 tehtud AF Estivo katlamajade maksumuse, tehniliste lahenduse ja tegevuskulude eksperthinnangule on biokütusel töötavate katelde kasutegur nimikoormusel vahemikus 85-90%. Restkoldega katelde kasutegurid jäävad vahemikku 85-88% ja keevkihtkatelde kasutegurid vahemikku 87-90%. [11]

Punktis 2.2.4 on toodud 2014. aasta ettevõtte soojustoodanguks 23206 MWh. Arvestades katla kasuteguriga 85% leiame katlaga toodetud potentsiaalse soojuse hulga:

$$32 \, 222 \text{ MWh} \cdot 0,85 = 27 \, 389 \text{ MWh.}$$

Arvutustest selgub, et nn. märja kütuse kogusest piisab, et toota sama suur kogus soojust kui 2014. aastal.

### 3.1.2 Saepuru ja koore omadused

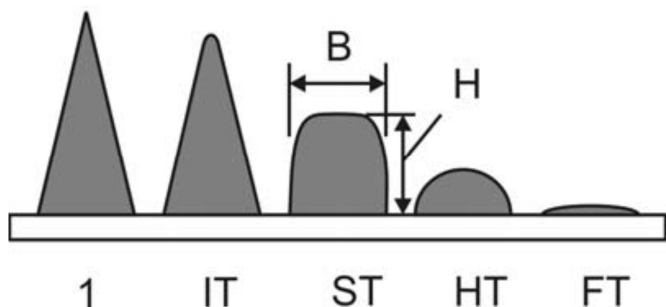
Puidurakkude kest koosneb tselluloosist, ligniinist ja hemitselluloosist. Ligniini kütteväärtus on kõige suurem kütteväärtusega, kuna sisaldab palju süsiniku ja vesinikku. Puit sisaldab ka väikestes kogustes tõrva, vaikusid ja fenoole. Need ained võivad suitsugaasidest külmadele küttepindadele sattudes sadestisi moodustada, mida on keeruline eemaldada. Puitkütuse elementaarkoostises on suurima osatähtsusega süsinik, vesinik ja hapnik. Puitkütuse kuivaine elementaarkoostis on toodud tabelis. 3.2. Väävlisisaldus on tähtis, sest kõrgema väävlisisalduse korral võib tekkida madalatemperatuuriline korrosioon suitsukäikudes ja korstnas. Kloor tekitab samuti küttepindade korrosiooni. Kloorisisaldus on suurem okaspuudest kütusest, kui okaste osatähtsus kütuses on suur. Uue kütuse korral on tegemist peamiselt männi koore ja saepuruga, seega peab jälgima kütuse kloori sisaldust. [12]

Tabel 3.2 Puidu ja koore kuivaine elementaarkoostis [12]

Element, % kuivaines	Puit	Koor
C	48-50	51-66
H	6,0-6,5	5,9-8,4
O	38-42	24,3-40,2
N	0,5-2,3	0,3-0,8
S	0,05	0,05
Cl	< 0,01	0,01-0,03

Tabel 3.2 näitab, et uue kütuse kasutusele võtmisel tuleb jälgida puidu kloori sisaldust, kuna 50% uuest kütusest moodustab koor. Samuti on koore süsiniku- ja vesinikusisaldus suurem, seega on ka kütteväärtus suurem.

Puitkütuste tuhasisaldus on madal, siiski on sulamiskarakteristikud väga tähtsad. Tuha sulamine võib põhjustada kolde šlakkumist ja konvektiivküttepindadele sadestiste tekkimist. Standardi ASTM korral määratakse karakteristikud standartse kujuga tuhakoonuse kuju muutused oksüdeerivas keskkonnas. Kujumuutused on toodud Selet 3.2. [12]



Sele 3.2 ASTM standartse tuhakoonuse kuju muutumine oksüdeerivas keskkonnas [12]

- 1 – Enne kuumutamist on koonus terava tipuga, lähteolukord.
- IT- Koonuse tipp ümardub, deformatsiooni algus.
- ST- Tuha koonus vajub kokku, kõrgus H kahaneb läbimõõduni B
- HT- Poolsfääri moodustumine,  $H=1/2 B$
- FT- voolamistemperatuur, vedel tuhk langeb laiali.

Tabelis 3.3 on toodud männi kasutusele võetava kütuse sulamiskarakteristikud[11]:

Kütus	Sulamiskarakteristikute väärtused °C			
	IT	ST	HT	FT
Saepuru, mänd	1150	1180	1200	1225
Koor, kuusk	1405	1550	1650	1650
Koor, mänd	1340	1525	1650	1650

Koore pehmenemistemperatuurid on kõrged ( üle 1500 °C, vt. tabel 3.3) ja kolde ja resti šlakkumist reeglina ei põhjusta. Saepuru ja hakke vastavad temperatuurid on madalamad, seega nõuavad täpset põlemistemperatuuride jälgimist. Tuha sulamine sõltub tema mineraalsest koostisest ja väikesed muutused võivad järsult muuta sulamiskarakteristikuid. Puukoore ja saepuru segamisel kütuseks on väga tähtis homogeense segu saavutamine. Sellest sõltub katla põlemisõhkude reguleerimine ja katla kasutegur. Tuleb vältida kütuse niiskus langemist alla 35%, sel juhul tõusevad põlemistemperatuurid liiga kõrgele ja võib tekkida kolde müüritise sulamine ja küttepindade hävimine. Uue kütuse kasutusele võtmisel on mõistlik määrata regullarselt kütuse niiskust. Liiga madala niiskuse vältimiseks on mõistlik pritsida kütust veega. [12]

## 3.2 Soojuse tootmine uuest kütusest veekatlaga

### 3.2.1 Biokütuse põletustehnoloogiate alused

Biokütusel töötava katlamaja põhiosad on [11]:

- kütuse ladu, võib koosneda mitmest komponendist, kütuse vastuvõtusõlm, põhiladu, automatiseeritud ladu,
- kütuse teisalduseadmed, hüdraulilised kraaptransportärid, tigutransportöörid, konveierid,
- kolle koos katlaga,
- põlemisgaaside puhatusseadmed (tsüklonid, elektri- ja kottfiltrid) ja korsten,
- tuhaäratussüsteem,
- primaar- ja sekundaarõhu ventilaatorid, automaatika, kontrollid.

Kolde põletusseadmed ja katlamaja tehnoloogiline skeem on madalakvaliteedilise kütuse kasutamisel komplitseeritumad. Vaatleme punktis 3.1 kirjeldatud kasutuselevõetava kütuse põlemist respõletamisel. Põlemisprotsess toimub nii kütuse kihis kui ka kolderuumis. Kütuse kuivamine algab kütuse jõudmisel restile, sest kihi temperatuur hakkab tõusma. Temperatuuri tõusmisel temperatuurini 100 – 105 °C, hakkab lendaine (peamiselt süsivesinike) eraldumine. Protsessi käigus muutub kütuseosakeste struktuur poorseks. Okaspuu kütus süttib temperatuuri 220 °C juures. Temperatuuril 800-900 °C lõppeb süsiniku põlemine ja tuhk langeb restilt tuhaäratussüsteemi. Restil toimuvad protsessid jagunevad kaheks: endotermilisteks ehk soojust neelavateks (kuivamine ja pürolüüs) ning eksotermilisteks ehk soojust andvateks (põlemine). Põlemistsooni kütuseosakesed ja kuivamistsooniosakesed pole otseses kontaktis, seega saab kuivamistsoon ja pürolüüsitsooni ülemine osa vajaliku soojuse leegi ja kuumade koldepindade kiirguse teel. Niiske kütuse puhul (antud töös kasutatav kütus  $w=50\%$ ) vajatakse enam soojust kütuse kuivatamiseks ja süttimistemperatuuri saavutamiseks. Selle-tõttu puuduvad niiske kütuse põletamiseks ettenähtud koldes küttepinnad (jahutavad pinnad) puuduvad või on väikesemahulised. Kuumade keraamiliste koldeseinte kõrge temperatuur tagab soovitud piiride kuivatustsooni resti ülemises osas ja kütuse õigeaegse süttimise. [12]



Suurem osa biokütusest saadavas soojusest eraldub kolderuumis mitte kütusekihis, sest kütuse lendosa sisaldus on suur. Pürolüüsil gaasistunud lendaine põlemisprotsess algab temperatuuri vahemikus 500-600 °C. Selleks tuleb kolderuumi anda värsket hapnikurikast õhku. Resti alla antavat õhku nimetatakse primaarõhuks, lendosade põlemiseks vajalikku lisaõhku nimetatakse sekundaarõhuks. Punktis 3.1 kirjeldatud kütuse korral on sekundaarõhu vajadus suurem kui primaarõhu vajadus. [12]

Soomes kasutatakse kuni 5 MW võimsusega katelde korral restpõletamise tehnoloogiat. Suurema võimsuse korral eelistatakse keevkihtkoldeid. Antud töös kasutatakse mehhaanilise restiga kollet. Restielementide liigutamise abil saavutatakse kütuse ühtlasem jaotus restil, efektiivsem põlemine ja väiksem kahjulike elementide sisaldus suitsugaasis. Mehaanilise restiga kolde puhul on mitmeid lahendusi [11]

- Kaheosaline rest – ülemine osa on liikumatu rest koos kuivamis- ja pürolüüsitsooniga ja alumine osa väiksema kaldega liigutatavate elementidega põlemistsooniga rest.
- Malekorras asuvad liikuvad ja liikumatud restielemendid. Tagab kütusekihi ühtlase paksuse ja edasiliikumise.
- BioGrate põletustehnoloogia korral söödetakse kütus tigusöötjaga koonilise resti keskossa, kust see koonuse pinda mööda allapoole valgub.

Niiske kütuse korral on koldeseinad ilma jahutuseta. Kui ilma jahutuseta koldes põletada kuiva kütust, siis tekib kiire temperatuuri tõus kolderuumis ja kütusekihis. Tulemusena tekib tuha sulamine, resti ja selle õhuavade šlakkumine ning kolde müüritise kahjustumine. Kuiva kütust tuleb põletada koldes, mille seinu jahutatakse sinna paigaldatud küttepindade abil. Sellises koldes niisket kütust põletades jäävad temperatuurid resti madalaks ja kuivamisprotsess ei ole piisavalt intensiivne. Tulemuseks on põlemata kütuseosakest sattumine tuhaarastussüsteemi ja lendosade mittetäielik põletamine, mis järsult alandavad põlemise efektiivsust. Tahm ja põlemata gaasid sattuvad korstnasse, samuti pigistuvad küttepinnad ja suitsukäigud. Selle-tõttu pole otstarbekas kasutada uue kütuse põletamiseks olemasolevat katlamaja. Põlemise efektiivsus langeb järsult ja katalamaja ei suuda tagada vajalikku soojuse toodangut. [12]

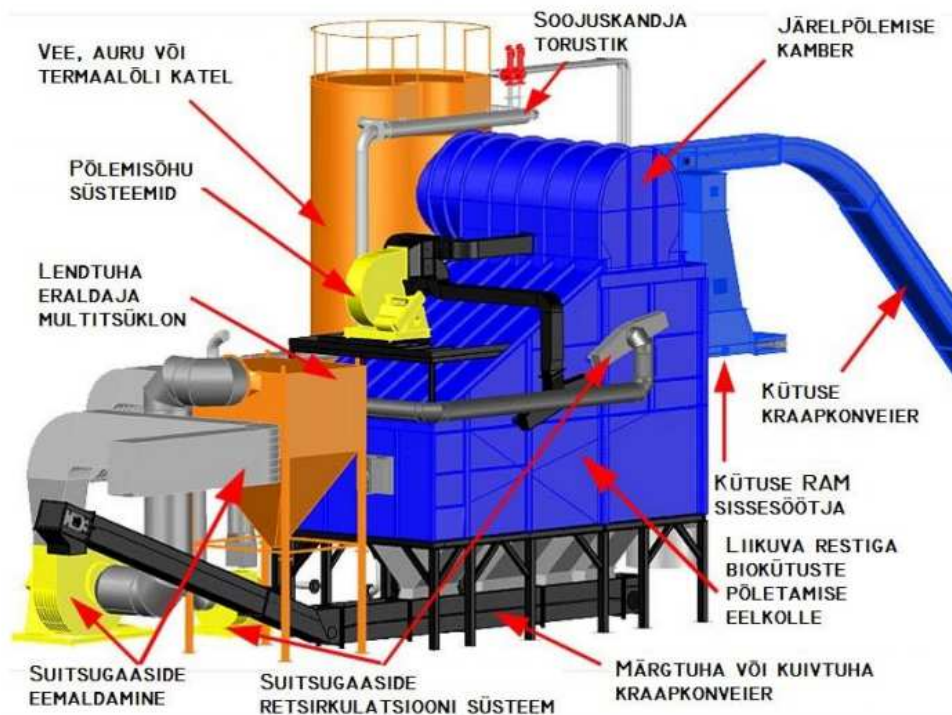
Kolde seintes võivad olla põlemisõhu kanalid, mille abil seinu mõningal määral jahutatakse, samas soojendatakse põlemisõhku ja paranevad märja kütuse põlemistingimused. Sellised

kolded sobivad mõõdukalt niiskete kütuste korral, näiteks punktis 3.1 kirjeldatud kütuse korral, mille niiskus on vahemikus 45-55%. Täiendavaks võimaluseks on koldes temperatuuri reguleerida suitsugaaside retsirkulatsiooni kasutades. Selle käigus vähendatakse soojuseraldust ja temperatuuri restil, mis omakorda suurendab soojuseraldust lendaine põlemise tsoonis. [12]

### 3.2.2 5 MW Biomassi katlamaja Tamulti PreBio SCF – 5. 50% näitel

Töös kasutan veekatla näitena AS Tamulti katlet PreBio SCF võimsusega 5 MW<sub>th</sub> (vt. sele 3.3). Antud peatükis kirjeldan katla ehitust ja omadusi. Katla ehituseks vajalik investeering on näidatud punktis 4.2.

Tamult/Saxlund'i biokütuste põletusseadme peakomponendid (näide)



Sele 3.3 Tamulti/Saxlundi põletusseadme peakomponendid [13]

Kütusena saab kasutada koort, haket ja saepuru. Resti soojuslik väljund nominaalvõimsusel etteantud kütuse niiskusel 50% on 5 MW. Kütuse fraktsioon kuni 100 mm. Saepuru osakaal kütusest võib olla kuni 70%. Sele 3.3 näitab Tamulti/Saxlundi biokütuste põletusseadmete

peakomponente. Kasutatakse liikuvat resti, mille elemente saab ringi pöörata. Rest on projekteeritud modulaarsena, koosneb malmvalu elementidest SAX, mis sisaldavad ligikaudu 27% kroomi. Tervet restipinda kasutatakse põlemiseks, mis annab maksimaalse soojusväljastuse. Kolde kütuse põletamise kasutegur on ligikaudu 97%. Termiliste lämmastikheitmete vähendamiseks kasutatakse suitsugaaside retsirkulatsiooni, millega vähendatakse põlemistemperatuuri. Kütus ladustatakse tõmbava või lükkava põrandaga aktiivlaos. Liikuv põrand töötab hüdraulilise süsteemi abil, mis liigutab lao/punkri põrandal olevaid liigutuselemente. Süsteem on modulaarne, mistõttu saab seda vajadusel suurendada. Suurim praktiline maht on ligikaudu 2000 m<sup>3</sup>. Transport laost koldeni teostatakse kett-kraapkonveieriga. Keti küljes olevad kraabid veavad materjali mööda konveieri põhja. Kütus söödetakse koldesse Tamulti/Saxlundi patenteeritud RAM süsteemi abil. [13]

Lisaseadmena on võimalik paigaldada suitsugaaside pesur, mis puhastab lahkuvaid suitsugaase ja tõstab efektiivsust. Antud juhul ei ole see otstarbekas, sest vastavalt selele 2.8 on katlamajja tagastuv veetemperatuur liiga kõrge. [13][11]

### **3.3 Elektri- ja soojuse koostootmine**

#### **3.3.1 Elektri ja soojuse koostootmise alused**

Elektri ja soojuse koostootmine (edaspidi lühemalt koostootmine) on protsess, mille puhul ühest seadmest väljastatakse kahte liiki energiat. Koostootmisjaama annab samaaegselt nii soojust kui mehhaanilist energiat. Seega on protsessi väljunditeks:

- Soojus, mida võib kasutada tehnoloogilistes protsessides, tarbevee soojendamiseks, kaugkütteks, kuivatamiseks ja absorptsioonil põhineva jahutusprotsessi käitamiseks.
- Mehhaaniline energia, mis tavaliselt muundatakse elektriks, kuid seda võib kasutada ka pumpade või kompressorite otseseks käitamiseks. [14]

Majanduslikult otstarbekamaks on muutunud suurema kasuteguriga ja alternatiivsete odavate kütuste baasil töötavad seadmed. Energia-ja tööstusettevõtete keskkonnamõjude leevendamise

seisukohalt on oluline et koos tarbitava kütuse koguse vähenemisega väheneb ka kahjulike ühendite emissioon. Elektrienergia tootmisel on kondensatsiooni-aurujõuseadmega elektrijaamade kasutegur 35-42%, gaasiturbiinidega elektrijaamade kasutegur 30-39% ja kombineeritud auru – ning gaasiturbiinidega elektrijaamade kasutegur 45-60%. Kaod tekivad põhiliselt madalatemperatuurilise heitsoojusega, mida oleks võimalik rakendada nii tööstuse tehnoloogilise soojusvajaduse kui küttevajaduse katmiseks. Mitmesugustes tehnoloogilistes protsessides tööstuse vajatakse soojust auruna temperatuuriga 100-200°C. Kütteks ja kuivatamiseks vajatakse soojust sooja veena temperatuuriga 70-130°C. Eraldi soojuse tootmise kasutegur on küllaltki kõrge – 85-92%, sest kaod piirduvad siin põhiliselt kadudega katlast lahkvate gaaside soojusega temperatuuril 100-180°C. Elektri ja soojuse tootmise protsesside kombineerimisel on võimalik saada kütuse kasutamise efektiivsuse (kogukasuteguri) tunduv tõus. Soojusenergia tootmiseks saab kasutada elektrienergia tootmise jääksoojust, mille ainsaks soojuskaoks on lahkvate gaaside soojus. Sellise protsessi kasutegur on 85-92%, mis tähendab tunduvalt kütuse kokkuhoidu võrreldes elektri ja soojuse eraldi tootmisega ja vähendab ümbruskonda paisatavate kahjulike hulka ning on tavaliselt majanduslikult kasulik. [14]

Koostootmisega elektrijaam on siiski märgatavalt kallim ainult soojust tootvast katlamajast. Seetõttu peaks sellise seadme ehitamisel olema kindlustatud kogu soojuskoormuse baasil toodetava elektrienergia müük. Võimalusi piirab asjaolu, et põhiline osa soojusest vajatakse kaugkütteks, mille soojuskoormus muutub aastaringselt sõltuvalt välistemperatuurist ning suveperioodil on soojustarve minimaalne. Üheks võimaluseks on tööstusettevõtete, haiglakomplekside ja kaubanduskeskuste koostootmisjaamad, kus toodetud elekter ja soojus kohapeal tarbitakse. JELD-WEN Eesti AS vastab nendele kriteeriumitele, sest soojuse tarbimine on aastaringselt vähemalt 1400 MWh (välja-arvatud juuli kuu, siis on kollektiivpuhkus) ja elekter tarbitaks osaliselt kohapeal. [14]

Soojuse ja elektri koostootmise eelised [15]:

- Energia muundamise suurem kasutegur.
- Väiksem keskkonna saastamine, eriti CO<sub>2</sub> emissioonide vähenemine.
- Kulude kokkuhoid, suurenev tööstus- ja äritarbijate konkurentsivõime, odavama hinnaga soojusenergia kodutarbijale.

- Elektri ülekandesüsteemide kadude vähendamine, elektritootmise detsentraliseerimine.
- Paranenud varustuskindlus.
- Väiksem kütusekulu ja sõltuvus kütuse impordist.
- Kohalike kütuste tootjate ja transportijate tootmise suurenemine, suurem tööhõive. [15]

### 3.3.2 Tõhusa koostootmise nõuded

Eestis on koostootmine reguleeritud 03.05.2007 vastuvõetud tõhusa koostootmise nõuete määrusega. Määrus lähtub euroopa parlamendi ja nõukogu direktiivist 2004/8/EÜ soojuse- ja elektrienergia koostootmise stimuleerimiseks siseturu kasuliku soojuse nõudluse alusel. Määruse üldsätted on järgnevad – tõhususe ja primaarenergia kokkuhoiu arvutamiseks kasutatavad tegurid määratakse normaaltalitluse tegelike mõõdetud andmete põhjal, välja arvatud summaarne kütuse energia, mille väärtus arvutatakse, aruandlusperiood on 1 kuu ja tõhusakoostootmise viiteväärtused korrigeeritakse EMHI veebilehel avaldatud välisõhu aasta keskmise temperatuuri järgi. [16]

Antud määrus hõlmab järgnevaid koostootmistehnoloogiad [16]:

- 1) kombineeritud tsükliga gaasiturbiin koos utilisaatorkatlagaga;
- 2) vasturõhuauruturbiin;
- 3) vaheltvõttudega auruturbiin;
- 4) gaasiturbiin koos utilisaatorkatlagaga;
- 5) sisepõlemismootor;
- 6) mikroturbiin;
- 7) Stirling-mootor;
- 8) kütuseelement;
- 9) aurumootor;
- 10) orgaanilised Rankine ringprotsessid;
- 11) muud tehnoloogiad või nende kombinatsioonid, mis vastavad koostootmise mõistele.

Koostootmisel tekkiva primarenergia sääst arvutatakse järgneva valemiga [16]:

$$PES = \left\{ 1 - \frac{1}{\frac{CHPH\eta}{REFH\eta} + \frac{CHPE\eta}{REFE\eta}} \right\} \times 100\%$$

Kus,

PES - primaarenergia sääst

CHPH $\eta$  – kasuliku soojuse kasutegur (viimase aasta kasuliku soojuse toodang jagatud kütuseenergiaga, mis kulus kasuliku soojuse ja elektri koostootmiseks).

REFH $\eta$  – viiteväärtus, iseloomustab soojuse eraldi tootmist.

CHPE $\eta$  – on koostoodetud elektrienergia kasutegur (koostoodetud elektrienergia viimase aasta kogus jagatud kütuseenergiaga, mis kulus kasuliku soojuse ja elektri koostootmiseks)

REFE $\eta$  – viiteväärtus, mis iseloomustab elektrienergia eraldi tootmist [16].

Koostootmine loetakse tõhusaks, kui [16]:

- 1) Koostootmistehnoloogiate 2 ja 4-8 aruandlusperioodi üldkasutegur on vähemalt 75% ja primaarenergia sääst vähemalt 10%;
- 2) Koostootmistehnoloogiate 1 ja 3 aruandlusperioodi üldkasutegur on vähemalt 80% ja primaarenergia sääst vähemalt 10%;
- 3) Tootmine väikekoostootmisjaamas või mikrokoostootmisseedmetega tagab primaarenergia säästu; [16]

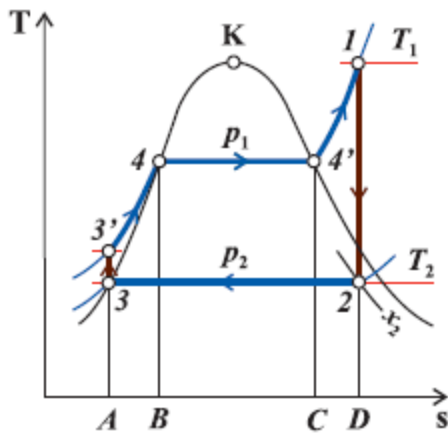
Koostootmise protsessis toodetud elektrienergia arvutamisel lähtutakse elektri-ja soojusenergia tegelikust suhtest. Kui koostootmisseedme elektri-ja soojusenergia tegelik suhe ei ole teada, võib statistiliseks aruandluseks kasutada määruses olevaid vaikeväärtusi. Viiteväärtused erinevatele kütustele elektrienergia eraldi tootmise korral on samuti esitatud määruses. [16]

### 3.3.3 Rankine'i tsüklil põhinev koostootmine

Aurujõuseadmete töö põhineb Rankine'i ringprotsessil. Sele 3.1 kujutab tagastatavat ülekuumendatud auruga ringprotsessi Ts –diagrammil. Antud protsess on sagedasti kasutatav praegustes soojuselektrijaamades. Auru algrõhk on kriitilisest rõhust madalam, algtemperatuur algrõhule vastavast küllastustemperatuurist kõrgem. [17]

Auru algoleku (Selel 3.4 punkt 1) määrab auru rõhk ja temperatuur. Aur paisub isoentroopselt algrõhult  $p_1$  turbiinis rõhuni  $p_2$  kondensaatoris (punkt 2), olles ülekuumendatud olekus kuni

lõikumiseni piirkõveraga. Sealt alates hakkab aur niiskuma, kuivusaste väheneb ja temperatuur alaneb.



Sele 3.4 Ülekuumendatud auruga Rankine'i ringprotsessi Ts-digramm [17]

Joon 2-3 kujutab auru isobaarset-isotermset kondenseerumist kondensaatoris, joon 3-3' vee rõhu isoentropset tõusu pumbas, joon 3-4' vee isobaarset kuumenemist kuni rõhule  $p_1$  vastava küllastustemperatuurini aurugeneraatori, joon 4-4' vee isobaarset-isotermset aurustumist ja joon 4'-1 auru isobaarset ülekumendamist aurugeneraatoris. Ringprotsessi antav soojushulk  $q_1$  (Selel 3.1 pindala  $A3'44'1DA$ ) koosneb kolmest soojushulgast, mida kasutatakse vee kuumutamiseks küllastustemperatuurini, vee aurustamiseks ja auru ülekuumutamiseks. Protsessist lahkuv soojushulk  $q_2$  esitab pindala  $D23AD$  ja sooritatud kasulik töö  $1233'44'1$ . [17]

Ainult elektrit tootvates jaamades paisub katlas genereeritud kõrgete parameetritega aur turbiinis rõhuni 2-5 kPa. Tekkinud auru madala temperatuuri tõttu ei kasutata. Madalarõhuline aur kondenseeritakse ja selles sisalduv soojus kantakse ära koos jahutusveega. [14]

Koostootmiseks kasutatakse vasturõhuturbiine ja reguleeritava vaheltvõtuga turbiine.

Vasturõhuturbiinis lõpetatakse auru paisumine kõrgemal temperatuuril ja rõhul kui kondensatsiooniturbiinis. Vasturõhu auru saab kasutada tööstuses erinevate protsesside läbiviimiseks või soojusvahetis kaugküttese või kuivatitesse mineva vee soojendamiseks.

Turbiini lõpprõhu suurus sõltub tarbija vajadusest, võrku antava vee temperatuurist. Turbiinil puudub madalrõhu osa ja kondensaator. Mida kõrgem on soojusvõrku antava vee temperatuur, seda kõrgem peab olema turbiini vasturõhk ja seda vähem toodetakse elektrienergiat. [14,15]

Reguleeritava vaheltvõtiga auruturbiinis eemaldatakse osa auru enne lõpprõhuni paisumist. Vaheltvõetud aur kasutatakse soojusvõrku mineva vee soojendamiseks või tööstusprotsessis. Sellise turbiini eeliseks vasturõhuturbiini ees on elektrilise koormuse sõltumatus välisest soojuskoormusest. Kui soojusvajadus puudub, siis töötab turbiin kondensatsioonirežiimis aga madalama efektiivsusega kui klassikaline kondensatsiooni turbiin. Turbiini maksimaalne sisemine suhteline kasutegur on reguleeritav vaheltvõttude koormamisel. Kondensaati jahutatakse gradiiris. Madala vaheltvõtu rõhu (0,07-0,25 MPa) korral sobib aur nii kütteks kui ka sooja veega varustamiseks. Tööstusliku vaheltvõtiga turbiinid on vaheltvõturõhuga  $< 0,6$  MPa. [14,15]

### 3.3.4 Koostootmisjaama näide - ICS Energietechnik 1 MW<sub>e</sub>

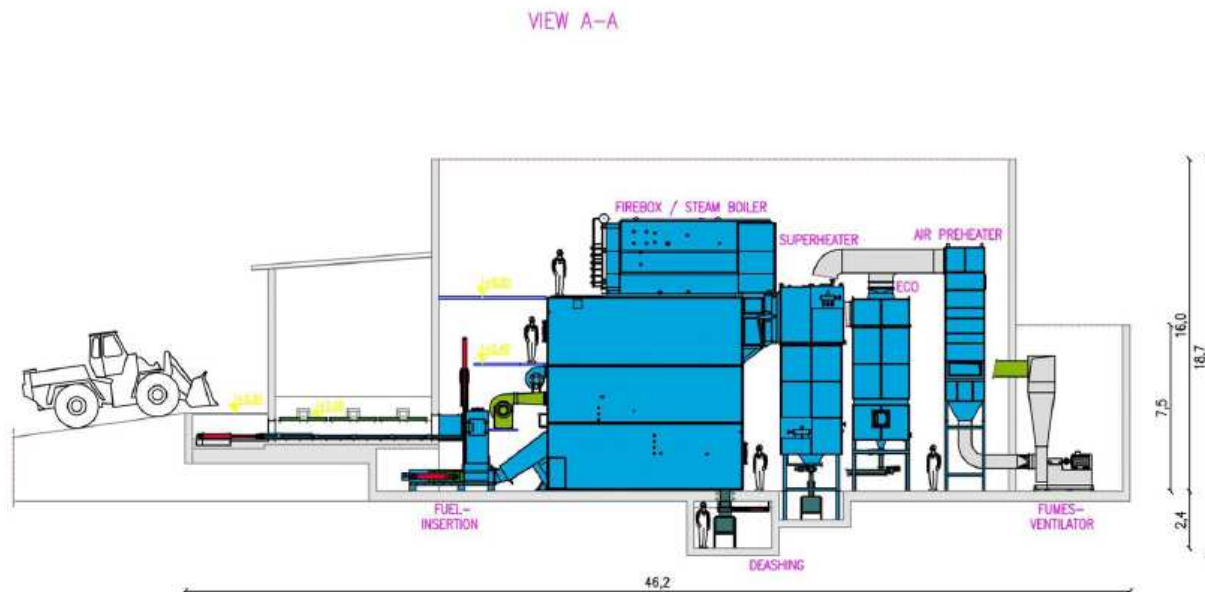
Töös toon koostootmisjaama näitena firma ICS Energietechnik jaama elektrilise väljundvõimsusega 1 MW<sub>e</sub> ja soojusliku võimsusega 5 MW<sub>th</sub>. Antud punktis kirjeldan jaama komponente ja omadusi. Jaama ehitamise investeeringu maksumus on toodud punktis 4.3. Jaam saab kütusena kasutada töötlemata puidujääke, puiduhaket ja puukoort. Lubatud suurim kütuse pikkusemõõt on 25 cm ja tuhasisaldus 5% kütusetüki massist. Üksikute koore tükkide pikkus võib ulatuda pikkuseni 100 cm. Jaama olulisemad parameetrid on toodud tabelis 3.3. [18]

Tabel 3.3 Näitena toodud koostootmisjaama tehnilised andmed [18]

Koostootmisjaama tehnilised andmed		
Elektriline väljundvõimsus	1000	kW <sub>e</sub>
Soojuslik väljundvõimsus	5000	kW <sub>th</sub>
Katla võimsus	6200	kW <sub>th</sub>
Jahutusploki võimsus	4000	kW <sub>th</sub>
Maksimaalne auru temperatuur	500	°C
Maksimaalne auru ülerõhk	35	bar
Sooja vee temperatuur	100/80	°C
Omatarve	130	kW <sub>e</sub>
Maksimaalne jahutusploki omatarve	30	kW <sub>e</sub>
Maksimaalne kütusetarve (w=50%)	3,1	t/h
Toorvee tarve	0,28	t/h



Jaama komponentide paiknemist iseloomustab Sele 3.5. Kütus tuuakse kütuselattu JELD-WEN Eesti AS puhul konveieriga. Kütuse pealeandmine katlasse toimub automaatselt hüdraulilise kraap-transportööri abil.

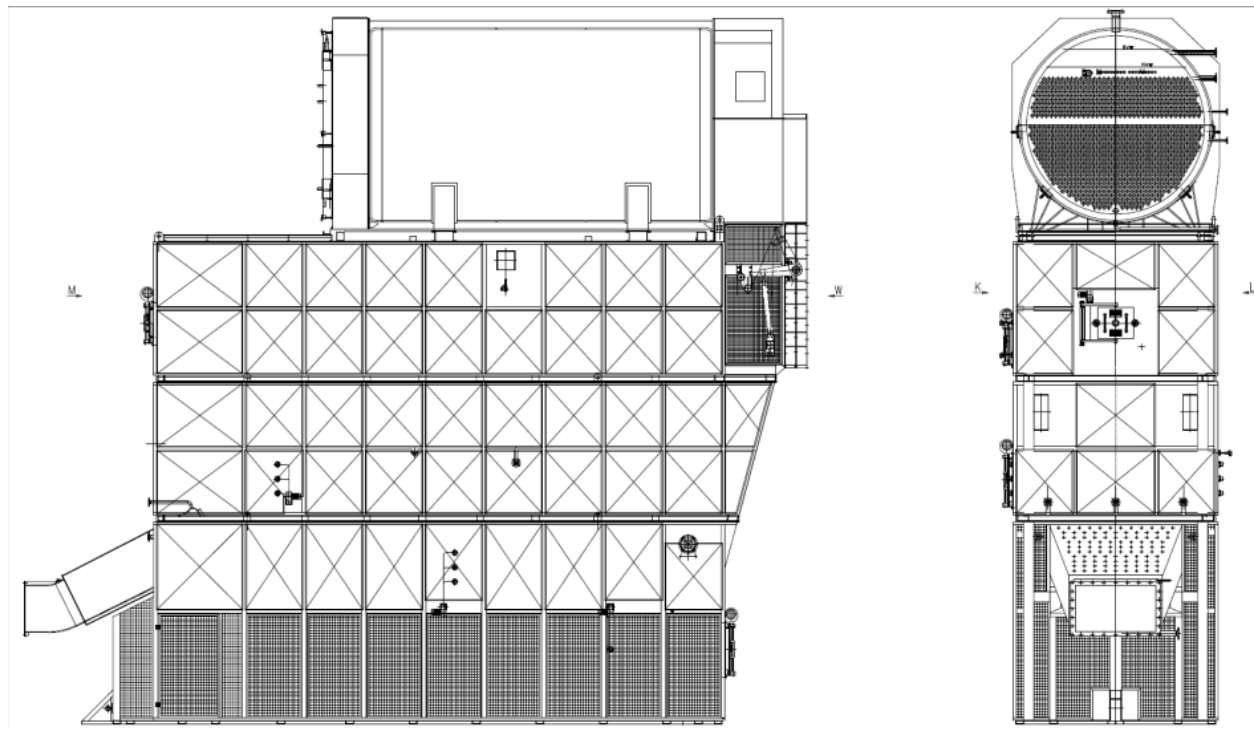


### Sele 3.5 Jaama komponentide iseloomustus [17]

Transportöör suunab kütuse konveieri abil põlemiskambrisse liikuvale põlemisrestile. Põlemiskamber on voodertatud põlemiskindlate savi-tellistega. Jaama komponentide paiknemist iseloomustavad sele 3.5 ja sele 3.6. Kütuse põlemisel tekkivad suitsugaasid suunatakse aurukatlasse, mis asub põlemiskambri peal (vt. Sele 3.6) Aurukatlas toimub soojusülekanne suitsugaasidelt veele, mis aurustub liigub aurülekuumendisse. Heitgaasid jahutatakse ökonomaiseris ja õhu-eelkuumendis. Jahtunud gaasid puhastatakse kahjulikest heidetest multitsüklonis ja elektrifiltris. Sealt liiguvad gaasid korstna kaudu atmosfääri. Sele 3.3 näitab täpsemalt põlemiskambri ja aurukatla ehitust. [18]

Põlemisel tekkiv tuhk suunatakse liikuva resti abil tuhakonteinerisse ( vt. Sele 3.5). Katlas tekkinud ülekuumendatud aur liigub mööda aurutorustikku auruturbiini, kus muudetakse mehhaaniline energia elektrienergiaks. Turbiinis väljuv paisunud aur kondenseeritakse soojusvahetis ja antakse soojale veele. Kondensaad liigub tagasi katlasse. Kogu süsteemi juhib

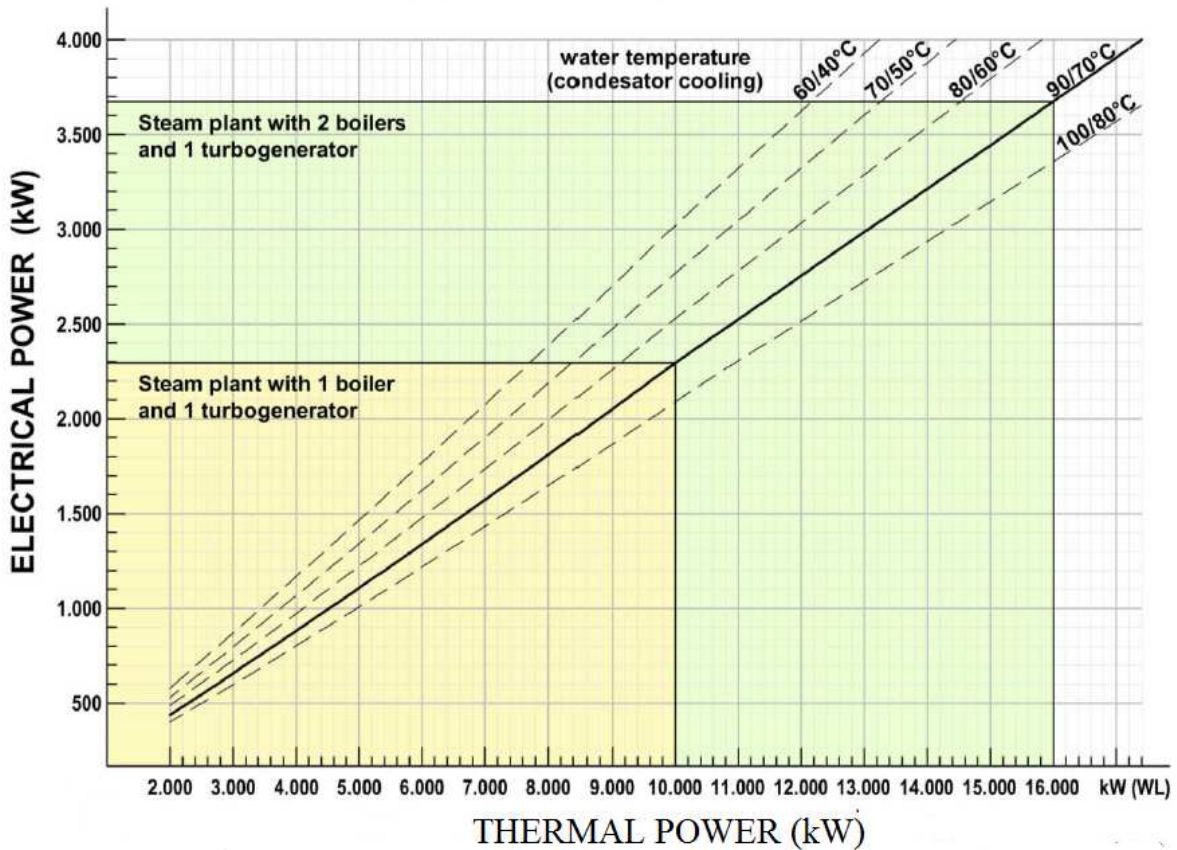
automaatika ( PLC – programmable logic controller). Kontrollisüsteem registreerib kõik andmed ja häiringud ja kuvab need arvuti programmis. Võimalik on ka jaama kaugjuhtimine [18]



Sele 3.6 Põlemiskambri ja aurukatla ehitus [18]

Punkti 3.2.3 järgi sõltub koostootmisjaama elektriline efektiivsus turbiinist väljuva auru kondenseerimise temperatuurist. Elektriline väljundvõimsus muutub ligikaudu 8% kondenseerimistemperatuuri muutuse 10 °C korral. Kuivatitesse mineva vee temperatuuri vähenemisel temperatuurilt 100 °C kuni temperatuurini 80 °C, suureneb elektriline väljundvõimsus ligikaudu 16%. Sele 3.7 näitab koostootmisjaama elektrilist efektiivsust erinevatel temperatuurigraafikute korral. Seel 3.7 on toodud välja jaama soojuslik ja elektriline võimsus temperatuurigraafikutel 100/80 °C, 90/70 °C, 80/60 °C, 70/50 °C, 60/40 °C. [18]

## TURBOGENERATOR DESIGN



Sele 3.7 Koostootmisjaama elektriline efektiivsus erinevate temperatuurigraafikute korral

Vastavalt selele 3.4 on koostootmisjaama võimsusega 5 MW<sub>th</sub> elektriline väljundvõimsus praegusel kuivatite temperatuurigraafikul 100/80°C 1 MW<sub>e</sub>. Kuivatite temperatuurigraafikul 80/60 °C oleks jaama elektriline väljundvõimsus aga 1250 MW<sub>e</sub>.

Toon näite kondenseerimistemperatuuride muutuse mõjust elektrilisele efektiivsusele Rakvere Pääkese tn koostootmisjaama tootmisandmete põhjal. 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 reaalajas 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 Maksimaalne ja minimaalne välistemperatuur olid vastavalt 27,6 °C ja -1,2 °C. [19]

Sisestatud soojusvõimsus leitakse järgneva valemiga: [19]

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

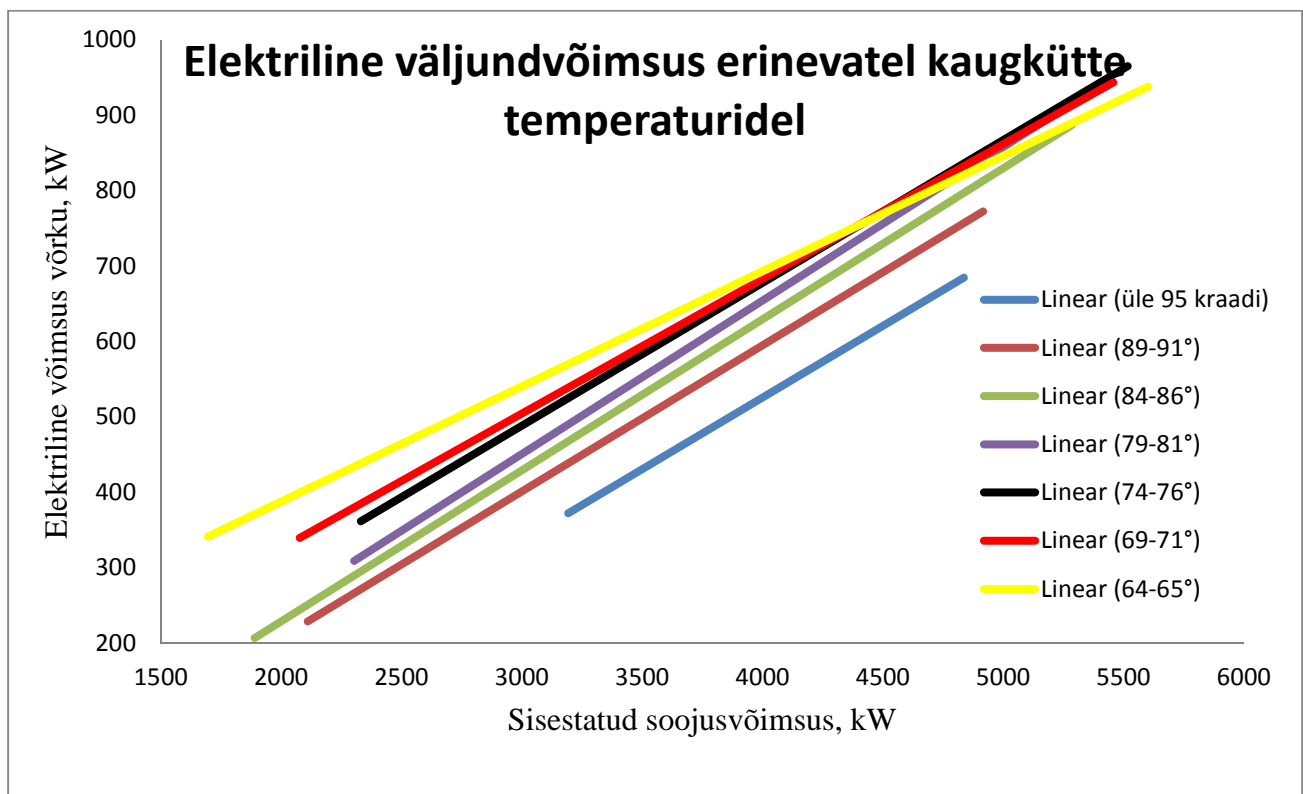
Kus  $Q$  on sisestatud soojusvõimsus [kW]

$P_s$ - soojuse väljundvõimsus [kW]

$P_e$  –elektri väljundvõimsus [kW]

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

Selel 3.8 on kujutatud jaama elektriline väljundvõimsus kaugkütte temperatuuridel 65 °C kuni 95 °C. Temperatuuri sammuks on 5 °C. Graafiku parema loetavuse tagamiseks, leian graafikute keskmised kasutades Exceli funktsiooni „add linear trendline.“



Sele 3.8 Koostootmisjaama elektrilise väljundvõimsus erinevatel kaugkütte vee temperatuuridel.

Sele 3.8 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 kondenseerumistemperatuuril 74-76 ° C. [19]

Töös on koostatud graafik elektrilise efektiivsuse sõltuvusest kondenseerumistemperatuurist (vt. sele 3.9).

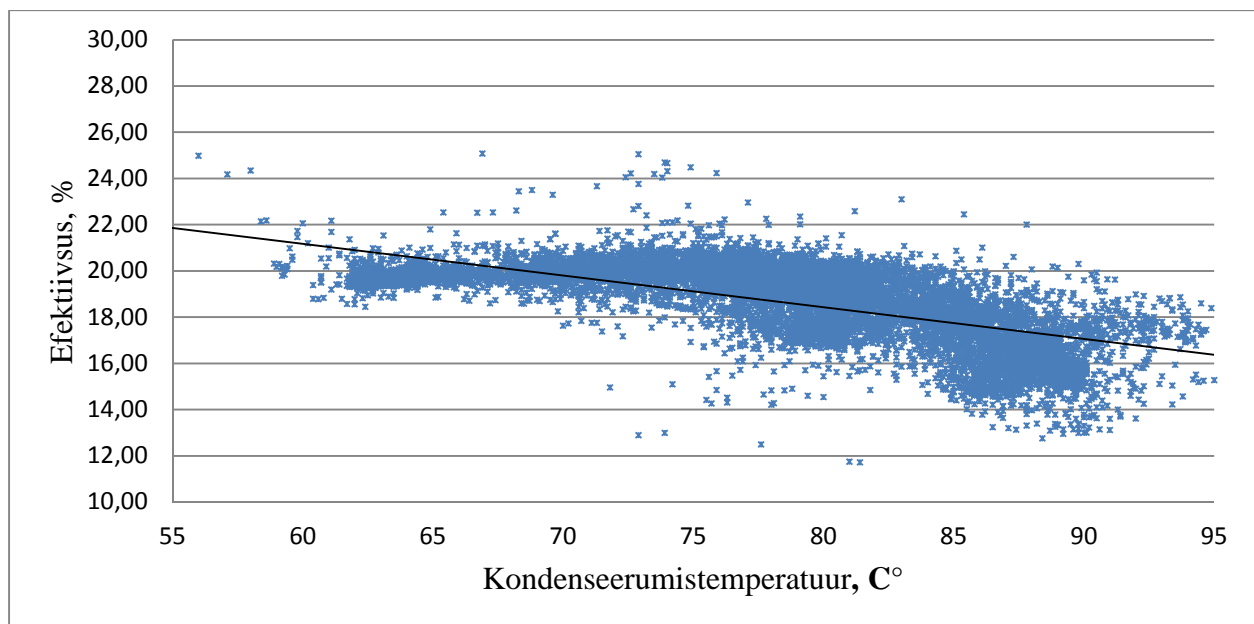
Efektiivsus on leitud kasutades valemit:

$$\eta = \frac{Q}{P_e} * 100$$

kus  $\eta$ - elektriline efektiivsus [%]

$Q$ - sisestatud soojusvõimsus [kW]

$P_e$ - Toodetud elektrivõimus [kW]



Sele 3.9 Efektiivsuse sõltuvus kondenseerumistemperatuurist. [19]

Vastavalt selele 3.9 väheneb koostootmisjaama elektriline efektiivsus kaugküttetemperatuuri tõustes. Katse tulemused ühtivad punktis 3.3.1 toodud teooriaga. JELD-WEN Eesti AS puhul sõltub koostootmise elektriline efektiivsus kuivatite temperatuurigraafikust, mis on sele 2.8 järgi 100/80 °C.

### 3.3 Koostootmine ORC( Organic Rankine´ Cycle) põhineva tehnoloogiaga

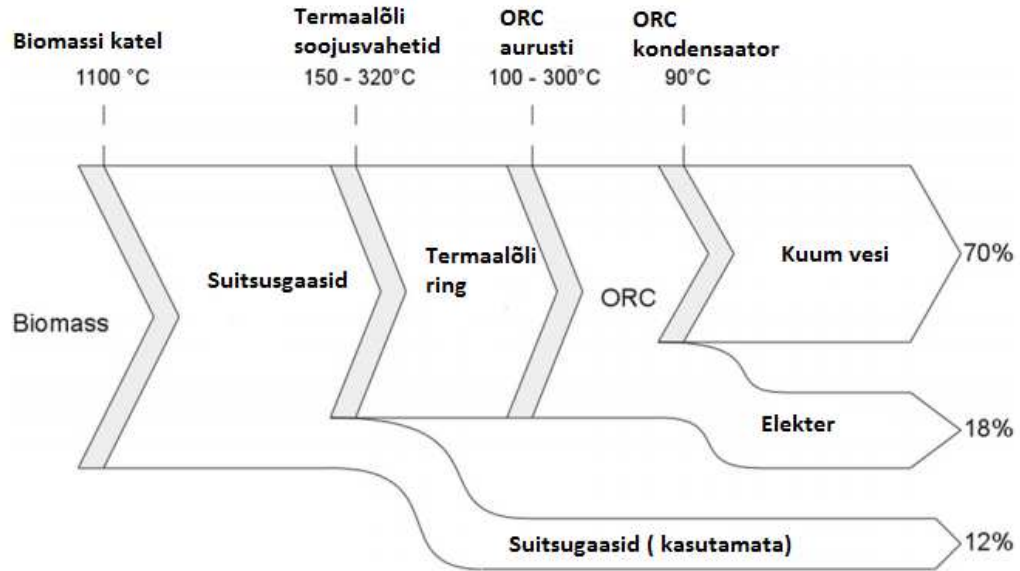
#### 3.3.1 ORC (Organic Rankine´ Cycle) teoreetilised alused

Orgaanilise Rankine´i tsükli teoreetilised alused ja komponendid (aurusti, kondensaator, turbiin ja pump) on sarnased Rankine´i tsükliga. Peamised erinevused on kasutatav soojuskandja, soojuskandja füüsikaliste ja keemiliste omadused, soojusallika temperatuur ja tsükli ehitus. Orgaaniline Rankine tsüklil põhinevas koostootmisjaamas on võimalik toota mehhaanilist energiat palju madalama temperatuuriga soojusallikat kasutades kui Rankine´i tsükli korral. [20]

Elektri- ja soojuste koostootmisel biokütusest on ORC tehnoloogiat kasutava koostootmisjaama komponendid järgnevad[21]:

- Biomass kütus põletatakse koldes, kolde ehitus on sarnane punktis xx. Kirjeldatud koldega;
- Koldes tekkivad suitsugaasid suunatakse termaalõli katlasse. Termaalõli eelised soojuskandjana on madal rõhk aurustis, suur inertus, võime kiirelt adapteeruda koormuse muutustega. Kuumutamine kuni temperatuurini 300 °C tagab õli pika kasutusaja.
- ORC moodulis muudetakse turbiini abil mehhaaniline energia elektrienergiaks. Turbiinis paisunud auru jahutatakse soojusvahetis veega. Soojusvahetis saavutab vesi temperatuuri 80 – 120 °C, mis on sobiv temperatuur kasutamiseks kaugküttes või kuivatusprotsessides. [21]

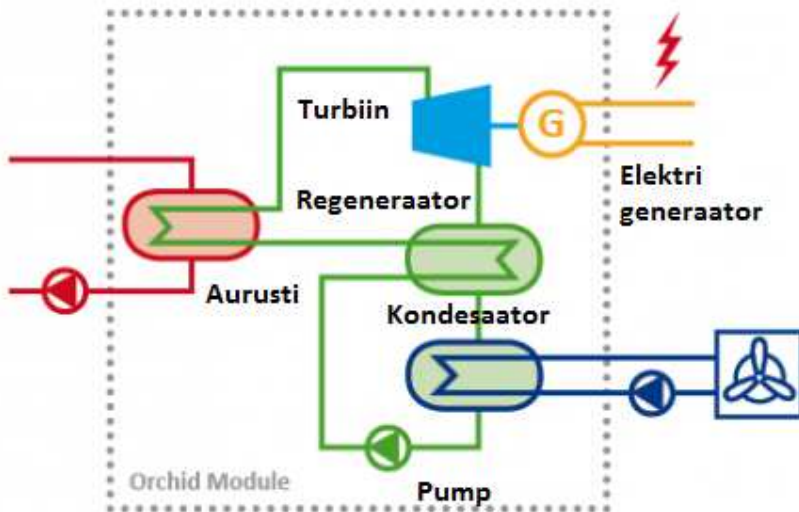
Sele 3.10 näitab, et koostootmisjaama elektriline efektiivsus on 18%, mis on väiksem kui Rankine´i tsüklil põhineva koostootmisjaamal aga jaama üldine kasutegur on väga kõrge – 88 %. See on palju kõrgem kui kondensatsioonielektriijaama kasutegur. [21]



Sele 3.10 Soojusenergia muundumine ja temperatuurid ORC koostootmis protsessis. [22]

ORC moodulis toimuvad protsessid, mooduli komponendid on toodud seel 3.11 [22]:

- Silikoonõli kuumeneb ja aurustub aurustis, kuumutamiseks kasutatakse termaalõli;
- Tekkinud aur suunatakse turbiini, aur paisub turbiinis ja käivitab elektrigeneraatori;
- Turbiinis paisunud aur läbib regeneraatori, eelsoojendades aurustisse liikuvat termaalõli;
- Aur kondenseerub tööstusprotsessis kasutatava vee poolt jahutatavas kondensaatoris;
- Termaalõli pumbatakse läbi regeneraatori aurustisse.



Sele 3.11 ORC mooduli komponendid [22]

ORC eelised võrreldes Rankine'i tsükliga järgmised [21] :

- Aeglasem turbiini pöörlemiskiirus, väiksemad mehhaanilised pinged ja kulumine.
- Elektrigeneraator ei vaja käigukasti, kuna turbiin pöörleb aeglasemalt.
- Turbiinis paisuva auru puudub niiskus, ei teki labade erosiooni.
- Pikk mooduli tööiga tänu orgaanilise vedeliku karakteristikutele, puudub turbiinilabade ja torustiku erosioon ja korrosiooni.
- Puudub vajadus veetöötuse ja deaeraatori järgi.
- Vaikne töörežiim.
- Minimaalne vajadus hoolduseks.

Lisaks :

- Madalam vedeliku aurustumistemperatuur, väiksem energikulu töövedeliku aurustamiseks [24].
- Tänu silikoonõli füüsikalistele – ja keemilistele omadustele puudub vajadus auru ülekuumenduseks [24]
- Võib kasutada lihtsa ehitusega aurusteid, kuna tiheduse erinevus vedel – ja aurufaasi vahel on väike. [22]

ORC puudused võrreldes Rankine tsükliga on järgmised:

- Silikoonõli viskoossus on suurem kui veel. Tuleb kasutada võimsamat tsirkulatsioonipumpa, selletõttu suureneb jaama omatarve ja väheneb elektriline efektiivsus. [24]
- Orgaanilised vedelikud on tuleohtlikud. Tuleb vältida silikoonõli auru lekkeid. [22]

ORC tehnoloogia kohaldatav ka järgnevate madalatemperatuuriliste soojusallikate korral [25]:

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



### 3.3.2 ORC tehnoloogias kasutatavad orgaanilised vedelikud

ORC süsteemi puhul on väga tähtis optimaalse töövedeliku valik. Sellest sõltub aurusti ja kondensaatori rõhk ning turbiini valik. Optimaalse vedeliku valik sõltub soojusallika liigist ja temperatuurist [20]

Olulised parameetrid töövedeliku valimisel on järgnevad [28]:

- Maksimaalne koostootmisjaama soojuslik – ja elektriline efektiivsus.
- Atmosfäärirõhust kõrgem kondenseerumise rõhk lekete vältimiseks.
- Suur auru tihedus ja sellest tulenev väike auru erimaht ja mahukulu. Suure auru tiheduse korral on vajavad soojusvahetid väiksema mahuga, seega ka odavamad. Kõrge erimahu korral suureneb rõhulang soojusvahetites ja sellega pumba vajalik töö.
- Töövedelikud jagunevad kuivadeks -, isoentroopilisteks- ja märgadeks töövedelikeks. Märgade töövedelike kasutamisel võivad auru paisumisel turbiinis tekkida turbiini kahjustavad tilgad. Selle vältimiseks tuleks kasutada auru ülekuumendust, mis muudabks seadme kallimaks. Kuivade ja isoentroopiliste vedelike kasutamisel vajadus ülekuumendamiseks puudub.
- Suur entalpia muutus turbiinis tagab suure elektrilise efektiivsuse.
- Suur vedeliku soojusmahtuvus parandab soojusülekannet soojusallikalt ja vähendab soojuskandja mahukulu.
- Keemiliselt stabiilne vedelik.

Kasutatavad vedelikud kuuluvad viite gruppi [26]:

- Süsivesinikud – butaan, pentaan ja heksaan
- Fluoritud süsivesinikud (enamasti külmaagensid)
- Aldehüüdid ja ketoonid
- Silikoonid
- Aromaatsed süsivesinikud

Biomassi põlemine toimub palju kõrgemal temperatuuril võrreldes termaalõli ja silikoonõli aurustumistemperatuuriga. Maksimaalne orgaanilise vedeliku töötemperatuur on 400 °C ja stabiilsustemperatuur sellest temperatuurist veidi kõrgem. Biomassi põletamisel tõuseb

põlemisgaaside temperatuur kuni 1000 °C. Ohutuse tagamiseks tuleb vältida põlemisgaaside mõjul termaalõli lokaalset ülekuumenemist ja vedeliku muutumist keemiliselt ebastabiilseks. Koostootmisrežiimi peab kondensaatori jahutusvedeliku lõpptemperatuur oleme piisavalt kõrge (70 – 120 °C), et tagada koostootmine. Selle-tõttu ei saa kasutada kõiki madalatele soojusallika temperatuuridele mõeldud töövedelike, auru rõhk kondensatsiooni temperatuuril on liiga suur. Paljud biomassi põletavad ORC jaamad kasutavad töövedelikuna oktametüültrisiloksaani, kuigi süsteemi soojuslik efektiivsus ja energiatõhusus on suhteliselt madalad. Oktametüültrisiloksaani parameetrid on toodud välja tabelis 3.4 [28]

Tabel 3.4 Oktametüültrisiloksaani parameetrid [27]:

Molekulivalem	$C_8H_{24}O_2Si_3$
Molaarmass	236,531 g/mol
Tihedus	0,82 g/cm <sup>3</sup>
Sulamistemperatuur	-82 °C
Aurustumistemperatuur	153 °C
Murdumisnäitaja	1,384
Leekpunkt	29 °C
Auru rõhk	50 mmHG (72 °C)
Aurustumissoojus	0,15 kJ/g
Erisoojus	32,92 kJ/g
Kriitiline temperatuur	289,75 °C
Kriitiline rõhk	1420 kPa

### 3.3.3 ORC tehnoloogial põhinev koostootmisjaam Rakvere näitel

Toon ORC tehnoloogial põhineva koostootmisjaama näite Rakvere Päikese tn koostootmisjaama põhjal. Jaam kuulub Adven Eesti AS-le, kus töö autor töötab. Jaama võimsus on sarnane JELD-WEN Eesti AS-le sobiva jaamaga. Päikese tn koostootmisjaam tagab Rakvere soojusvarustuse baaskoormuse. Suvise madala soojustarbimise tõttu ei tööta jaam aastaringiselt nimivõimsusel. Jaama põhimõtteline skeemo on toodud seel 3.14.

Koostootmisrežiimis [29]

- 4520 kW<sub>s</sub> Soojuslik võimsus

- 1035 kW<sub>e</sub> Elektriline võimsus

Soojuse tootmise režiimis 6400 kW<sub>s</sub> [29]

Koostootmisjaam töötab tõhusal koostootmisrežiimil, mille korral toodetakse maksimaalne kogus elektrit ning kogu turbiini heitsoojus kasutatakse ära Rakvere linna soojusvõrgu varustamiseks. Teise režiimina on projekteeritud sooja tootmise režiimi, mille korraõ lülitatakse ORC moodul süsteemist välja ja termaalõli soojus kantakse otse võrguveele läbi toru-torus tüüpi soojusvahetite. Samuti on jaam projekteeritud töötama režiimis, kus toodetakse ainult elektrit, sellisel juhul kasutatakse turbiini heitsoojus jahutamiseks õhkjahuteid. [29]

Tahke biomass kütuse eelkolle

Biomassi (hake, koor, saepuru, võsahake, turvas) põletakse eelkoldes soojusliku nimivõimsusega 7800 kW. Põlemine toimub liikuvale kald-trepp restil, mille elementide kroomi sisaldus on ~26%. Eelkolde põlemise kasutegur on 97% ja resti pindala 19,6 m<sup>2</sup>. Kütuse niiskuse vahemik on W<sub>t</sub> = 35 – 60%, niiskusel W<sub>t</sub> = 55% töötab eelkolle nimivõimsusel. [29]

Termaalõli katel

Termaalõli katel on konstruktsioonilt vertikaalne leek-suitsutorukatel, mille nominaalvõimsus on 4850 kW. Katel koosneb kolmest sektsioonist, mille moodustavad soojuskiiruslik osa ja konvektiivne osa. [29]

Kasutatav biokütus

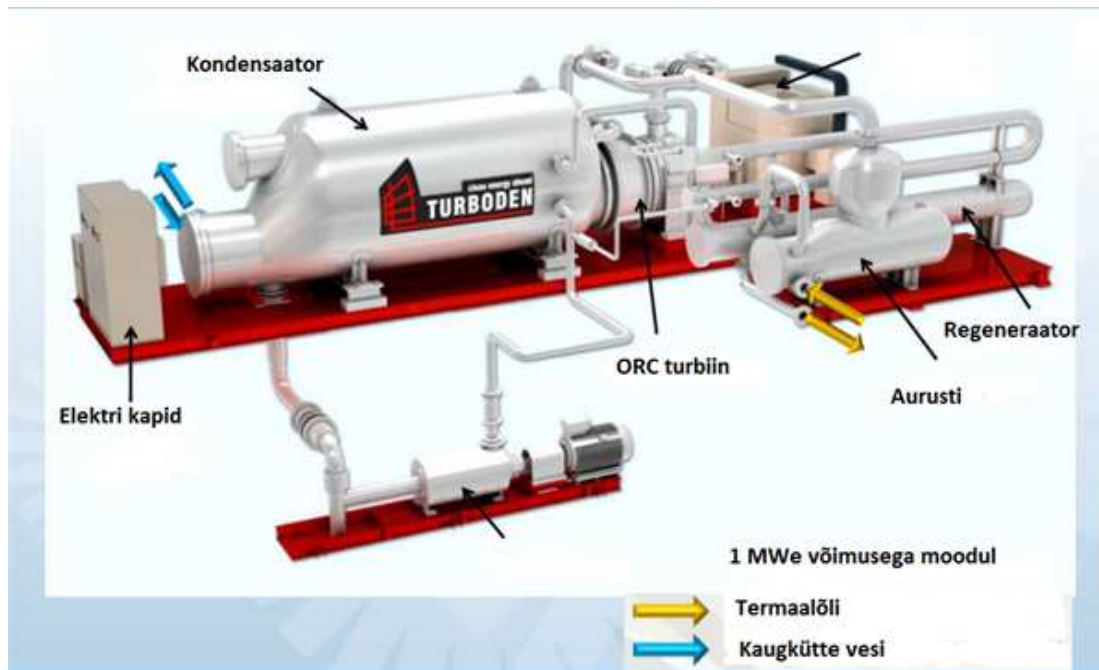
Kütusena kasutatakse puiduhaket. TTÜ soojustehnika instituudi poolt läbiviidud soojustehniliste katsetuste käigus määrati järgnevad kütuse parameetrid [30]:

- Niiskus W<sub>t</sub> = 44,80 %
- Tuha sisaldus A = 0,61 %
- Puistetihedus 321 kg/m<sup>3</sup>
- Ülemine kütteväärtus Q = 9,64 MJ/kg  
Q = 2,68 kWh/kg

Erinevatel aegadel kütusehoidlasse transporditud kütuse parameetrid võivad erineda.

ORC moodul

Tegemist on Itaalia firma Turboden mooduliga Turboden 10 CHP (vt sele 3.12). [31]



Sele 3.12 Turbodeni 1 MWe võimsusega mooduli joonis [31]

Antud mooduli parameetrid on järgnevad [31] :

- 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

Rakvere koostootmisjaama pilt on toodud seel 3.13. Seel on vasakult vaadates kondensaator, regeneraator ja aurusti. Turbiin ja generaator jäävad seel kondesaatori taha, pump asub põrandapinnast allpool.



Sele 3.13 Rakvere koostootmisjaama ORC moodul [5]

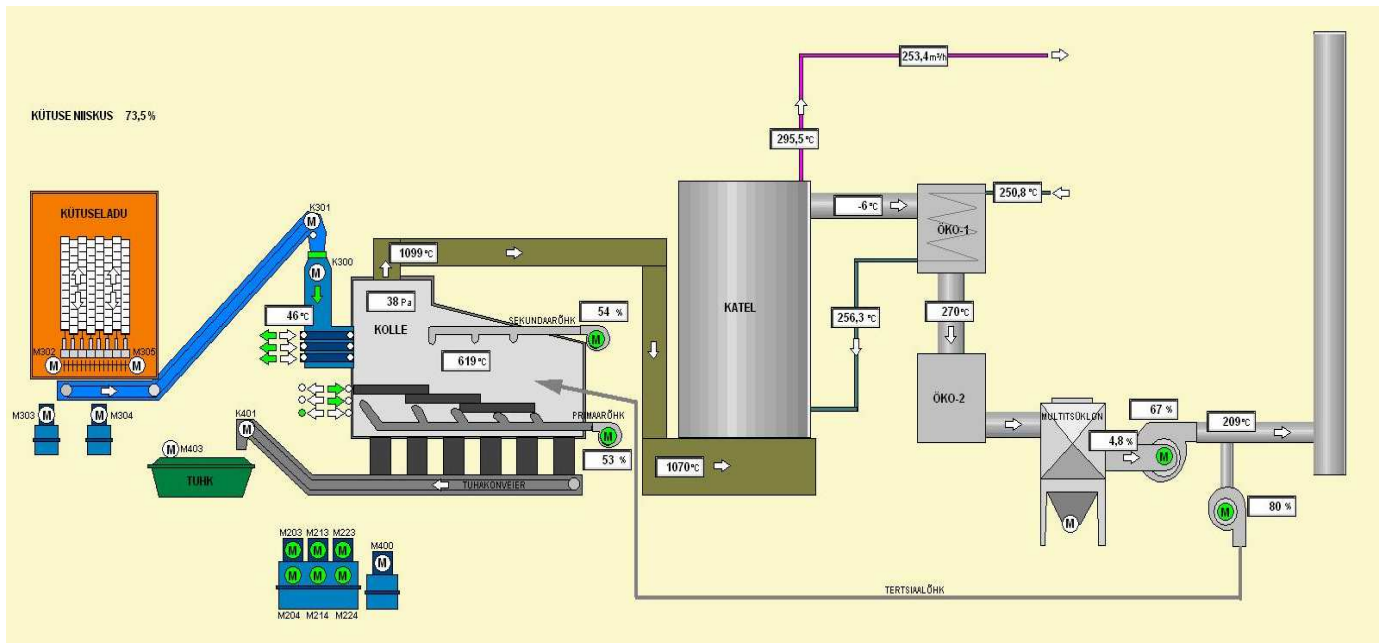
#### Suitsugaaside koostis ja ärajuhtimine

Termaalõli eelsoojendi ehk ökonomaiser koosneb kahest astmest ja asub pärast termaalõlikatelt (vt Sele 3.14 ). Mõlemas eelsoojendi astmes soojendavad katlast lahkuvad suitsugaasid termaalõli suurendades niimoodi katlakasutegurit. Lahkuvate gaaside voog on risti termaalõli voolusuunaga. [29]

Ökonomaiseril lahkuvad jahutatud suitsugaasid suunatakse multitsükklonisse, mis puhastab lahkuvad gaasid lendtuha osakekestest. Multitsükkloni puhastusaste jääb vahemikku 80-90 %., millega tagatakse lendosade sialdus tema järel  $< 300 \text{ mg/nm}^3$ . Peale puhastamist suunatakse gaasid korstnasse.[29]

TTÜ soojustehnika Instituudi poolt läbiviidud suitsugaaside koostise mõõtmistest selgub [30] :

- Temperatuur pärast tsüklonit 211 °C
- Hapniku sisaldus 5 %
- H<sub>2</sub>O sisaldus 19 %
- CO 22 mg/Nm<sup>3</sup>, NO<sub>x</sub> 295 mg/Nm<sup>3</sup>, 6 % CO<sub>2</sub>
- Tuha põlemata osa protsent 9 %
- Kasutegur kaudse soojusbilansi alusel 86,8 %.



Sele 3.14 Rakvere Pääkese tn. koostootmisjaama osaline skeem [16]

### 3.3.4 JELD-WEN Eesti AS-le sobilik ORC moodul

Sisestades firma Turboden kodulehel asuvat kalkulaatorisse (<http://www.turboden.eu/en/rankine/rankine-calculator.php>) punktis 2.2.4 JELD-WEN Eesti AS energia tootmise ja tarbimise andmed, saan tulemuseks, et sobivaks mooduliks on Turboden 7 CHP Split moodul. Kuivatite töötemperatuuril 100/80 °C on mooduli elektriline väljundvõimsus 660 kW<sub>e</sub>. Valides töötemperatuuriks graafiku 80/60 °C on mooduli elektriline väljundvõimsuse 729 kW<sub>e</sub>. Elektrilistele võimsustele vastavad soojuslikud väljundvõimsused 3225 kW<sub>th</sub> graafiku 100/80 °C korral ja 3146 kW<sub>th</sub> graafiku 80/60 °C korral. [31]

### 3.4 Kuivatite töötemperatuuri alandamise võimalused

Punktide 3.3.3 ja 3.3.4 kohaselt on efektiivsel koostootmisel väga oluline võimalikult madal tarbitava sooja vee temperatuur. Hetkel on sele 2.8 järgi kuivatite temperatuurigraafik 100/80 °C. Perioodilise kamberkuivatuse tsükkel koosneb kambri ülevaatusest, saematerjali sisselaadimisest, puidu algkuumutamisest, kuivatamisest, töötlustest sisepingetest vabanemiseks, konditsioneerimisest, jahutamisest ja materjali väljalaadimisest. Kuivatusprotsess viiakse läbi kindla režiimi järgi. Kuivatusrežiim on parameetrite kogum, mis tagab materjali soovitud lõppniiskuse ja kvaliteedi võimalikult lühikese ajaga. Reguleerida on võimalik kuivatuskeskkonna temperatuuri ja suhtelist niiskust. Temperatuuri reguleeritakse kalorifeeride temperatuuri reguleerides ning suhtelist niiskust õhu sisselaske- ja agensi väljalaskeavade avatust muutes või kuivatisse vett pihustades. Kuivatusrežiimi intensiivsus suureneb temperatuuri tõusuga ja suhtelise niiskuse vähenemisega. Kuivatusrežiimi intensiivsust piirab sisepingete kasv ja sellest tekkinud mõju materjali kvaliteedile. Kuivatuse algstaadiumis on sisepingete oht suurim ja kuivatuse lõpus tõuseb materjali tugevus, seega on otstarbekas kasutada kasvava intensiivsusega režiime. Konkreetse režiimi valikul tuleb arvesse võtta materjali ristlõiget. Vastavalt punktidele 2.3.1 kasutatakse JELD-WEN Eesti AS tootmisprotsessis saematerjali ristlõikega 19\*75 - 65\*240 mm, seega varieerub kuivatusrežiimi intensiivsus vastavalt ristlõikele. [32]

Kuivatite tsirkulatsiooniseadmetena kasutatakse ventilaatoreid ja kalorifeere. Kalorifeere võib jaotada vee-, auru- ja elektrilisteks kalorifeerideks. Kuivatites kasutatakse enamasti veekalorifeere, milles tsirkuleeriv katlamajast saadav kuum vesi temperatuuriga 90-100 °C. Täpsed kuivatusrežiimid erinevale materjalile on, lähtudes pikaajalisest kogemusest, välja töötanud kuivateid tootvad firmad ning antakse kaasa kuivati ostul kuivatusprotsessi juhtimisprogrammiga. Temperatuuri alandamine nõuaks sama tootmismahu suuremat kuivatite pinda. [32]

Soojuskulu kuivatamiseks on saematerjali ristlõikest. Rohkem soojust kulub õhukeste materjalide kuivatamiseks, kuid need osutuvad tavaliselt ka kõige kiiremini kuivavateks. Tabelis 3.5 on toodud näide puidu kuivatusrežiimi tabelist. Tabelis on toodud puidu keskmine niiskus (leitud alg- ja lõppniiskuse järgi), materjalile lubatud kõrgeim agensi temperatuur  $t_{agens}$ , agensi

suhteline algniiskus  $\Phi$  ja psühromeetriline vahe  $\Delta t$  (agensi temperatuuri ja märgtermomeetri temperatuuri vahe).

Tabel 3.5 Puidu kuivatusrežiimide tabel [32]

Puidu keskmine niiskus, %	Parameeter	Materjali paksus, mm							
		< 22	22...25	25...32	32...40	40...50	50...60	60...75	75...100
> 35	$t_{agens}$ °C	83	79	79	75	73	71	64	55
	$\Delta t = t_a - t_m$ °C	9	7	6	5	5	4	3	2
	$\Phi$ %	0,68	0,73	0,77	0,8	0,8	0,83	0,86	0,9
35...25	$t_{agens}$ °C	88	84	84	80	77	75	68	58
	$\Delta t = t_a - t_m$ °C	14	12	11	10	9	8	7	5
	$\Phi$ %	0,55	0,59	0,62	0,64	0,66	0,7	0,71	0,77
< 25	$t_{agens}$ °C	110	105	105	100	96	94	85	75
	$\Delta t = t_a - t_m$ °C	36	33	32	30	28	27	24	22
	$\Phi$ %	0,24	0,26	0,27	0,29	0,21	0,32	0,33	0,34

Vastavalt tabelile 3.x5ei ole kamberkuivatusel temperatuuride alandamine võimalik, kuna JELD-WEN Eesti AS kuivatatava materjali ristlõike variatsioon on vahemikus 19\*75 - 65\*240 mm ja agensi temperatuurid tõusevad üle 100 °C. Samuti on kuivatatava saematerjalide kvaliteedinõuded uksetööstuses väga kõrged. Olemasolevate kuivatite temperatuuride alandamiseks tehniliselt ja majanduslikult otstarbekad võimalused puuduvad. [32]



## 4 MAJANDUSLIKU TASUVUSE ANALÜÜS

### 4.1 Majandusliku tasuvusanalüüsi alused ja komponendid

Majandusliku tasuvuse analüüsi aluseks on JELD-WEN Eesti AS praeguse soojushinna arvutamine. Ettevõtte tegelik soojuse on konfidentsiaalne, seega kasutan soojuse hinna arvutamiseks kütuse turuhindasid ja Adven Eesti AS ekspertide hinnaguid katlamaja hooldus ja muudele kuludele. Seejärel arvutan uue soojuse hinna uue kütuse kasutuselevõtmisel. Uus soojushind arvesta ka laenu tagasimakseid. Võrdlen praegust ja uut soojuse hinda ning hindan uue soojuse hinna põhjal koostootmise majandulikku tasuvust. Arvutused sooritatakse programmiga MS Excel.

#### 4.1.1 Majandusliku tasuvusanalüüsi teoreetilised alused

Investeeringu tasuvusajaks nimetatakse aega, mis kulub investeerimiskulutuste tagasiteenimiseni normaalse eksploatatsiooni käigus. Kasutatakse kaht tasuvusaja mõistet: diskonteerimata ehk lihttasuvusaeg ja diskonteeritud tasuvusaeg. Lihttasuvusaja valem:

$$T = \frac{I_0}{a}$$

kus  $T$  -lihttasuvusaeg,

$I_0$ - investeeringu suurus,

$a$ - iga aastane tulude ja kulude vahe.

Oma lihtsuse tõttu kasutatakse antud valemit projekti tasuvuse esmaseks hindamiseks. Tegelikud laenu tagasimaksed sisaldavad laenuprotsente ning projekti diskonteeritud tasuvuaeg osutub pikemaks. [12]

Raha reaalsel väärtust ajahetkel, kui arvutust tehakse nimetatakse tema nüüdis – ehk diskonteeritud väärtuseks. Rahavoogude nüüdisväärtus arvutatakse valemiga [33]:

$$F_n = P \cdot (1 + i)^n = \frac{P}{i(i; n)}$$

kus,  $F_n$ - Raha väärtus  $n$  aasta pärast [€],

$P$ - nüüdis- ehk diskonteeritud väärtus,

$i$  – diskonteerimismäär,

$n$  – aastate arv.

Kui erinevate aastatel tehtavad rahasissevood on võrdsed ehk [33]:

$$F_1 = F_2 = F_3 = \dots = F_n = a,$$

Siis saam kasutada konstantsete aastamaksete valemit [33]:

$$P_a = \sum_{k=1}^n a * (1 + i)^{-k} = a * \frac{1 - (1 + i)^{-n}}{i} = a * I(i; n)$$

kus,

$P_a$ -diskonteeritud rahavoogude summa [€]

$a$ - rahasissevoogude väärtus [€/a]

WACC (inglise keeles *weighted average capital cost*) ehk kapitali kaalutud keskmine hind väljendab ettevõtte poolt kasutatud finantseerimis- ja kapitaliallikatele tehtud kulutusi (võlg ja aktsiakapital). See arvestab eri kapitaliliikide osatähtsust ja väljendub suuruses, mis on aksepteeritav investoritele. Praktikas väljendatakse kapitali hinda protsendina. WACC on sõltuvuses finantseerimisallikate osatähtsusest ja hinnast firma kapitali struktuuris. WACC leitakse järgneva valemiga [34] :

$$WACC = w_d k_d + w_c k_c + w_e k_e$$

kus,

$k_d$  – laenu hind, [€]

$k_c$  – aktsiakapitali hind, [€]

$k_e$  – eelisaktsia hind, [€]

$w_d, w_c, w_e$  – vastavad kaalud

Sooritatavas tasuvusanalüüsis määrati WACC väärtuseks 8,4%.

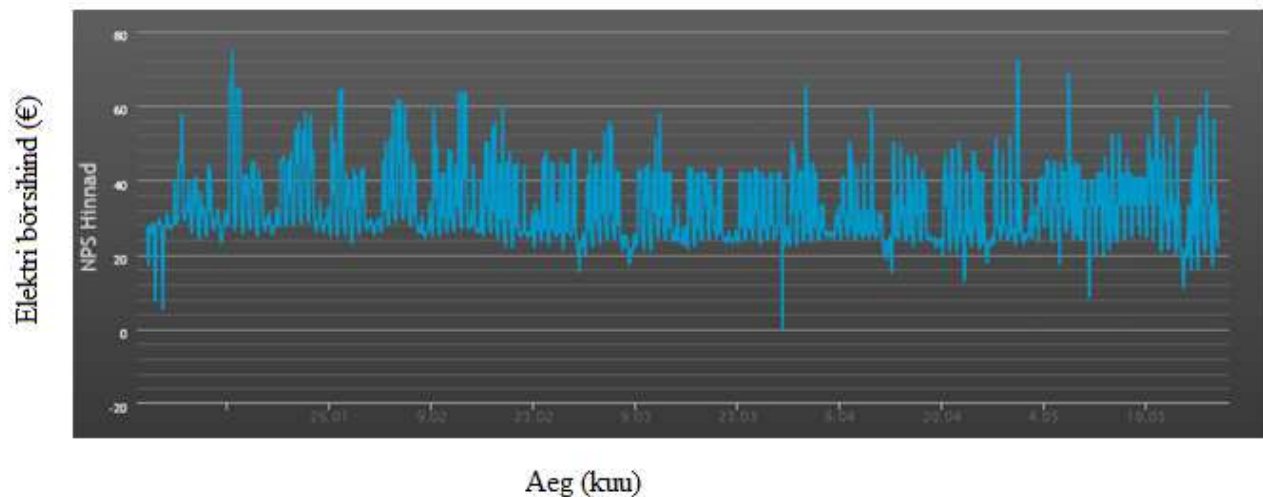
#### 4.1.2 Majandusanalüüsi algandmed

Algandmed on pärit Adven Eesti AS andmebaasist ja avalikult saadaval olevatest allikatest. Kütuste hinnad on võetud vastavalt hetke turuhindadele. Hinnad on küsitud järgnevatelt ettevõtetelt: Adven Eesti AS, AS Reinpaul, OÜ Purutuli. Katlamajade ja koostootmishinnad on määratud Adven Eestile tehtud hinnapakkumiste ja teostatud projektide ajaloo põhjal. Hoolduskulude hinnad põhinevad Adven Eesti pikaajaliste kogemustega ekspertide hinnagutel. Toodetava ja tarbitava soojuse võimsused on pärit JELD-WEN Eesti AS-lt. JELD-WEN Eesti AS hetkel toodetava soojuse hind on konfidentsiaalne.

#### 4.1.3 Elektri hind

Elektri hinna määramiseks kasutan Eleringi kodulehel asuvad Rakendust „Dashboard“. Antud rakendusel on toodud elektri hind elektribörsi Nord Pool Spoti hinna järgi. Sele 4.1 näitab 2015. aasta elektri hinna graafikut. Samuti on rakenduses toodud elektri hind alates 2012. aastast iga tunni aja tagant. Kasutades antud andmeid leian 2014. ja 2015. Aasta keskmise elektri hinna.

**Elektri börsihind 2015.a**



Sele 4.1 2015. aasta elektri hind börsil Nord Pool Spot. [35]

Kasutades Eleringi andmeid leian 2014. aasta ja 2015. aasta keskmised elektri hinnad:

- 2014. aasta keskmine elektri hind on ligikaudu 38,00 €.
- 2015. aasta keskmine elektri hind on ligikaudu 33,00 €. [31]

Elektrituruseaduse §59 alusel maksab Elering taastuvate energiaallikate kasutuselevõtuks, energiasektori efektiivsemaks muutmiseks ja sisemaise varustuskindluse/võimsuse piisavuse tagamiseks taastuvatest energiaallikatest elektri tootjatele taastuenergia toetust. Toetuse rahastamisest tekkiva kulu kannab tarbija vastavalt võrguteenuse tarbimise mahule ning otseliini kaudu tarbitud elektrienergia kogusele. Koostootmisrežiimil biomassist on toetuse määr 53,7 €/MWh (Pärast 31.12.2010 biomassist elektrienergia tootmist alustanud tootja võib saada toetust ainult koostootmisrežiimil toodetud elektrienergia eest). Majanduslikus analüüsis kasutatav elektri hind on 2014. börsi keskmise hinna ja taastuenergia toetuse summa [35]:

$$38,00 + 53,7 = 91,7 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$$

#### 4.1.4 Keskkonna Investeeringute Keskuse toetused

Majandusanalüüsi tegemisel on väga suur tähtsus Keskkonna Investeeringute Keskuse (KIK) toetuse suurusel. Keskkonna programmi järgi toetab KIK elektri ja soojuse koostootmise arendamist ning katlamajade rajamist ja üleviimist taastuval kütusele. Finantseerimise korra punkti 4.10 muutus on järgnev: elektri ja soojuse koostootmise arendamisel, katelseadme või katlamaja üleviimisel taastuval kütusele või taastuval kütusel töötava katlamaja rajamisel peab omaosalus olema 50% projekti abikõlblike kulude maksumusest. Praktika on näidanud, et koostootmisjaamade rajamisel on KIK-i toetus 40%. [36]

#### 4.1.5 Kuiva kütuse müümine pelletitehasele

Märja kütuse kasutusele võtmisel jääb praegu biomassi katlas kasutatav 10% niiskusega kütus ilma kasutusest. Hetkel kasutusel olev saematerjali järeltöötlusel tekkiv okaspuu saepuru ja

hõõvlilaast on ideaalne tooraine pelletite tootmiseks. Pelletid ehk saepurugraanulid on väikesed 6-10 mm läbimõõduga silindrilised pulgad, mille tootmiseks kasutatakse metsa – ja puidutööstuses tekkivat saepuru ning hõõvellaastu. Puidutööstuse jääkmaterjal jahvatatakse ja pressitakse suurel rõhul pelletiteks. [37]

Pelletitööstused ostavad punktis 2.2.1 kirjeldatud kütust sisse ligikaudse hinnaga 17-15 €/MWh. Hind ei sisalda materjali transporti. Arvestan analüüsis kuiva kütuse hinnaks koos transpordiga 15,5 €/MWh. Majandusanalüüsis arvestan nn. märja kütuse (niiske saepuru ja koor) hinnaks 7 €/MWh. Firma aastane soojustoodang kuivast kütusest on ligikaudu 23 000 MWh.

Märja kütuse kasutuselevõtmisel ja kuiva kütuse müümisel pelletitehasele oleks saadav tulu:

$$\left(15,5 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} - 7 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}\right) * 23\,000 \text{ MWh} = 195\,500 \text{ €/a}$$

#### 4.1.6 Praegune soojuse hind

Praeguse soojuse hinna arvutan vastavalt kasutatava kütuse turuhinnale ja Adven Eesti AS ekspertide hoolduskulude hinnangule. Kütuse turuhind on vastavalt Adven Eesti AS hinnapäringute andmebaasile 16 €/MWh. Arvestan katha vanuse tõttu kasuteguriks 83%. Kütuse hinnaks kujuneb  $16 \text{ €/MWh} : 0,83 = 19,3 \text{ €/MWh}$ . Kütusehinnale lisanduvad hoolduskulu, varuosade kulu ja tööjõu kulu. Tabel 4.1 näitab majandusanalüüsis kasutatava praeguse sooja hinna kujunemist.

Tabel 4.1 praeguse soojuse hinna komponendid

Komponent	Hind €/MWh
Kütuse hind	19,3
Katlamaja elektrikulu	2,0
Hooldus ja varuosad	3,5
Tuhaärastus, saastetasud	2,0
Personal	1,7
<b>SUMMA</b>	<b>28,48</b>

## 4.2 5 MW katlamaja majanduslik analüüs

Investeeringu hind vastavalt Adven Eesti AS esitatud hinnapakumistele on 1 600 000 €. Katlamaja kirjeldust ja andmeid vaata punkt 3.2.2 Investeering sisaldab eelkolde, leek-suitsutoru veekatla, abiseadmete, katlamaja hoone ja ühendustorustike maksumust. Analüüsis arvestan oma kapitali kulu vastavalt punktile 4.1.1  $wacc=8,4\%$  ja lepinguperiood 12 aastaks. Oma kapitali hinna leian Exceli funktsiooni PMT abil. Oma kapitali hinnaks tuleb 18 060 €/kuus. Leian selle alusel oma kapitali hinna MWh kohta, mis tuleb 9,42 €/MWh.

Tabel 4.2 Uue kütuse hind koos kapitali kulu.

Komponent	Hind €/MWh
Kapitali kulu	9,42
Kütuse hind	8,4
Katlamaja elektrikulu	2,0
Hooldus ja varuosad	3,5
Tuhaärastus, saastetasud	2,0
PLC kontrollid ja SCADA	1,5
Personal	1,7
SUMMA	28,55

Võrreldes tabelleid 4.2 ja 4.1 selgub, et uue kütuse hind koos oma kapitali hinnaga on võrden vana kütuse hinnaga. JELD-WEN-ile toob kasumit vana kütuse müük pelleti tehasele, mille tulu punkti 4.1.5 järgi on 195 500 €/a. Arvestades sellepõhjal lihttasuvusaeg vastavalt punktile 4.1.1:

$$\frac{1600000 \text{ €}}{195\,500 \text{ €/a}} = 8,18 \text{ a}$$

### 4.3 Koostootmisjaama majandulik analüüs

Investeeringu maksumus on on toodud firma ICS Energietechnik koostootmisjaama võimsusega 1 MW<sub>e</sub> hinnapakumise põhjal. [18]

Tabelis 5.3 on toodud koostootmisjaama ja ehituse maksumus

Koostootmisjaama ja ehituse maksumus	Investeering €	Hooldus % / a	Hooldus € / a
CHP 1.000 kW <sub>e</sub>	4 964 000	1,5%	74 460
Toruühendused tarbijatega	100 000	1,0%	1 000
Vahesumma	5 064 000		
<b>EHITAMISE MAKSUMUS</b>			
Maa- ja kaevetööd	100 000	1,0%	1 000
Hoone ja kõrvalehitised	800 000	0,5%	4 000
Elektrivarustus, maja sisetööd, valgustus ja soojusvarustus	200 000	1,0%	2 000
Elektriühendus võrguga, trafod, alajaamad	150 000	2,0%	3 000
Platvormid,	150 000	3,0%	4 500
Muud kulud	100 000	0,0%	0
vahesumma	1 500 000		
<b>Lisa kulud</b>			
Finantseerimiskulu	200 000	0,0%	0
Planeerimine, projekteerimine, kooskõlastamine	350 000	0,0%	0
Muud kulud	200 000	0,0%	0
Vahesumma	750 000	0,0%	0
<b>Investeeringu kogusumma</b>	<b>7 314 000</b>	<b>1,2%</b>	<b>89 960</b>

Vastavalt punktidele 3.3.3 ja 3.3.4 sõltub koostootmisjaama elektriline efektiivsus jahutusvee temperatuuris. Kuivatid töötavad temperatuurigraafikul 100/80 °C. Arvutan investeeringu lihttasuvusaja temperatuurigraafikul 100/80 °C. Soojusliku ja elektrilise võimsuse leian sealt 3.7.

Investeeringu hind on vastavalt tabelile 5.3 7 314 000 €. Eeldan, et KIK-i toetus on 40%, seega jääb investeeringu hinnaks :

$$7\,314\,000 * (1 - 0,4) = 4\,388\,400 \text{ €}$$

Ekspluatatsiooni kulud vastavavalt Adven Eesti AS kogemusele. Arvutused on tehtud 2014. a soojustoodangu järgi. Arvutused on tehtud eeldusel, et kogu elekter müüakse jaotusvõrku punktis

4.1.3 välja toodud 2014. A keskmise hinnaga 91,7 € MWh. Tabel 5.4 näitab koostootmisel teenitud tulusid ja kulusid.

Tabel 5.4 Koostootmisel tekkivad kulud ja tulud

<b>Tehniline info</b>			
Generaatori elektriline väljundvõimsus		kWel	1 000
Jaama soojuslik väljundvõimsus		kWth	5 000
Katla nominaalne võimsus		kWth	6 200
Kütuse soojuslik väljundvõimsus		kWth	7 294
Efektiivsus		%	85%
<b>Tulud</b>			
<b>Soojuse müük</b>			
Täisvõimsusel töötatud aeg		h	4 600
Soojusvõimsus		kW	5 000
<b>Soojuse tootmine</b>			
Aastane soojustoodang		kWh/a	23 000 000
Soojuse hind		€/kWh	0,028
<b>Tulu soojuse müügist</b>		<b>€/a</b>	<b>644 000</b>
<b>Elektri müük</b>			
Täisvõimsusel töötatud aeg		h	4 600
Turbiini elektriline võimsus		kWel	700
<b>Elektrienergia tootmine</b>			
Aastane elektri toodang		kWh/a	3 220 000
Elektri hind		€/kWh	0,092
<b>Tulud elektri müügist</b>		<b>€/a</b>	<b>295 274</b>
<b>Tulud soojuse ja elektri müügist</b>		<b>€/a</b>	<b>939 274</b>
<b>Koostootmisjaama ja ehituse maksumus</b>	Investeering	Hooldus	Hooldus
	€	% / a	€ / a
CHP 1.000 kWel	4 964 000	1,50%	74 460
Toruühendused tarbijatega	100 000	1,00%	1 000
Vahesumma	5 064 000		
<b>EHITAMISE MAKSUMUS</b>			
Maa- ja kaevetööd	100 000	1,00%	1 000
Hoone ja kõrvalehitised	800 000	0,50%	4 000
Elektrivarustus, maja sisetööd, valgustus ja soojusvarustus	200 000	1,00%	2 000
Elektriühendus võrguga, trafod, alajaamad	150 000	2,00%	3 000
Platvormid,	150 000	3,00%	4 500
Muud kulud	100 000	0,00%	0
vahesumma	1 500 000		
<b>Lisa kulud</b>			
Finantseerimiskulu	200 000	0,00%	0
Planeerimine, projekteerimine, kooskõlastamine	350 000	0,00%	0
Muud kulud	200 000	0,00%	0
Vahesumma	750 000	0,00%	0
<b>Investeeringu kogusumma</b>	<b>7 314 000</b>	<b>1,20%</b>	<b>89 960</b>



<b>Tootmiskulud</b>			
<b>Kütuse hind</b>			
Niiskus		w%	50
Tuhasisaldus		w%	4
Kütteväärtus		kWh/to	3 000
Kütuse soojuslik väljundvõimsus		kW	7 294
Aastane kütusekogus		to/a	7 500
Kütuse ühikuhind		€/t	21,00
Kütuse hind aastas		€	<b>157 500</b>
<b>Opereerimiskulud</b>			
Hoodus		€	89 960
Kindlustus		€	20 000
Juhtimine, raamatupidamine, personal		€	40 000
Omatarve 100 kW x 8000 h x 0,09 €/kWh		€	72 000
Kaugjuhtimine, internet		€	30 000
Tuha ja jäätmete ärastamine		€	20 000
Muud kulud		€	20 000
Aastased opereerimiskulud		€/a	<b>296 960</b>
<b>Aastased tootmiskulud</b>		€	<b>454 460</b>
<b>Finantseerimine</b>			
Kogu investeering		€	7 314 000
KIK toetus		€	2 925 600
<b>Omaniku investeering</b>		€	<b>4 388 400</b>
Omakapital 30%		€	1 316 520
Laen 70%		€	3 071 880
Laenu periood		a	12
Intress		%/a	8
Annuiteet			0,13
<b>Aastane tagasimakse</b>		€/a	<b>407 623</b>
<b>KOKKUVÕTE</b>			
<b>Koguinvesteering</b>		€	<b>7 314 000</b>
<b>Tulud soojuse ja elektri müügist</b>		€/a	<b>939 274</b>
<b>Aastane tootmiskulu</b>		€/a	<b>454 460</b>
<b>Aastane laenu tagasimakse</b>		€/a	<b>407 623</b>
<b>Kasum enne maksustamist</b>		€/a	<b>77 191</b>

Tabel 5.4 näitab, et antud tingimustel teenib koostootmisjaam kuni 12 aastase laenu tagasimakse perioodi lõpuni kasumit 77 191 €/a ehk koostootminepole tasuv. Lihttasuvusaeg on

$$\frac{4388400}{77191} = 56 \text{ aastat}$$

Korrates sama arvutuskäiku kasutades kuivatite temperatuurigraafikut 80/60 °C (elektriline väljundvõimsus 1250 MW<sub>e</sub>) ja oletades, et elektri hind koos taastuenergia tootmisega tõuseb hinnani 101,7 €/MWh saan tabelis 5.5 näidatud tulemused:

Tabel 5.5 Koostootmisjaama kulud ja tulud kuivatite temperatuurigraafikul 80/60 °C.

<b>Tulud</b>			
<b>Soojuse müük</b>			
Täisvõimsusel töötatud aeg		h	4 600
Soojusvõimsus		kW	5 000
<b>Soojuse tootmine</b>			
Aastane soojustoodang		kWh/a	23 000 000
Soojuse hind		€/kWh	0,028
<b>Tulu soojuse müügist</b>		<b>€/a</b>	<b>644 000</b>
<b>Elektri müük</b>			
Täisvõimsusel töötatud aeg		h	4 600
Turbiini elektriline võimsus		kW <sub>el</sub>	900
<b>Elektrienergia tootmine</b>			
Aastane elektri toodang		kWh/a	4 140 000
Elektri hind		€/kWh	0,102
<b>Tulud elektri müügist</b>		<b>€/a</b>	<b>422 280</b>
<b>Tulud soojuse ja elektri müügist</b>		<b>€/a</b>	<b>1 066 280</b>
<b>Aastased tootmiskulud</b>		<b>€</b>	<b>454 460</b>
<b>Aastane tagasimakse</b>		<b>€/a</b>	<b>407 623</b>
<b>KOKKUVÕTE</b>			
<b>Koguinvesteering</b>		<b>€</b>	<b>7 314 000</b>
<b>Tulud soojuse ja elektri müügist</b>		<b>€/a</b>	<b>1 066 280</b>
<b>Aastane tootmiskulu</b>		<b>€/a</b>	<b>454 460</b>
<b>Aastane laenu tagasimakse</b>		<b>€/a</b>	<b>407 623</b>
<b>Kasum enne maksustamist</b>		<b>€/a</b>	<b>204 197</b>

Tabel 5.5 näitab kuivatite töötemperatuuril 80/60 °C ja elektri hinna 101,7 €/MWh korral teeniks jaama kasumit 204 197 €/a. Lihttasuvusaeg on.

$$\frac{4388400}{204197} = 21 \text{ aastat}$$

## 4.4 ORC tsüklil põhineva koostootmisjaama majanduslik analüüs

ORC tsüklil põhineva koostootmisjaama investeringu maksumus on vastavalt Adven Eesti kogemusele 4 500 000. Tuleb arvestada, et ORC põhineva koostootmisjaama elektriline väljundvõimsus on väiksem kui sama soojusliku võimsusega Rankine'i tsüklil põhineval koostootmisjaamal. Samuti arvestan väiksemate hoolduskuludega. Kordan punkti 4.4 tehtud arvutust ja kannan tulemused tabelisse. Punktis 3.3.4 näitena toodud koostootmisjaam ei suuda täita kogu aastast soojustoodangut vaid vastavalt tabelile 5.6 19 000 MWh. Sellise lahenduse koral kaetaks ülejäänud soojusvajadus hetkel olemasoleva kuival kütusel töötava katlamajaga.

Tabel 5.6 ORC tsüklil põhineva koostootmisjaama tulud ja kulud.

Tehniline info			
Generaatori elektriline väljundvõimsus		kWel	660
Jaama soojuslik väljundvõimsus		kWth	3 225
Tulud			
Soojuse müük			
Täisvõimsusel töötatud aeg		h	5 700
Soojusvõimsus		kW	3 225
Soojuse tootmine			
Aastane soojustoodang		kWh/a	18 382 500
Soojuse hind		€/kWh	0,04
<b>Tulu soojuse müügist</b>		<b>€/a</b>	<b>680 153</b>
Elektri müük			
Täisvõimsusel töötatud aeg		h	5 700
Turbiini elektriline võimsus		kWel	660
Elektrienergia tootmine			
Aastane elektri toodang		kWh/a	3 762 000
Elektri hind		€/kWh	0,092
<b>Tulud elektri müügist</b>		<b>€/a</b>	<b>344 975</b>
<b>Tulud soojuse ja elektri müügist</b>		<b>€/a</b>	<b>1 025 128</b>
Koostootmisjaama ja ehituse maksumus			
	Investeering	Hooldus	Hooldus
	€	% / a	€ / a
CHP 1.000 kWel	4500000	1,50%	67 500
Toruühendused tarbijatega	100 000	1,00%	1 000
Vahesumma	4500000		
<b>EHITAMISE MAKSUMUS</b>			

Maa- ja kaevetööd	100 000	1,00%	1 000
Hoone ja kõrvalehitised	800 000	0,50%	4 000
Elektrivarustus, maja sisetööd, valgustus ja soojusvarustus	200 000	1,00%	2 000
Elektriühendus võrguga, trafod, alajaamad	150 000	2,00%	3 000
Platvormid,	150 000	3,00%	4 500
Muud kulud	100 000	0,00%	0
vahesumma	1 500 000		
<b>Lisa kulud</b>			
Finantseerimiskulu	200 000	0,00%	0
Planeerimine, projekteerimine, kooskõlastamine	350 000	0,00%	0
Muud kulud	200 000	0,00%	0
Vahesumma	750 000	0,00%	0
<b>Investeeringu kogusumma</b>	<b>4 500 000</b>	<b>1,20%</b>	<b>89 960</b>
<b>Tootmiskulud</b>			
<b>Kütuse hind</b>			
Niiskus		w%	50
Tuhasisaldus		w%	4
Kütteväärtus		kWh/to	3 000
Kütuse soojuslik väljundvõimsus		kW	7 294
Aastane kütusekogus		to/a	13 859
Kütuse ühikuhind		€/t	37,00
Kütuse hind aastas		€	<b>512 776</b>
<b>Opereerimiskulud</b>			
Hooldus		€	89 960
Kindlustus		€	20 000
Juhtimine, raamatupidamine, personal		€	40 000
Omatarve 100 kW x 8000 h x 0,09 €/kWh		€	72 000
Kaugjuhtimine, internet		€	30 000
Tuha ja jäätmete ärastamine		€	20 000
Muud kulud		€	20 000
Aastased opereerimiskulud		€/a	<b>296 960</b>
<b>Aastased tootmiskulud</b>		€	<b>809 736</b>
<b>Finantseerimine</b>			
Kogu investeering		€	4 500 000
KIK toetus		€	1 800 000
<b>Omaniku investeering</b>		€	<b>2 700 000</b>
Omakapital 30%		€	810 000
Laen 70%		€	1 890 000
Laenu periood		a	15
Intress		%/a	4
Annuiteet			0,09
<b>Aastane tagasimakse</b>		€/a	<b>169 989</b>
<b>KOKKUVÕTE</b>			
<b>Koguinvesteering</b>		€	<b>4 500 000</b>
<b>Tulud soojuse ja elektri müügist</b>		€/a	<b>1 025 128</b>

<b>Aastane tootmiskulu</b>		<b>€/a</b>	<b>809 736</b>
<b>Aastane laenu tagasimakse</b>		<b>€/a</b>	<b>169 989</b>
<b>Kasum enne maksustamist</b>		<b>€/a</b>	<b>45 403</b>

Tabel 5.6 näitab, et olenemata madalamast investeeringu maksumusest pole ORC tsükli põhinev koostootmisjaama tasuv.

## 5 KERGEKÜTTEÕLI KATLAMAJA ASENDAMINE

### 5.1 Kergekütteõli hinnatõus

Alates 01.01.2015 jõustuvad vedelkütuse erimärgistamise seaduse (VKEMS) muudatused, mis oluliselt kitsendavad erimärgistatud vedelkütuse kasutamist. Muutused jõustuvad kahes osas: 01.01.2015 ja 01.05.2015. Alates 01.01.2015 lõpetatakse kerge kütteõli (nn punase kütuse) erimärgistamine ja see maksustatakse tarbimisse lubamisel edaspidi diislikütuse aktsiisimääraga (392,92 eurot 1000 liitri kohta). [38]

Kergekütteõli hind vastavalt Adven Eesti AS hinnabaasile on pärast mai kuus toimunud aktsiisitõusu ligikaudu 90 €/MWh. Hind võib veel tõusta seoses valitsuse plaaniga tõsta diiselkütuse aktsiisi.

### 5.2 Kergekütteõli katlamaja asendamise võimalused

Kerge kütteõli aktsiisitõus suurendab tugevalt ettevõtte kulutusi soojuse tootmisel. Mõistlik oleks asendada kergekütteõli katlamaja alternatiivse lahendusega. Katlamaja asukohta ja võimalikke lahenduste paiknemist vaata sele 5.1. Võimalikud lahendused oleksid uuest katlamajast või koostootmisjaamast soojustorustiku ehitamine tootmishooneni, liitumine gaasivõrguga või LPG (liquefied petroleum gas) mahuti paigaldamine.



Sele 5.1 Vajalike torustike paiknemise skeemid. Sinise värviga on tähistatud gaasi ühendustorustik ja punase värviga ehitatav soojustorustik. [9]

## 5.2.1 Soojustorustiku ehitamine

Vastvalt selele 5.1 on vajalik ehitada soojustorustik tootmishoonest nr. 9 kuni tootmishooneni nr. 13. Tootmishoonet nr. 9 varustab soojusega biomassi katlamaja. Vajaliku soojustorustiku pikkus on ligikaudu 65 meetrit, mille tuleb lisada 15 meetrit majasisisete ühenduste tegemiseks. Soojustorustiku rajamise muudab raskemaks kahe tootmishoone vahel asuv jõgi, mille alt tuleb torustik läbi puurida või ehitada õhutorustik.

Soojustorustik paigaldatakse maapinda ligikaudu 1 m sügavusele, pikiprofiil oleneb teiste kommunikatsioonide paiknemisest. Torustiku ehitamisel kasutatakse eelisoleeritud elemente. Kergekütteõli katla aastane soojustarbimine on vastavalt tabelile 2.4 330 MWh. Sellise soojuskoormusele vastab torustik diameetriga DN65, mille isolatsiooni paksus on 150 mm. Soojustorustiku DN65 ehitamise jooksva meetri hind on Adven Eesti AS võrguosakonna ekspertide kogemusel 340 €/jm. Hind sisaldab geodeesiat, projekteerimist, kaevetöid, materjali, torustiku montaaži, vajalikke teste ( keeviste röntgen kontroll, täitepinnase tiheduse kontroll, surveproov) ja katendite taastamine. Hinnale tuleb juurde arvestada kerge kütteõli katla teisaldamine, mis ei ole keerukas, kuna tegemist on konteinerkatlmajaga (vt sele 2.5) Vastavalt sellele hinnale tuleb soojustorustiku hinnaks:

Tabel 5.1 Soojustorustiku hind

Soojustorustiku pikkus, m	Ühiku hind, €/jm	Soojustorustiku hind, €
80	340	27200

## 5.2.2 Gaasitorustiku ehitamine ja põleti paigaldamine

Selel 5.1 on näha kinnistupiiril olev AS Gaasivõrk jaotusvõrk. Vajamineva gaasitorustiku pikkus on ligikaudu 180 m. Liitumistasu gaasivõrguga arvutatakse vastavalt AS EG Võrguteenus maagaasivõrgu liitumistasu arvestamise metoodikale, mis on kooskõlastatud konkurentsiametiga. Praktika näitab, et antud koormuse juures võin liitumistasu olla ligikaudu 6000 €. Vajamineva võimsuse tagamiseks on vajalik torustiku DN50 ehitamine. Tabelis 5.2 on toodud investeeringud gaasivõrguga liitumiseks. Vajalik on paigadada katlale moduleeriv gaasipõleti. Põleti gaasirühma

seadmed gaasilekkeandur, kuulkraanid, gaasifilter ja aktsiaalkompensaator. Gaasi põletamiseks sobib olemasolev katel.

Tabel 5.2 Gaasitorustiku DN65 ja gaasipõleti paigaldamise maksumus.

Hinna komponent	Hind, €
Liitumistasu (4 bar, 70 m <sup>3</sup> /h)	6000
Väline gaasitorustik katlamajja	12000
Põleti+gaasirühma seadmed	6324
Põleti paigaldus+häälestus	450
Sisegaasitööd	2500
Projekt+kooskõlastused	850
<b>Investeeringu maksumus</b>	<b>28124</b>
Reserv 10%	2812
<b>KOKKU (koos reserviga)</b>	<b>30936</b>

#### 5.2.4 LPG mahuti ja aurusti paigaldamine

LPG (inglise keeles *liquefied petroleum gas*) on nafta töötlemise käigus tekkivate gaaside segamisel tekkiv kütus. Peamised komponendid on propaan, butaan ja isobutaan. Eestis nimetatakse LPG-d tihti autogaasiks ja ballooniaasiks. LPG transporditakse raskeveokiga katlamaja juurde ja tangitakse mahutisse. Antud soojuskoormuse korral on vajalik mahuti ruumala 5 m<sup>3</sup>. Mahuti on ühendatu aurustiga, kus toimub vedelgaasi aurustumine. Tekkinud gaas suunatakse katla põletisse. Mahuti, aurusti ja gaasitorustiku hinnad on toodud vastavalt Adven Eesti arendusosakonna ja gaasiosakonna kogemusele. [39]

Tabel 5.3 LPG investeeringu maksumus

Hinna komponent	Hind, €
Väline gaasitorustik katlamajja	1300
Põleti+gaasirühma seadmed	5649
Põleti paigaldus+häälestus	450
Mahuti (5m <sup>3</sup> )+transport	5230
Aurusti	4944
Rõhuregulaatorsõlm	1323
Mahuti alusvundament	1250
Sisegaasitööd	2500



Projekt+kooskõlastused	850
<b>Investeeringu maksumus</b>	<b>23496</b>
Reserv 10%	2350
<b>KOKKU (koos reserviga)</b>	<b>25846</b>

## 5.2.5 Kergekütteõli katlamaja asendamise kokkuvõte

Tabelis 5.4 on toodud kolme variandi investeeringu maksumused

Asendus	Investeering, €
Soojustorustiku ehitamine	27 200
Gaasitorustiku ehitamine	30 936
LPG mahuti ja aurusti paigaldus	25 846

Tabel 5.5 näitab, et kõige väiksem investeering tuleb teha LPG mahuti ja aurusti paigaldamisel. Lisaks investeeringu hinnale tuleb hinnata kasutatava kütuse maksumust. Kütuse maksumused on toodud tabelis 5.6. Soojustorustiku ehitamise korral on kütuseks kasutusele võetav niiske saepuru ja koore segu, hind vastavalt punktile 4.1.6 28,5 €/MWh. Gaasi hind on märgitud 2014. aasta keskmise turuhinna järgi ja sisaldab võrgutasu ja aktsiisi. LPG hind on 2014. aasta keskmine ja määratud Adven Eesti AS hinnabaasi järgi. Kergekütteõli hind on määratud punkti 5.1 järgi. Kergekütteõli katlamaja 2014. aasta tootlus oli 329 MWh.

Tabel 5.6 Kütuse hinnad.

Kütus	Hind, €/MWh	Aastas toodetava soojuste maksumus €
Biomass (saepuru ja koore segu)	28,5	9541
Maagaas	42	13818
LPG	50	16450
Kergekütteõli	90	29610

Vastavalt tabelile 5.6 selgub, et tänu biomassi kütuse odavale hinnale on soojustorustiku ehitamine tasuvaim variant. Kuigi LPG vajalik investeering on väiksem, siis on biomassist toodetav soojuste hind niivõrd madal, et juba kahe aastase eksploatatsiooni järel muutub soojustorustiku ehitamine tasuvaimaks lahenduseks. Lihttasuvusaeg on:

$$\frac{27\,200}{29\,610 - 9\,541} = 1,35 \text{ a}$$

Vastavalt arvutusel tasub investeering ära 1,35 aastaga ja on otstarbekas koos uue 5 MW<sub>th</sub> veekatlaga ehitada soojustorustik seni kergekütteõliga köetava tootmishooneni

## 6 JÄRELDUSED

Töös tehtud analüüside ja arvutuste järeldused on järgenevad:

- Tuleb kasutusele võtta uus kütus, saepuru ja koore segu niiskusega 50%. Kütuse tekib tootmisprotsessi käigus ja selle kogus on piisav, et tagada ettevõtte soojusvarustus.
- Uue kütuse kasutusel võtuks tuleb ehitada uus katlamaja võimsusega 5 MW<sub>th</sub>. Katlamaja peamised komponendid oleks liikuv restiga eelkolle ja vertikaalne leek-suitsutoru veekatel. Investeeringu maksumus on 1 600 000 €.
- Turuhindade põhjal arvatud praegune soojus hind on võrdne uue katlamaja ehitamisel tekkiva soojushinnaga. Uus soojushind sisaldab ka laenu tagasimakset. Mõlemal puhul on soojuse hind ligikaudu 28,5 €/MWh.
- Kasutuseta jääv 23 000 MWh kütus niiskusega 10% tuleb müüa pelletite tootmiseks. Kasutusel olev okaspuu saepuru ja hõövlilasst on ideaalne tooraine pelletite valmistamiseks. Antud tooraine turuhind on ilma transpordita 16 €/MWh. Ettevõtte materjali müügilt kasumit 175 000 €/a.
- Arvestades pelletite müümisel tekkivat kasumit, on uue katlamaja tasuvusaeg ligikaudu 8 aastat.
- Koostootmisjaama rajamine pole majanduslikult tasuv, põhjusteks on kuivatite kõrge temperatuuri graafik, madal elektri hind ja soojuse hind ja ebaselge KIK-i toetuste süsteem. 12 aastase laenu perioodi jooksul, arvestades soojuse hinnaga 28,5 €, . Tasuvust parandaks kuivatite temperatuurigraafiku alandamine. See pole aga tehnilistel põhjustel võimalik ja jaama ehitamine poleks ikkagi majanduslikult mõistlik.
- Samuti pole majanduslikult kasulik ORC CHP rajamine. ORC tsüklil põhineva koostootmisjaam elektriline võimsus kindlal soojuslikul võimsusel on Rankine´ tsüklil põhinevast jaamast väiksem.
- Kergekütteõli aktsiisitoõusu tõttu on mõistlik katlamaja tööst välja lülitada. Asenduseks tuleks kõetava tootmishoone ehitada soojustorustik pikkusega 80 jm. Investeeringu suurus oleks ligikaudu 35 000 €. Arvestades kütusehinda oleks soojustorustiku tasuvusaeg ainult 1,5 aastat.

## KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli leida AS JELD-WEN Eesti AS optimaalne küttelahendus. Sooritatud olemasoleva olukorra analüüsist selgus, et kütusena tasub kasutusele võtta tootmisprotsessis tekkiv jääk – saepuru ja puukoore segu niiskusega 50%. Tekkiva jäägi kogus on piisav, et katta aastane energia vajadus 23 000 MWh. Niiske kütuse kasutusele võtuks tuleb ehitada uus katlamaja võimsusega 5 MW. Töös pakutakse välja lahendus, mis koosneb liikuva restig eelkoldest ja leek-suitsutoru veekatlalt. Sellise investeeringu korral on tekkiv soojuse hind, sisaldades ka laenu tagasimakset, võrdne praegus soojuse hinnaga. Ettevõtte teeniks kasumit kasutuseeta jääva kuiva kütuse müümisel pelletitööstus ettevõttele. Selliselt toimides oleks investeeringu tasuvusaeg ligikaudu 9 aastat.

Töös analüüsitakse koostootmisjaama rajamise otstarbekust. Kirjeldatakse ja tuuakse näiteid Rankine'i tsüklil ja orgaanilisel Rankine' tsüklil põhinevate koostootmisjaade kohta. Majandusliku analüüsi käigus selgub, et koostootmine pole tasuv. Peamised põhjused on ettevõtte odav soojuse hind, elektri madal turuhind, kuivatite kõrge temperatuurigraafik Keskkonna Investeeringute keskuse toetuste maksmise korra ebaselgus.

Kerge kütteõli aktsiisitõusu tõttu on aktuaalne kerge kütteõli katlamajade asendamine. JELD-WEN Eesti AS territooriumil on antud kütuse katlamaja alternatiivid on soojustorustiku ehitamine, gaasitorustiku ehitamine ja põleti vahetamine ja LPG aurusti ja mahuti paigaldamine. Töö käigus selgub, et tasuvaim variant on soojustorustiku rajamine.

Töös on enim vaja arendada majandusliku analüüsi osa. Hetkel on arvutused tehtud eelarvelistel pakkumistele ja Adveni Eesti ekspertide hinnagutele toetudes. Täpsema analüüsi tegemiseks tuleb küsida hinnapakkumised konkreetse objekti kohta.

Töö eesmärgid said autori hinnagul täidetud. Autor sai töö käigus tööstusettevõtte terviklahendusest parema ettekujutuse ja JELD-WEN Eesti AS sai tervikliku analüüsi kogu oma ettevõtte energialahendusest ja potentsiaalsetest lahendustest. Töös pakutud lahenduste elluviimine sõltub JELD-WEN-i ja Adveni vahelistest läbirääkimistest.

## SUMMARY

The objective of this thesis was to find a optimal energy solution for JELD-WEN Eesti Ltd. The analysis of the current situation shows, that it is advisable to take the production residue of sawdust and bark in to use as fuel. The quantity of the residue is enough to cover the required amount of heat – 23 000 MWh. The thesis provides a solution of moving grate furnace with a vertical waterboiler . The price of heat after the investemet would be equal to the current price. The firm would make a profit by selling the old fuel to the pellet industry. The payback period of that solution would be approximately 9 years.

The thesis also analyses the expediency of cogeneration. Examples are provide abot cogeneration basede on the Rankine´ cycle and on the organic Rankine´ cycle. The economical analysis provides the result, that cogeneration is not profitable. The main reasons are the low prices of heat and electricity, high temperatures of the dryers and the uncertain subsidies of EU.

The exice tax rise of light fuel oil causes the need for alternatives. For JELD-WEN Eesti Ltd. The alternatives are construction of a heatpipe system, construction of a gas pipe and instalment of a new burner or the instalment of a LPG tank and an evaporator. According to the economical analysis, the most rational alternative is the construction of the heat pipe.

Economical analysis needs the most of improvement. The calculation have been done based on budgetary prices and on the expertise of Adve Eesti Ltd experts. A more accurate analysis needs to be done based on exact charges.

The author of the thesis is satisfied with the results. The author got a good overview of the entire energysolution of the industry. JELD-WEN Eesti Ltd was provided with a thorough analysis of their current situation and potential solutions. The negotiations between JELD-WEN and Adven will decide wether the provided solutions will be carried out.

## KASUTATUD KIRJANDUS

1. Feldmann, M. (2011) JELD-WEN Eesti- vajalik komponent maailma suurimas uksetootjas. – Inseneeria, mai 2011, [Online] Inseneeria (06.04.2015)
2. JELD-WEN Eesti AS kodulehekülj [WWW] <http://www.jeld-wen.ee/jeld-wen-estii/> (06.04.2015)
3. Standard EVS-EN 14774 - Tahked biokütused. Niiskusesisalduse määramise meetodid- Termostaadis kuivatamise meetod. Osa 2: Koguniiskus. Lihtsustatud meetod
4. TTÜ Soojustehnika Instituudi Kütuselabori niiskuseproov 06.05.2015
5. Adven Eesti AS pildikogu
6. JELD-WEN Eesti AS tootmisandmed
7. Paist, A., Plamus, K. Lokaalkatlamajad. Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2013
8. Eesti Gaasi koduleht [WWW] <http://www.gaas.ee/maagaas/> (12.04.2015)
9. AS Gaasivõrgud koduleht [WWW] <http://www.gaasivorgud.ee/gaasiteenuste-kaart/> (14.04.2015)
10. Poobus, A., Tiikma, T. Kuivatustehnika, Tallinn: Soojustehnika Instituut, 2002
11. AF Estivo töö nr. ENE 09057, Katlamajade maksumuse, tehnilise lahenduse ja tegevuskulude eksperthinnang, Tallinn 2009-2010
12. Vares, V., Kask, Ü., Muiste, P., Pihu, T., Soosaar, S. Biokütuse kasutaja käsiraamat. Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2005
13. AS Tamult kodulehekülj [WWW] <http://tamult.ee/article/ee/231/1196>, (21.04.2015)
14. Kruus, R., Vares, V. Perspektiivsetest elektri ja soojuse koostootmise tehnoloogiast Eestis, Tallinn: TTÜ Eesti Energeetika Instituut/OPET Eesti, 2002
15. Paist, A. Soojuse ja elektri koostootmise tehnoloogiast.- Eesti põlevloodusvarad ja jäätmed, 2013, 7-9.
16. Riigiteataja koduleht [WWW] <https://www.riigiteataja.ee/akt/12825847>, (13.04.2015)
17. Ots, A. Soojustehnika aluskursus. Termodünaamika. Põlemine. Soojusülekanne. Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2012
18. ICS Energiatechnik Budget Offer for the delivery, assembly and start-up of a biomass combined heat and power plant, 12.02.2015

19. Kimmel, J. Rakvere koostootmisjaama töösükli analüüs ja optimeerimine. Tallinn: Soojustehnika Instituut, 2014
20. Nouman, J. Comparative studies and analyses of working fluids for Organic Rankine Cycles –ORC. Stockholm: KTH School of Industrial Engineering and Management, 2012
21. Bini, R., Di Prima, M., Guerico, A. Organic Rankine Cycle (ORC) in biomass plants: an overview on different applications. Brescia: Turboden Slr, 2010
22. Quolin, S., Lemort, V., Van Den Broek, M., Declaye, S., Dewallef, P. Techno-Economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. Liege, Kortrijk, Ghent: Elsevier Ltd, 2013
23. Enertime Ltd. koduleht [WWW] <http://www.enertime.com/en/organic-rankine-cycle-machines/technology-and-principle>, 17.04.15
24. Vankeisbilck, I., Vanslambrouck, B., Gusev, S., De Pape, M. Energetical, technical and economical considerations by choosing between a steam an Orrganic Rankine cycle for small scale power generation, Howest, Kortrijk, Ghent, First International Seminar on ORC Power Systems, Aula Conference Center, Holland.
25. Rowshanzadeh, R. Performance and cost evaluation of Organic Rankine Cycle at different technologies (Master thesis), Stockholm: KTH School of Industrial Engineering and Management, 2012
26. Guillen, D., Klockow, H., Lehar, M., Freund, S., Jackson, J. Development of a direct evaporator for the Organic Rankine Cycle, Idaho National Laboratory, Idaho Falls, USA ,General Electric Co., One Research Circle, Niskayuna, NY USA ,General Electric Co., Freisinger Landstrasse 50, Garching b. Muenchen, Germany, 2011 TMS Annual meeting, 2011
27. Poles, S., Venturin, M., Numerical Simulation of an Organic Rankine Cycle, [WWW] [http://www.openeering.com/sites/default/files/Organic\\_Rankine\\_Cycle.pdf](http://www.openeering.com/sites/default/files/Organic_Rankine_Cycle.pdf) (04.05.2015)
28. Angelo Algieri, Pietropaolo Morrone, Energy analysis of Organic Rankine Cycle for biomass applications, Mechanics Department, University of Calabria, Italy,
29. AS Tamult, Tööprojekt nr. TP-136
30. Pääkese tänava koostootmisjaama biokütusekatla soojustehnilised katsetused, Tallinna Tehnikaülikool, Soojustehnika Instituut, 11.04.2014

31. Turbodeni koduleht [WWW] <http://www.turboden.eu/en/products/products-chp.php>, (11.05.2015)
32. Reiska, R., Meier, P. Puidu kuivatamine. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli kirjastus, 2008
33. Alver, J., Reinberg, L. Juhtimisarvestus:Teine, täiendatud väljaanne. Tallinn:Deebet, 2002
34. Raudsepp, V. Finantsjuhtimise alused:Ettevõtte rahandus. Tallinn:Külim, 1999
35. Eleringi koduleht [WWW] <http://elering.ee/nps-hinnad/> (26.05.2015)
36. Keskkonna Investeeringute Keskuse koduleht [WWW] <http://www.kik.ee/et/energeetika/taastuvenergeetika>, (15.05.2015)
37. Graanul Invest koduleht [WWW] <http://www.graanulinvest.ee/est/tooraine>, (17.05.2015)
38. Maksu- ja tolliameti koduleht [WWW] <http://www.emta.ee/index.php?id=35768> (27.07.2015)
39. AS JetGas koduleht [WWW] <http://jetgas.ee/lng/lng>, (21.05.2015)