EESTI MAAÜLIKOOL
Tehnikainstituut

Mihkel Merimaa

ELEKTRI JA SOOJUSE KOOSTOOTMISJAAM ETTEVÕTTE ENERGIAVARUSTUSES

CHP APPLICATION IN INDUSTRY

Magistritöö
Energiakasutuse õppekava

Juhendaja: prof. Andres Annuk

Tartu 2016

Eesti Maaülikool

Kreutzwaldi 1, Tartu 51014

Magistritöö lühikokkuvõte

Autor: Mihkel Merimaa

Õppekava: Energiakasutus

Pealkiri: Elektri ja soojuse koostootmisjaam ettevõtte energiavarustuses

Lehekülgi: 66	Jooniseid: 16	Tabeleid: 4	Lisasid: 1

Osakond: Energeetika

Uurimisvaldkond: ETIS: 4. Loodusteadused ja tehnika/ 4.17 Energeetikaalased uuringud

CERCS: T140 Energeetika

Juhendaja(d): prof. Andres Annuk

Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu, Eesti. 2016

Töö tulemustest selgub, et hetkeseisuga on Eestis väga madal primaarenergia kasutamise efektiivsus. Efektiivsust saaks edukalt suurendada, kui ettevõtetes laialdasemalt kasutusele võtta koostootmisseadmeid. Antud magistritöö eesmärgiks on anda põhjalikum ülevaade soojuse ja elektri koostootmiseks kasutatavatest tehnoloogiatest ning selle vajalikkusest ja kasutamise eelistest ettevõtete energiavarustuses. Töö koostamisel on analüüsitud teaduslikke kirjandusallikaid ning läbi töötatud CHP tehnoloogilisi süsteeme puudutavaid erialaseid kirjandusallikaid. Lisaks vaadeldi ja koguti informatsiooni ning andmeid uuritava koostootmisjaama kohta, et läbi viia analüüsi.

Magistritöö koostamisel tehti koostööd ettevõttega AS Fortum Tartu. Uurimisobjektiks oli Tartumaal Luunja vallas asuv soojuse ja elektri koostootmisjaam, mille põhjal on läbi viidud põhjalik analüüs koostootmises kasutatavate tehnoloogiliste süsteemide kohta. Lisaks koguti andmeid CHP soojuse ja elektri toodangute kohta ning teostati arvutused ning saadud tulemuste põhjal tehti järeldusi.

Antud magistritöös saadud tulemuste põhjal selgus, et koostootmisel on energia muundamise kogukasutegur ligikaudu 15−40% suurem kui elektrit ja soojust eraldi tootes. Kütuse kasutamise kasutegur on tavaliselt 85−92%. Uuritud jaamas teostatud arvutuste põhjal oli see 2015. aastal 92,79 %. Millest elektriline netokasutegur oli 25,22 % ning kasulik soojuslik 67,57 %. Sellest saab järeldada, et seadme elektri- ja soojusenergia tootmise keskmine suhe oli 0,37. Jaama kasuliku soojuse toodang oli uuritaval aastal 425 GW·h, millest 15,5 % andis suitsugaaside pesur. Elektrienergia kogu netotoodang oli 159,5 GW·h. Töös selgub jaama primaarenergia sääst (PES). Uuritava koostootmisjaama PES oli 35,27 % ehk 2015. aastal säästeti CHP kasutamise tulemusel 481 GW·h primaarenergiat. Mille põhjal saab järeldada, et AS Fortum Tartu CHP on kõrge kasuteguriga ning tootmist saab lugeda tõhusaks.

Märksõnad: Koostootmine, energiatõhusus, primaarenergia sääst, kõrge kasutegur.

Estonian University of Life Sciences

Kreutzwaldi 1, Tartu 51014

Abstract of Master's Thesis

Author: Mihkel Merimaa

Speciality: Energy Application Engineering

Title: CHP Application in Industry

Pages: 66	Figures: 16	Tables: 4	Appendixes: 1

Department: Department of Energy Engineering

Field of research: ETIS: 4. Natural Sciences and Engineering/ 4.17 Energetic Research

CERCS: T140 Energy research

Supervisors: prof. Andres Annuk

Place and date: Tartu, Estonia. 2016

From the thesis results it appears that at the moment in Estonian industrial power generation sector there is a very low energy efficiency. The efficiency can be successfully increased by applying more widely CHP technologies in enterprises. The aim of this thesis is to provide a comprehensive overview of various CHP technologies and description of the necessity and the advantages for companies in energy supply. The study is based on scientific literature that is associated with CHP technologies. In order to carry out the analysis and calculations the analysed cogeneration plant was surveyed and the information data was collected.

The master thesis was carried out in cooperation with the company AS Fortum Tartu. The researched object was a cogeneration plant, which is situated in Tartu County Luunja. On the basis of this cogeneration plant analysis was carried out on the technological systems used. In addition, data was collected about the CHP heat and electricity production and the calculations were carried out on the collected data. On the acquired results conclusions were made.

This thesis results showed that with cogenerated energy conversion the efficiency is about 15-40 % higher than separately generated electricity and thermal energy. Cogeneration fuel consumption efficiency is usually 85-92 %. On the researched CHP it was found out that in 2015 the efficiency was 92,79 %. The net electrical efficiency was 25,22% and useful thermal 67,57 %. It can be concluded that the average power to heat production ratio was 0,37. The useful heat output in studied CHP plant was on the surveyed year 425 GW·h, the flue gas washer share of it was 15,5 %.Total net electricity production was 159.5 GW·h. CHP primary energy savings (PES) was 35,27 %. These results shows that 481 GW·h of primary energy was saved due to cogeneration in the year 2015. That leads to the conclusion that AS Fortum Tartu CHP is working on a high degree of efficiency and the production can be regarded as effective.

Keywords: Cogeneration, energy efficiency, primary energy saving, high efficiency.

SISUKORD

TÄHISED JA LÜHENDID **5**
SISSEJUHATUS **6**
1. TÖÖ EESMÄRK, ÜLESANDED JA METOODIKA **7**
2. PROBLEEMI OLEMUS JA AKTUAALSUS **8**
3. KOOSTOOTMINE **9**
3.1. Koostootmise eelised ja puudused 9
3.2. Erinevad koostootmise tehnoloogiad 13
3.2.1. Auruturbiinjõuseadmed 14
3.2.2. Gaasiturbiinjõuseadmed 16
3.2.3. Kolbmootor 18
3.2.4. Kütuseelement 20
3.3. Koostootmise roll Eestis ning Euroopas 20
3.4. Koostootmisjaama rakendamise tehnilis-majanduslik analüüs ettevõtetes 24
4. TOOTMISETTEVÕTTE JA KOOSTOOTMISJAAMA ISELOOMUSTUS **28**
4.1. Koostootmisjaama üldkirjeldus 29
4.2. Koostootmishoone tehnoloogiasüsteemid 31
4.2.1. Kütuse vastuvõtt ja hoiustamine 31
4.2.2. Kütuse ja liiva etteandesüsteem 33
4.2.3. Keevkiht katla põlemissüsteem 34
4.2.4. Kolde põhjatuha eraldamissüsteem 35
4.2.5. Lendtuha puhastussüsteem 36
4.2.6. Tahmapuhastussüsteem 37
4.2.7. Vee- ja aurusüsteem 37
4.2.8. Põlemisõhusüsteem 41
4.2.9. Maagaasipõletid 42
4.2.10. Suitsugaaside pesur 43
4.3. Auruturbiin ja generaator 44
5. KOOSTOOTMISJAAMA ISELOOMULIKUMAD PARAMEETRID **46**
5.1. Koostoomisseadme elektri- ja soojusenergia suhe 46
5.2. Koostootmisjaama toodang ning kasutegurid 48
5.3. Primaarenergia sääst 53
6. KOKKUVÕTE **56**
KIRJANDUS **59**
SUMMARY **63**
LISAD **65**
Lisa 1. DSpace lihtlitsents ning juhendaja kinnitus töö kaitsmisele lubamise kohta 66

TÄHISED JA LÜHENDID

IGCC	–	integreeritud gaaskombitsükkel (ingl *integrated gasification combined-cycle*)
KIK	–	Keskkonnainvesteeringute Keskus
ORC	–	orgaaniline Rankine'i ringprotsess (ingl *Organic Rankine Cycle*)
$P_{el,CHP}$	–	elektrienergia W·h
PES	–	primaarenergia sääst %
PRIA	–	Põllumajanduse Registrite ja Informatsiooni Amet
REFHη	–	soojuse eraldi tootmise viiteväärtus
REFEη	–	elektrienergia eraldi tootmise viiteväärtus
TES	–	soojusakumulaator ehk soojusaku (ingl *thermal energy storage*)
CHP	–	elektri ja soojusenergia koostootmine (ingl *combined heat and power cogeneration*)
CHPEη	–	koostoodetud elektrienergia kasutegur %
CHPHη	–	kasuliku soojuse kasutegur %
$Q_{kütus}$	–	kütuse põlemisel saadud energia W·h
$Q_{th,CHP}$	–	soojusenergia W·h
σ_{CHP}	–	koostootmise elektrienergia ja soojusenergia suhe
η_{el}	–	elektriline kasutegur %
η_{kogu}	–	koostootmisjaama kogukasutegur %
η_{th}	–	soojuslik kasutegur %

SISSEJUHATUS

Tänapäeval on väga aktuaalne erinevatel viisidel energia säästmine. Maailma rahvaarv kasvab pidevalt ning arenenud riikides valitseva turumajandusliku majandussüsteemi tõttu tootmine ning tarbimine aina suurenevad. Kiirelt kasvav erinevate energiamahukate toodete tootmine suurendab omakorda nendele kuluvat energiavajadust. Euroopa Liit, kaasaarvatud Eesti, on aga võtnud endale väga ambitsioonikad eesmärgid hoida kokku energia tarbimiselt, vähendada kasvuhoonegaaside heitmeid ja suurendada taastuvate energiaallikate kasutamist. Üheks võimaluseks, kuidas seda teha, on laialdasemalt kasutusele võtta kõrge kasuteguriga koostootmisseadmed.

Kui tavapärased põlevkivil töötavad elektrijaamad toodavad elektrienergiat, siis tekitavad nad suurel hulgal soojust, mis jääb kasutamata, kuid mida saaks otstarbekalt ära tarbida. Keskmisel elektriettevõtte elektrijaamal muundatakse umbes kaks kolmandikku sisse antavast kütuse energia sisaldusest soojuseks ning heitmeteks. Alternatiivselt on võimalik lõpptarbijal, kellel on suured soojus- ning elektrienergia vajadused, toota samaaegselt oma hoones või selle lähistel mõlemat energiat koostootmisjaamaga. Koostootmisjaama abil on võimalik märgatavalt suurendada energia kasutamise efektiivsust. Koostootmist võib pidada üheks parimaks viisiks, kuidas saab suurendada energia muundamise kasutegurit ehk kütuse kasutamise efektiivsust.

Antud magistritöös keskendutakse soojuse ja elektri koostootmise erinevate tehnoloogiate tutvustamisele ja energiavarustamise ning kasutatavate tehnoloogiasüsteemide selgitamisele tööstuses. Uurimise objektiks võetakse Tartu linna äärealal asuv koostootmisjaam, mille peamiseks eesmärgiks on Tartu linna kaugküttevõrgu soojuse baaskoormuse katmine.

Sooviksin eraldi tänu avaldada AS Fortum Tartule ning seal töötavatele inseneridele Asso Uibole ning Sven Kasele, kes olid nõus mind minu lõputöö valmimisel aitama, jagades oma ettevõtte koostootmise tehnoloogiasüsteemide ning toodangute kohta väärtuslikku informatsiooni.

1. TÖÖ EESMÄRK, ÜLESANDED JA METOODIKA

Antud magistritöö eesmärgiks on anda põhjalikum ülevaade soojuse ja elektri koostootmiseks kasutatavatest tehnoloogiatest ning selle vajalikkusest ja kasutamise eelistest ettevõtete energiavarustuses.

Püstitatud eesmärgi täitmiseks analüüsitakse töö esimeses osas millised on koostootmise kasutamisest saadavad kasud ning millised tegurid piiravad koostootmise kasutusele võttu ettevõtetes. Vaadeldaks ka millised on koostootmise peamised tehnoloogiad ning võrreldakse erinevusi ning tuuakse välja nende erinevad näitajad. Püütakse klassifitseerida ning süstematiseerida erinevaid CHP tehnoloogiaid. Lisaks antakse ülevaade milline on primaarenergia kasutamise ning koostootmise osakaal Eestis võrreldes muude Euroopa Liidu liikmesriikidega. Samuti analüüsida, kas ja millist koostootmisjaama oleks ettevõttes kõige optimaalsem rakendada.

Magistritöö teises osas võetakse uurimisobjektiks üks suurem koostootmisjaamaga ettevõte ja analüüsitakse ühte Tartumaal asuvat elektri ja soojuse koostootmisjaamaga ettevõtet. Lisaks kirjeldatakse koostootmise tehnoloogilisi süsteeme ja antakse laialdasem ülevaade antud koostootmisjaama kohta. Lisaks sellele viiakse läbi arvutused ja analüüsitakse uuritava koostootmisjaama peamisi parameetreid.

Antud magistritöö ülesannete lahendamiseks otsitakse ja analüüsitakse teemakohaseid teaduslikke kirjandusallikaid ning töötatakse läbi koostootmise tehnoloogilisi süsteeme puudutavaid erialaseid kirjandusallikaid. Lisaks tuleks leida koostöövalmis ettevõte, kes oleks nõus oma ettevõtte ja koostootmise kohta informatsiooni jagama. Kui ettevõte leitakse, siis tuleks viia läbi põhjalik analüüs koostootmises kasutatavate tehnoloogiliste süsteemide kohta. Lisaks sellele koguda andmeid koostootmise soojuse ja elektri toodangute kohta, et teha arvutused ning nende põhjal järeldusi. Töö lõpeb saadud tulemuste põhjal järelduste ja kokkuvõtete tegemisega.

2. PROBLEEMI OLEMUS JA AKTUAALSUS

Iga aastaga suureneb maailmas energiamahukate kaupade tarbimine ja tootmine, mille tõttu pidevalt suureneb primaarenergia vajadus. Kaupade tootmise ja tarbimise suurenemist mõjutab pidev maailmarahvastiku suurenemine, mis hetkel on ületanud juba 7,4 miljardi inimese piiri ja arvatakse, et 2100 aastaks on maailma rahvastikuarv tõusnud juba 11 miljardi inimeseni [1]. Samuti suurendab erinevate kaupade tootmist tänapäeva nii-öelda tarbimisühiskond, mis on laialt levinud arenenud riikides valitseva turumajandusliku majandussüsteemi tõttu.

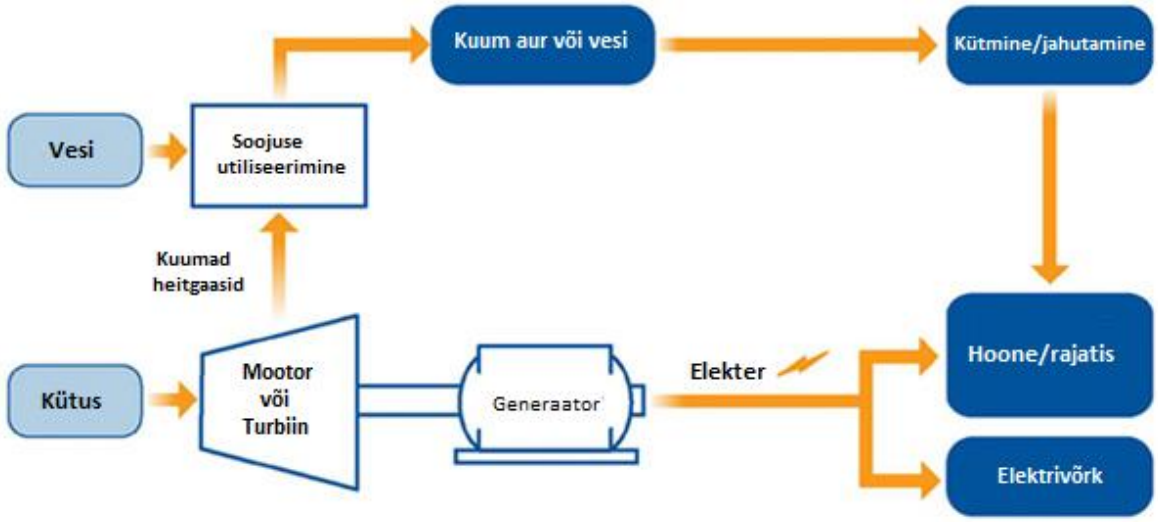
Tootmise pideval kasvul on otsene seos energiatarbimise tõusuga. Mida suurem on vajadus erinevate toodete järgi, seda suurem on ka sekundaarenergia nagu elektri- ning soojusenergia vajadus. See omakorda mõjutab otseselt primaarenergia vajadust, millest toodetakse vajalikku sekundaarenergiat. Sellest tulenevalt peab leidma viise, kuidas saaks vähendada primaarenergia kasutamist ja suurendada taastuvate energiaallikate kasutamist. Rahvusvaheliselt on juba pikemat aega sellele suuremat tähelepanu pööratud ja astutakse jõulisi samme ka Euroopa Liidu poolt, et muuta energiamajandamist efektiivsemaks, säästlikumaks, tõhusamaks ja pikaajaliselt jätkusuutlikuks.

Üheks viisiks, kuidas saaks säästa energiat ja muuta primaarenergia kasutamist palju efektiivsemaks, on kasutada elektri ja soojuse koostootmist. Hetkeseisuga on Eestis väga madal energia kasutamise efektiivsus ja seda saaks edukalt suurendada, kui ettevõtetes võtta laialdasemalt kasutusele koostootmisseadmeid. Lisaks efektiivsemale energia tarbimisele, aitab koostootmine suurendada kulutõhusat tootmist, mis omakorda aitab tagada ettevõtjale konkurentsivõimelisemaid tootmiskulusid. Arvestades pidevalt kallinevaid energiahindasid ning vajadust vähendada primaarenergia tarbimist, on tegemist väga aktuaalse teemaga.

3. KOOSTOOTMINE

Elektri ja soojuse koostootmine (ingl - CHP – *combined heat and power cogeneration*) on protsess, mille käigus on võimalik ühest seadmest väljastada kahte liiki energiat – mehaanilist energiat ja soojusenergiat [2].

Koostootmisel saadud soojust saab kasutada erinevates tehnoloogilistes protsessides, nagu näiteks ruumide kütmiseks või tarbevee soojendamiseks, samuti absorptsioonil põhinevate jahutusprotsesside kasutamiseks kaugjahutussüsteemides. Koostootmisel saadud mehaanilist energiat muudetakse tavaliselt kõrgeima kvaliteediga energiaks, milleks on elektrienergia. Kuid saadud mehaanilist energiat võib kasutada ka ventilaatorite, kompressorite ja pumpade otseseks käitamiseks, mis on omakorda kõrgema energia kvaliteediga, kui soojus, kuid madalama kvaliteediga, kui elektrienergia [2]. Joonisel 3.1. on kujutatud lihtsustatult, kuidas toimub koostootmisjaamas soojuse ning elektrienergia tootmine.



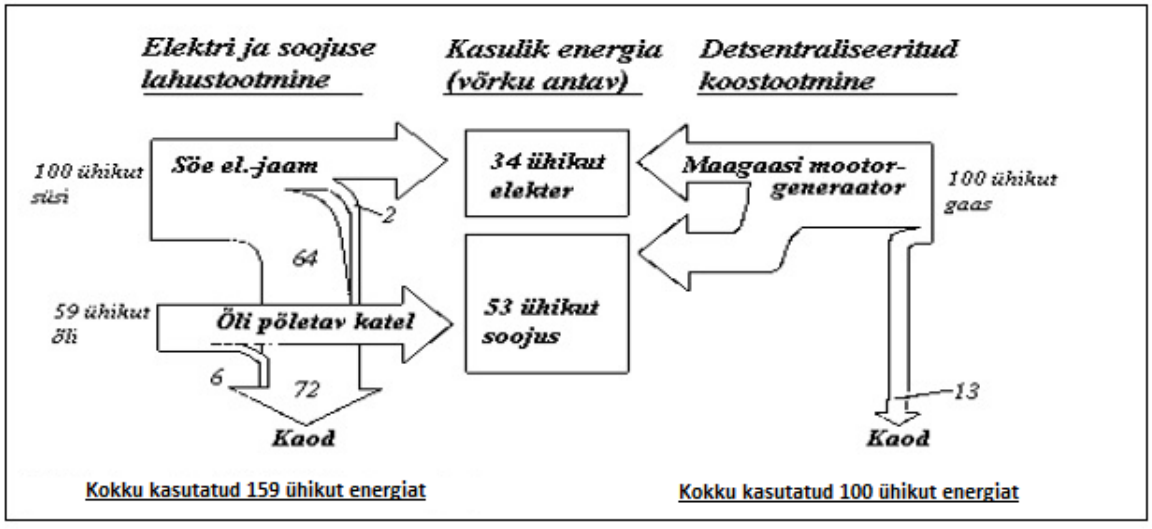
Joonis 3.1. Koostootmise protsessid [3]

3.1. Koostootmise eelised ja puudused

Koostootmisel on palju eeliseid ning seda võib pidada termodünaamiliselt parimaks viisiks, kuidas suurendada kütuse kasutamise efektiivsust. Koostootmisel saab võrreldes tavapäraste elektri- ning soojusenergia tootmistega suurel määral vähendada energia kadude hulka.

Seega väheneb emissioon toodetud energiaühiku kohta, vähenevad kasutatavad kütusekogused ning mõlemaid energialiike saab toota nende eraldi tootmisest võrreldes madalama hinnaga. Koostootmisjaamades kasutatavad seadmed on käitamises talitluskindlad ja paindlikud. Soojuse ja elektrienergia koostootmine (edaspidi ka CHP) on kõrge kogukasuteguriga. Kasutegur on ligikaudu 15−40% suurem kui elektri ja soojuse eraldi tootmisel. Kütuse kasutamise kogukasutegur on tavaliselt 85−92% ning on see võrreldav praegusaegse lokaalkatlamaja katla kasuteguriga soojuse tootmisel [2]. Kasutegurit arvutatakse kütuse alumise küttevääртuse alusel. Kogukasutegur on koostootmisjaamas toodetud elektrienergia ning kasuliku soojusenergia ja kogu kasutatud kütusest saadud energia vaheline suhe.

Kui elektrijaamad toodavad elektrienergiat siis tekitavad nad suurel hulgal soojust, mida saaks kasulikult ära tarbida. Keskmisel elektriettevõtte elektrijaamal muundatakse umbes kaks kolmandikku sisse antavast kütuse energia sisaldusest soojuseks ning heitmeteks. Alternatiivselt on võimalik lõpptarbijal, kellel on suured soojus- ning elektrienergia vajadused, toota samaaegselt oma hoones või selle lähistel mõlemat energiat koostootmisjaamaga. Koostootmisjaama abil on võimalik märgatavalt suurendada primaarenergia kasutamise efektiivsust, mida on illustratiivselt näidatud joonisel 3.2.



Joonis 3.2. Koostootmisel saadav energiasääst [4]

Jooniselt 3.2 on näha, et elektri- ning soojusenergia koostootmisel on antud näite puhul võimalik vähendada energia muundamise kadusid võrreldes eraldi tootmisega ligikaudu viis

korda. Kui koostootmisel sisestada 100 ühikut kütust, siis jaam suudab kasulikuks energiaks muundada, olenevalt kasutatavast tehnoloogiast, ~87% kütuseks kasutavast energiast. Ligikaudu 34 ühikut sellest on toodetud elektrienergia ning 53 ühikut on soojusenergia, mida saab edastada kas auruna või sooja veena. Traditsionaalse elektri ning soojuse lahustootmisel on aga tunduvalt rohkem energiat tarvis, et toota sama kogus kasulikku energiat.

Koostootmisjaamade efektiivsust saaks omakorda olulisel määral tõsta, kui kasutada soojusakumulaatoreid ehk soojusakusid (ingl *thermal energy storage (TES)*). Soojusakumulaator on soojust salvestav seade, mida saab edukalt kasutada kaugküttesüsteemides, kuna vesi on tänu oma odavusele, kättesaadavusele, keskkonnasõbralikkusele ja suurele erisoojusele (4,2 kJ/(kg·K)) üks parimatest soojust salvestavatest ainetest [5]. Soojusakudesse salvestatakse soojust hetkel, millal kaugküttesüsteemi soojuskoormus on väikseim ning kasutatakse seda salvestatud soojus hetkedel, kui päevane soojuskoormus on suurem. Näiteks hommikuti 7-8 ajal ning õhtuti 5 - 6 vahel on kaugküttevõrgu soojavee tarbimine märgatavalt suurem, kui öösiti. Selleks, et koostootmisseade saaks terve päeva jooksul ühtlaselt maksimaalsel koormusel töötada, ongi mõistlik kasutada suuri soojust salvestavaid akumulaatoreid.

Koostootmisjaama soojuslikku võimsust saab tõsta, kui lisada koostootmisjaamale suitsugaaside pesur. Seadet on mõistlik kasutada olukorras, kui soovitakse suurendada jaama soojusliku väljundvõimsust. Suitsugaasipesuriga on võimalik suurendada koostootmisjaama soojuslikku kasutegurit, samas vähendada saasteainete kogust suitsugaasides ning piirata kütusekulu. Suitsugaaside pesur on eelkõige mõeldud suurema niiskussisaldusega kütuste põletamisel lahkuvate suitsugaasides oleva soojusenergia taaskasutamiseks. Suitsugaasidest saadav soojusenergia kogus on seda suurem, mida kõrgem on kütuse niiskuse protsent ja efektiivsus sõltub otseselt kaugkütte tagasivoolu vee temperatuurist. Koostootmise soojuslikku võimsust on võimalik selle seadmega tõsta ligikaudu 22 % kuni 30 %. Seadme nimi tuleneb peamiselt aga sellest, et seade töötab ka suitsugaaside lendosakestest puhastajana. Suurema lendtuha eemaldab suitsugaasidest enne pesurit, kas multitsüklon või elektrifilter, mille järel on jadamisi suitsugaaside pesur, mis viib lendtuha osakaalu ligikaudu 100 mg/Nm^3 [6, 7].

Soojuse ning elektri koostootmise eelistena tasub ära veel märkida, et varustuskindlus koostootmisjaama piirkonnas paraneb, kuna väheneb risk, et tarbija jääb ilma elektrita.

Samuti toimub elektritootmise detsentraliseerimine, mis vähendab ülekandekadusid ja suurendab elektrisüsteemi paindlikkust [2].

Koostootmise eelistamisel tavapärase soojuse ning elektrienergia tootmisele on väga suured kasud ka keskkonna jaoks. Kuna energia tootmine on palju efektiivsem, siis on vaja vähem kütust põletada, et toota kasulikku energiat, mis omakorda tähendab, et õhku paisatakse vähem kasvuhoonegaase ja lenduvaid osakesi, millega väheneb õhureostus. Eestis kasutatakse primaarenergia allikana suurel hulgal põlevkivi, mille efektiivsemal kasutamisel oleks suur potentsiaal vähendada õhku paisatavate kasvuhoonegaaside hulka. Euroopa Liidu erinevad direktiivid on loodud soodustama ja edendama energia tootmist taastuvenergia allikatest ning peavad kõrge efektiivsusega koostootmisjaamasid oma potentsiaali ära kasutamises ideaalseks viisiks vähendamaks emissiooni eelkõige kasvuhoonegaase [8].

Koostootmise puudustena võib esiteks välja tuua selle, et seda protsessi saab kasutada kohtades, kus on nii elektri-, kui ka soojusenergia vajalik ning neid energia liike on võimalik kasutada efektiivselt aastaringselt. Sellisteks kohtadeks võivad olla näiteks puidu kuivatamisega tegelevad suured ettevõtted või linna kaugküttevõrguga ühendatud tootmised. Samuti peab soojuse ning elektrienergia tarbimine samaaegselt toimuma. Elektrienergiaga on olukord parem, kuna seda saab igal hetkel võrku müüa, kui seda ise tööstuses ära ei tarbita. Kuid tähelepanu tuleb eelkõige pöörata soojusele, kuna paljudel juhtudel väheneb suvekuudel soojuse tarve, samas elektrienergia tarve jääb samaks.

Suurimaks takistuseks, mis pärsib koostootmisjaamade laiemat kasutusele võtmist, on suured kapitali investeeringu kulud. Koostootmisjaamade puhul on siiani tegemist võrdlemisi uudse ja keeruka tehnoloogiaga ning see muudab alginvesteeringu seadmete soetamisel suureks. Firmad alati ei nõustu selliseid suuri investeeringuid tegema, isegi juhul, kui see investeering end pikemaajaliselt ära tasub. Samuti tuleb arvestada jooksvate hooldus-, teenindus- ja utiliseerimiskuludega, kui seade on tööle hakanud. Olenevalt kasutatavast koostootmise tehnoloogiast ning selle keerukusest, on koostootmisjaama ehitamise ja hoolduskulud seadmete puhul erinevad. Üldiselt kehtib seaduspärasus, et mida võimsamaks ehitada koostootmisjaamad, mis kasutavad sama kütust ning konfiguratsiooni, seda madalamaks osutuvad ehitamise kulud ühe võimsusühiku kohta. Koostootmisjaamade laiemale levikule aitaks tulevikus kindlasti kaasa koostootmise seadmete hinna alanemine ning suuremad investeeringu toetused riigi poolt.

3.2. Erinevad koostootmise tehnoloogiad

Koostootmise seadmetel on kasutusel mitmeid erinevaid koostootmise tehnoloogiaid, mille elektriline võimsus ulatub mõnest kilovatist mõnesaja megavatini. Ka juba väikese võimsusega seadmed omavad kõrget elektrilist kasutegurit, on automatiseeritud ning töökindlad.

Koostootmisjaamad võib jagada toodetud energia genereerimiseviisi järgi viieks:

1. vaheltvõtuga kondensatsioonturbiin
2. vasturõhu auruturbiiniga
3. gaasiturbiiniga
4. kolbmootoriga
5. kütuseelemendiga

Tabelist 3.1. on välja toodud koostootmise erinevaid süsteeme võrdlevad ja iseloomustavad näitajad

Tabel 3.1. Peamiste koostootmise tehnoloogiate iseloomustavad näitajad [9, 10]

	Auruturbiin		**Gaas-turbiin**	**Kombineeritud gaas-auruturbiin**	**Kolbmootor**		**Kütuse-element**
	Vastu-rõhu turbiin	**Vaheltvõtuga turbiin**			**Otto mootor**	**Diesel mootor**	
Tavaliselt kasutatav kütus	Kõik kütused	Kõik kütused	Gaas, kerge kütteõli	Gaas	Gaas	Gaas, kerge kütteõli	Vesinik, maagaas, propaan, metanool
Võimsuse piirid MW_e	>0,5	>1	>1	>3	0,03 - 6	0,100 - 20	0,005-2
Elekter / Soojuse suhe	1/3-10	1/3-8	1/1,5-2,5 (1/5 kui lisapõletiga järelkatel)	1/1 (1/3 kui lisapõletiga järelkatel)	1/1-3	1/0,5-3	1-2/1
Väljastatav soojus	keskrõhu aur	kõrgrõhu aur	kõrgrõhu aur	keskrõhu aur	Soe vesi	Soe vesi	Soe vesi, madal- ja kõrgrõhu aur
Elektri-tootmise kasutegur %	7-20	10-20	25-40	35-50	25-33	35-42	40-70
Kogu-kasutegur %	75-84	75-85	65-86	73-86	70-90	65-90	55-80

3.2.1. Auruturbiinjõuseadmed

Tööprintsiibist lähtuvalt saab jagada auruturbiinjõuseadmed vaheltvõtuga kondensatsiooni ja vasturõhuauru seadmeteks. Aurujõuseadmete termodünaamiline tööprotsess põhineb Rankine'i ringprotsessil. Auruturbiinis suunatakse kütuse keemilise toime (põlemise) tagajärjel kuumendatud aur läbi turbiini töölabade, mille toimiv jõud paneb turbiini tööratta pöörlema. Auruturbiini pöörlemisest tekkiva mehaanilise energia saab generaatori abil muundada elektrienergiaks. Auruturbiini järel aur enamasti kondenseeritakse ehk veeldatakse, seega selliseid turbiine nimetataksegi kondensatsioonturbiinideks. Selliste turbiinide juurde kuulub veega või õhuga jahutatav kondensaator. Kondensaatori jahutusveega võetakse aurult ära soojus, mis vabaneb auru kondenseerumisel. Aurust saadavat soojust saab aga täielikult ära kasutada sel teel, et turbiini madalrõhuosast saab võtta osa auru näiteks aurkütteks või veekuumutite toiteks. Auru vaheltvõttusid võib olla mitu. Sellistest turbiinidest on võimalik saada nii mehaanilist energiat, kui ka soojust ehk sellisel juhul on tegemist vaheltvõtuga kondensatsioonturbiiniga koostootmisega. Energia muundamise kasutegur on neis koostootmisjaamades tavaliselt vahemikus 50 - 65 %. Veel kõrgema kasuteguri (kuni 85 %) võimaldavad saavutada vasturõhuturbiinid, millest kogu väljuv aur, enamasti rõhul 0,2 - 0,5 MPa, suunatakse tööstuslikele aurutarvititele. Vasturõhuauruturbiinil puudub aga madalrõhuosa koos kondensaatoriga ja aur suundub otse turbiinist soojustarbijale. Nimetatud turbiinid on oma töös vähepaindlikud, kuna soojustarbija auruvajadus määrab üheselt turbiini läbiva aurukoguse ja seega turbiini võimsuse. Vasturõhuaurul põhinevad koostootmisjaamad leiavad kasutamist peamiselt suurlinnade soojusvarustuses ja tööstusettevõtetes [2, 5, 11].

Reguleeritava vaheltvõtuga auruturbiinides eemaldatakse osa auru enne lõpprõhuni suurenemist. Selliseid turbiine nimetatakse ka termofikatsioonturbiinideks. Reguleeritava vaheltvõtuga kondensatsioonturbiine projekteeritakse üldjuhul kolmes vaheltvõtu konfiguratsioonis: üksik, duubel või kolmik, olenevalt erinevate rõhu vaheltvõttude arvust. Kuna kahe ja kolme vaheltvõtuga süsteemid on keerukad ning kallimad, siis kõige enam kasutatakse ühe vaheltvõtuga süsteeme. Reguleeritava vaheltvõtuga seadmed on loodud hoidma kondensatsiooni aururõhku konstantsena, olenemata soojuskoormusest. Vaheltvõttudest võetav aurukogus on reguleeritav ning elektrilist koormust saab hoida konstantsena, erinevalt vasturõhuturbiinidest. Reguleeritava vaheltvõtuga turbiinidel ei ole võimsusekadu, mis assotsieerub mitte reguleeritavate seadmetega, millel on vaja rõhu

alandamiseks ventiili. Reguleeritavad vaheltvõtuga kondensatsiooniturbiinid saab konstrueerida niiviisi, et vaheltvõtu auru vool moodustab kuni 9% sisenevatest kuumendatud aurudest. Madala vaheltvõturõhuga (0,07−0,25 MPa) aur sobib kasutamiseks tarbevee ning küttevee soojendamiseks ning kõrge (< 0,6 MPa) vaheltvõtu rõhk tööstuslikuks kasutamiseks. Juhul kui puudub soojuskoormus, töötab turbiin kondentsatsioonrežiimil, kuid sellisel jõuseadmel on madalam kasutegur, kui ainult elektrit tootval aurujõuseadmel. Reguleeritavate vaheltvõttudega auruturbiin töötab kõrgeima suhtelise sisemise kasuteguriga juhul, kui reguleeritavad vaheltvõtud on koormatud ning soojustarbijad asuvad võimalikult lähedal. Reguleeritavate vaheltvõttudega auruseadmete elektriline võimsus jääb vahemikku 25-250 MW [2, 11, 12].

Auruturbiinijõuseadmete peamisteks eelisteks on töökindlus ning pikk eluiga. Samuti on neil lai võimsuste ulatus, kütustena saab kasutada kõiki kütuseid ja sobib hästi ühtlasel koormusel töötama. Tegemist on koostootmisjaamades kasutatavatest tehnoloogiatest levinuimaga. Aurujõuseadmete puudustena võib välja tuua suhteliselt kõrged hoolduskulud ning spetsialistide vajadus seadmete töös hoidmisel. Tootmisjaamad ei talu väikeseid koormusi ning, kui on madala võimsusega seadmed (alla 1 MW), siis elektriline kasutegur on väike, kuna aur on madala temperatuuri ja rõhuga [2].

Üks uutest tehnoloogiatest, mis viimase kolme aastaga on Eestis paaris kohas kasutusele võetud- Rakveres ja Kuressaares, on orgaanilise rankine'i ringprotsessiga ehk ORC-tsükliga (*Organic Rankine Cycle*) CHP. Tegemist on Rankine'i ringprotsessiga, kus ORC seadmed sarnanevad konventsionaalsete auruturbiin seadmetega, kuid turbiinis auru asemel kasutatakse spetsiaalset kõrge molekulaarmassiga orgaanilist vedelikku. Suure molekulaarmassiga orgaanilise vedeliku kasutamisega on võimalik efektiivselt kasutada madalatemperatuurilist soojust, et toota elektrienergiat suures võimsuse ulatuses. Eestis on kahes kohas- Rakveres ja Kuressaares kasutusel hakkepuidul töötavad ORC koostootmisjaamad. ORC puhul ongi kõige levinumaks kütuseks puitkütused, nagu näieks hakkpuit. Kütuse põletamisel saadud soojus antakse üle termoõlile, mida kuumutatakse kuni 300 ºC, ning termoõli soojus kantakse omakorda torusoojusvaheti abil üle silikoonõlile. ORC-tsüklis orgaaniline vedelik eelkuumutatakse soojusvaheti abil ning aurustatakse. Orgaaniline soojuskandja, milleks on silikoonõli, aurustub suhteliselt madala aururõhuga ning turbiini pöörlemiskiirus on madalam. Peale turbiini silikoonõli kondenseerub ning annab oma järele jäänud soojuse soojusvaheti kaudu näiteks kaugküttesüsteemile ja kondenseerinud termaalõli pumbatakse tagasi aurustisse, millega lõppeb ORC

termodünaamiline ringprotsess. ORC ringprotsessi kogukasutegur on 98%, mille puhul ei ole arvestatud katla kasutegurit. Kahe protsendiline energiakadu on tingitud generaatorist ning imeväikestest soojuskadudest. Orgaanilise Rankine'i ringprotsessi kasutamisel on mitmeid eeliseid. Orgaaniline töötav keskkond pole korrodeeruv, mille tõttu see ei kuluta turbiini labasid. Võrreldes auruseadmetega on käitamiskulud väiksemad ning seadmed on täielikult automatiseeritavad. ORC seadme lisamine olemasolevale biokütusekatlale on võrdlemisi lihtne. Seadme töötamisel on müratase võrdlemisi madal. Samuti on töötamisel väga lai koormuste ulatus (10−100 %) ja väikestel koormustel töötamisel on kasutegur suurem. ORC seadmete puudusteks on suhteliselt uudne tehnoloogia ning vähesed tootjad, mis tähendab konkurentsi puudumist ning seadmete võrdlemisi kõrget hinda. Teiseks puuduseks on kasutatavate termaalõlide kerge süttivus kokkupuudes õhuga, mille tõttu ei tohi kinnisest ahelast mingisuguseid lekkeid esineda [2, 13].

3.2.2. Gaasiturbiinjõuseadmed

Gaasiturbiini tööprotsess põhineb Braytoni termodünaamilisel ringprotsessil. Gaasiturbiinjõuseade sarnaneb oma ehituspõhimõttelt auruturbiiniga. Erinevus seisneb selles, et auru asemel paneb turbiini rootori pöörlema kütuse põlemisel tekkiv kõrge rõhuline gaas. Põlemiskambrisse sisestatakse kõrge rõhu all nii kütus kui ka õhk, kus see süüdatakse. Selleks, et rohkem õhku põlemiskambrisse mahuks kasutatakse õhu tihendamiseks kompressorit. Gaasiturbiini kasutegurit on võimalik suurendada gaasiturbiini sisenevate gaaside temperatuuri tõstmisega. Kui gaasiturbiini labasid ei jahutata, võib gaaside temperatuur olla kuni 850−900 °C. Jahutatavate labade korral aga ka kuni 1600 °C. Täiendava elektrilise võimsuse saavutamiseks kasutatakse sageli veeauru või vee sissepritsimist gaasiturbiini. Võimsuse kasv saavutatakse gaasiturbiini läbiva massikulu suurendamisega. Samal ajal on see hea vahend lämmastikoksiidide vähendamiseks heitgaasides, kuna alaneb leegi temperatuur. Vee sissepritsimisel saab suurendada küll gaasiturbiini võimsust, kuid selletõttu väheneb ka kasutegur. Koostootmisjaamade soojus saadakse gaasiturbiinist väljuvate heitgaasi kõrge temperatuuri (tavaliselt enam kui 400 ºC) ära kasutamisel ehk utiliseerimisel. Gaasiturbiini ja utilisaatorkatlaga toodetud soojuse ja elektri suhe on 2,0–3,5. Koostootmise kogukasutegur on kõrge ulatudes suurematel

seadmetel kuni 90 protsendini, millest soojuse osa ulatub 55 ja elektri osa 35 protsendini [2, 5, 11].

Olemas on ka kombineeritud gaasi- ja auruturbiiniga süsteemid, kus suunatakse gaasiturbiinist lahkuvad heitgaasid temperatuuriga 400–600 ºC utilisaatorkatlasse, kus toodetakse auru, mis suunatakse auruturbiini. Utilisaatorkatla ning gaasiturbiini kombineerimise korral on võimalik elektriline kogukasutegur viia 55–60 protsendini. Seega tagab kahe ringprotsessi (Rankine'i ning Braytoni) kooskasutamine elektritootmise kasuteguri kuni 60 %, kuid nimetatud tehnoloogia kasulikkus avaldub suurematel võimsustel nagu 75−400 MW. Kombineeritud tsükliga töö on äärmiselt paindlik. Võimalik on töötamine ka ilma auruturbiinita, juhtides gaasiturbiinist väljuvad gaasid otse korstnasse. Aurutsükli skeem võib olla mitmesugune. Lihtne üherõhuline või keerulisem kahe- või kolmerõhuline vaheülekuumendusega aurutsükkel. Variandi valik sõltub tehnilistest ja majanduslikest teguritest ning põhiliselt kasutatava kütuse omadustest ja hinnast. Üherõhulise aurutsükliga kombineeritud koostootmisseadmeid kasutatakse kui kütus on halvema kvaliteediga. Kallima kütuse ja pideva täiselektrikoormuse korral kasutatakse suurema kasuteguriga kahe- või kolmerõhulise aurutsükliga koostootmisseadmeid. Tavalistes aurutsükliga elektrijaamades on auru parameetrid samad, mis uutes kombineeritud tsükliga elektrijaamades – auru rõhk 16,5 MPa ja 560 ˚C. Suurem osa kasutatavatest seadmetest on kaherõhulise aurutsükliga [2].

Tehnoloogia, mis vajab kindlasti ära märkimist, on integreeritud gaaskombitsükkel (*integrated gasification combined-cycle*, lühidalt IGCC) koos CO_2 eraldamise ja hoiustamisega. Integreeritud gaaskombitsükkel on kasutatavate seadmete poolest gaasiturbiin koos utilisaatorkatlaga ning kui sinna juurde integreerida veel süsihappegaasi kinni püüdmise seade, on võimalik kasutada kütusena kivisütt sama keskkonnasõbralikult kui looduslikku gaasi. Ameerika Ühendriikide Keskkonna Kaitse Agentuur peab CO_2 eraldamise ja hoiustamisega seotud tehnoloogiate kasutamist parimaks süsteemiks kuidas vähendada söe põletamisel eralduvate heitgaaside hulka. IGCC tehnoloogia puhul kivisüsi või mõni muu kütus (nt biomass) gaasistatakse ning saadakse generaatorgaas. Generaatorigaas tuleb puhastada erinevatest tahketest osades, elavhõbedast, väävlist, CO_2'st, tõrvast jms. Viimase etapina toodetakse puhtast sünteesgaasist kombineeritud gaasi- ja auruturbiiniga süsteemis soojus- ning eleketrienergiat. Esimeses etapiosas süüdatakse gaas põlema avatud gaasiturbiinis (Brayton'i ringprotsess), kust edasi liiguvad turbiini heitgaasid utilisaatorkatlasse ja sealt auruturbiini (Rankine'i ringprotsess). Sellisel viisil on võimalik

vähendada CO_2 heitmete koguseid, samas tõsta kivisöest saadava energia hulka. Tänu jõudluse kasvule on võimalik tõsta põlemise temperatuuri tänapäevaselt tasemelt 1,370 – 1,430 Cº tulevikus kuni 1700 Cº'ni. Sellise tehnoloogiaga põlemise temperatuur on tehnoloogiliselt juba teostatud, kuid kasumlik see veel tänapäeval ei ole. Viimaste uuringute põhjal jääb elektriline efektiisus IGCC jaamal koos CO_2 eraldamise tehnoloogiaga vahemikku 31,5–40,1 %. Ilma CO_2 eraldamise tehnoloogiata on võimalik saavutada kõrgemaid elektrilise efektiivsuse näitajaid. Viimaste uurimuste järgi on IGCC jaamade efektiivsus 38,0–47,4 %. Efektiivsust mõjutavad mitmed asjaolud. Mida kvaliteetsem on süsi/põlevkivi, seda kõrgema efektiivsusega on võimalik toorainest gaasi toota. Oluline on ka see, et millist gaasistamise tehnoloogiat kasutatakse, sest üldjuhul odavad gaasistamise seadmed annavad ka madalamat efektiivsust. Integreeritud õhueraldamise seadme lisamine gaasiturbiinile suurendab elektrienergia tootmise efektiivsust ning kasutatava gaasiturbiini tehnoloogia ja turbiini sisenevate gaaside temperatuur omavad olulist mõju efektiivsusele [2, 14, 15].

3.2.3. Kolbmootor

Kolbmootoriga koostootmisjaamades on kasutusel sisepõlemis- kui ka välispõlemisega mootorid, mille puhul kasutatakse mehaanilise energia tekitamiseks vedela või gaasilise kütuse ja õhu segu, mis süttib plahvatuslikult. Sisepõlemismootoris muundub kütuse keemilisest energiast soojuseks tavaliselt 60 – 80 %, mida saab edukalt ära kasutada koostootmisjaamades madala temperatuuriga soojuse tootmiseks. Sisepõlemise jõumootoriga seadmed põhinevad, kas otto- või diiselmootoritel. Otto-sisepõlemismootoril töötavad seadmed kasutavad üldjuhul kütuseks maagaasi ning soojuse ja elektrilise võimsuse suhe on vahemikus 1,2−1,7. Soojusenergiad toodetakse nii heitgaaside soojusvahetist, õlijahutist, mootori jahutussüsteemist kui ka ülelaadimisõhu jahutist. Mootorite jahutussüsteemides kasutatakse õlijahuti veesärgi või järeljahuti soojusvaheteid. Kogu jahutussüsteemis tekkiv soojus kasutatakse ära soojuse tootmiseks. Põhiliseks soojusandjaks on lahkuvad heitgaasid, mis jahutatakse enne soojusvahetisse jõudmist 400−500 ºC juurest 70 °C-ni. Soojusvahetite abil on võimalik vee temperatuur tõsta kuni 115 °C ning toota ka tehnoloogilist auru. Ülelaetavatelt mootoritelt saab soojusenergiat ka ülelaadimisõhu jahutist, kus turbost väljuv kütuse-õhu segu või õhk jahutatakse. Ülelaetavate mootorite õhu-

kütusesegu juhitakse elektrooniliselt ja on varustatud eelpõlemiskambriga. Õhu- ja kütusesegu süütamine toimub süüteküünaldega nii, et igal küünlal on oma süütepool. Mootorite käivitamiseks kasutatakse õhk/gaasi- või elektristartereid. Kuna sisepõlemismootorid on kompaktsed ja suure kasuteguriga on nad leidnud ka laialdast kasutamist. Sisepõlemismootoritega seadmete kogukasutegur on vahemikus 85–92 % [2, 5, 11].

Kasutusel on ka välise põlemisega kolbmootorid, millest levinuim on inglise vaimuliku Robert Stirlingi 1817. aastal leiutatud stirlingmootor. Lihtsaim stirlingmootori tööpõhimõte põhineb kinnises silindris oleva töögaasi, milleks võib olla õhk, heelium, vesinik või muu gaas, perioodilisel jahutamisel ja kuumutamisel. Töögaasiks sobivad kõige paremini suure erisoojusega, erijuhtivusega ja madala viskoossusega ning väikese tihedusega gaasid. Töögaasi juhitakse vaheldumisi kuuma ja külma ruumi. Stirlingmootori silindris on üksteise peal kaks omavahel kooskõlastatult liikuvat kolbi. Pealmine on töökolb, mis annab kuumutatava gaasi paisumisel tekkiva töö edasi väntvõllile või muule liikuvale mehhanismile nagu näiteks paarishammasratastele, mis samuti kindlustavad mõlema kolvi sünkroniseeritud liikumise. Alumises silindris paiknev kolb on väljatõrjekolb, mis suunab kuuma ning paisunud gaasi jahutavasse külma ruumi, mis seejärel jahutatakse. Peale gaasi mahajahutamist juhitakse töögaas väljatõrjekolvi abil uuesti kuumutatavasse ruumi. Olemas on ka eraldi silindrites paiknevate külma ja kuuma ruumiga mootoreid, kus silindrid on omavahel ühendatud toruga. Silindri töögaasi kuumutamine võib toimuda mõne kütuse põletamisega, nagu näiteks biogaas või puidugraanulid. Lisaks võidakse kasutada kuumutamisel ka geotermaalsoojust ja kontsentreeritud päikesekiirgust. Väga suur potentsiaal stirlingmootorite kasutamisel oleks üksikehitiste jaoks mõeldud mini-koostootmisjaamadel. Kuna mootori silindris on gaasirõhk palju madalam kui sisepõlemismootoris, mistõttu ehituselt on need lihtsamad ja neid saab valmistada töötama väga väikeste võimsustega. Mini-koostootmisjaamade kasutamise eelised on samasugused nagu tavapärastel koostootmisjaamadel: vähenevad energia ülekandmisel ning jaotamisel tekkivad energiakaod ja on maksimaalselt võimalik ära kasutada primaarenergiast saadavat energiat. Stirlingmootori välise põlemise tõttu ei kasutata selle tehnoloogia puhul diisel- ja bensiinikütust, mille põlemissaadusteks on suurel hulgal süsinikdioksiid (CO_2) ja veeaur (H_2O). Suurim eelis stirlingmootorite kasutamisel mini-koostootmisjaamades on see, et ka väikestel võimsustel (umbes 12 kW) on tehtud koostootmisseadmeid mille kasutegur on 95% [2, 5, 16].

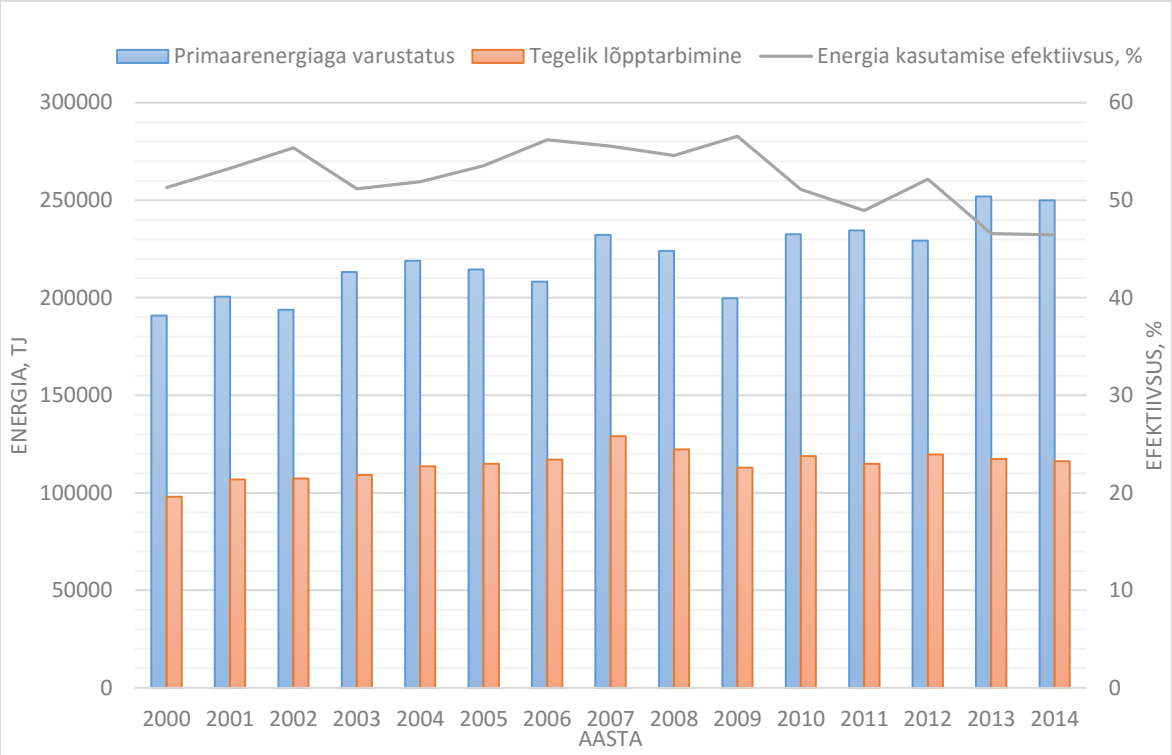
3.2.4. Kütuseelement

Kütuseelement on akupatareiga samalaadne elektrokeemiline seade, mis genereerib süsivesinikest nagu maagaas suhteliselt madalal temperatuuril keemilise energia elektrienergiat. Kütuseelemendis toimub kütuse elektrokeemiline oksüdatsioon ehk nn külm põlemine, mille tagajärjel saadakse elekti- ning soojusenergiat. Statsionaarsete seadmetega on võimalik kütuseelementi kasutada koostootmiseks. Kütuseelemendi kasutamisel on mitmeid plusse. Esiteks on see, et sel puuduvad liikuvad osad, seega see võib töötada ilma remondita palju kauem, kui näiteks kolbmootor või turbiin. Kütuseelemendiga seadmed võivad hooldusvabas talitluses töötada 10 000 kuni 40 000 tundi, kuna puuduvad liikuvad osad. Liikuvate osade puudumise tõttu on seadmed vibratsiooni- ja müravabad [5].

Kui eelnevate seadmete puhul oleneks kasutegur seadme suurusest, siis kütuseelemendi puhul põhimõtteliselt ei sõltu. Kütuseelemendi elektrienergia tootmise kasutegur on 40-60%. Kui kombineerida kütuseelementi gaasiturbiiniga on võimalik saavutada ka elektri tootmise kasutegur üle 70%. Tänaseks on välja töötatud mitmeid erinevaid kütuseelementide tüüpe, kuid siiani on nad võrreldes teiste energiaallikatega väga kallid. Kuid mida rohkem aeg edasi läheb ning tehnoloogia areneb, seda rohkem on lootust, et see muutub soodsamaks. Hinna vähenemisele aitaks kaasa see, kui kütuseelemendid jõuaksid seeriatootmisesse. Lisaks on probleemiks kütuseelementide puhul on nende ruumivajadus. See on mitu korda suurem kui näiteks diiselmootorist ja generaatorist koosnevatel seadmetel. Kui tulevikule mõelda, siis kütuseelement-koostootmisjaamad sobiksid erinevate hoonete (k.a elamute) kohalikeks energiaallikateks ja nende laialdasem kasutamine tähendaks üleminekut energia hajutatud tootmisele, mille tõttu väheneksid märkimisväärselt energia edastamise kaod [2, 5, 11].

3.3. Koostootmise roll Eestis ning Euroopas

Energia kasutamise efektiivsus on Eestis üldiselt väga madalal tasemel. Energia kasutamise efektiivsust saab võrrelda primaarenergia kasutamise suhtega energia lõpptarbimises. Toodetud energia ning tootmiseks kasutatava energia suhe näitab, kui tõhusad on energia tootmise protsessid. Eesti statistikaandmete järgi (joonis 3.3) on Eesti energiakasutamise efektiivsus 50 % ringis, kõikudes 45-55 % vahel olenevalt aastast [17].



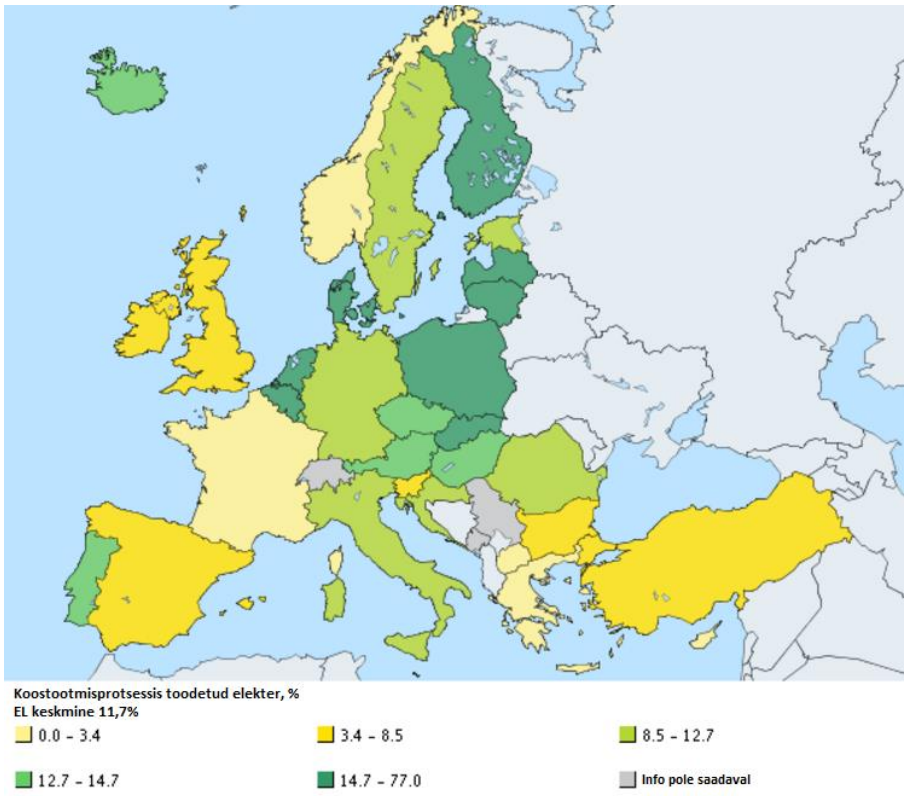
Joonis 3.3. Lõpptarbimise suhe primaarenergia kogutarbimises Eestis [6]

Peamiselt on energia kasutamise ja tootmise efektiivsus tingitud sellest, et üle 90% elektrienergiast toodetakse kondensatsioonielektrijaamades, mille kasutegur on madal. Samuti mõjutavad märgatavalt energiasektori efektiivsust kaod kaugkütte- ning elektrivõrkudes. Koostootmisjaamad on väga hea viis, kuidas tõsta energia tootmise efektiivsust, kuna koostootmisjaamade kasutegur on kõrgem ning kohapeal tarbitud energia toel on ülekande- ja jaotuskaod väiksed [18]. Kõrgema kasuteguriga primaarenergia kasutamine on efektiivsusnäitajate tõstmiseks väga oluline ettevõtete konkurentsivõime suurendamiseks, kuna on võimalik vähendada tootmiskulusid.

Euroopa Liidus peetakse elektri ja soojuse koostootmist üheks olulisemaks kütuse efektiivsema ja säästlikuma kasutamise tehnoloogiliseks viisiks [4].

Energiakasutuse tõhususe üks kriteeriumitest on koostootmisprotsessis toodetud elektri osatähtsus elektrienergia kogutoodangus, mis on Euroopa Liidus kehtestatud säästva arengu võrdlusindikaator. Hinnangute kohaselt võiks summaarselt Euroopa Liidu maades genereerida 40 % elektrienergiast koostootmisseadmetes [11]. Vastavalt Euroopa Komisjoni statistikaameti andmetele, mis avaldati 29. juunil 2015. aastal, toodetakse Euroopa Liidus

2013 aasta seisuga 11,7 % elektrienergiast kasutades koostootmist. Siiski koostootmisprotsessis toodetud elektri osatähtsus elektrienergia kogutoodangus on riigiti väga erinevad, varieerudes 0 % Malta puhul, kuni 77,7 %-ni Slovakkias. Eesti jääb 2013 aasta seisuga oma 9,3%'ga Euroopa keskmisest alla. Kui võrrelda Eestit oma lähiriikidega, siis Eestis on märgatavalt väiksem osakaal oma koostootmisprotsessis toodetud elektril, mis tähendab, et primaarenergia kasutamine on Eestis võrreldes meie naaberriikidega palju ebaefektiivsem. Näiteks Soomes on koostootmisprotsessis toodetud elektri osatähtsus elektrienergia kogutoodangust 34,1 %, Lätis 38,3 % ning Leedus 35 % [19]. Joonisel 3.4. on välja toodud koostootmisprotsessis toodetud elektri osakaal Euroopas 2013 aasta seisuga.



Joonis 3.4. Koostootmisprotsessis toodetud elektri osatähtsus elektrienergia kogutoodangus Euroopa riikides 2013 aastal [20]

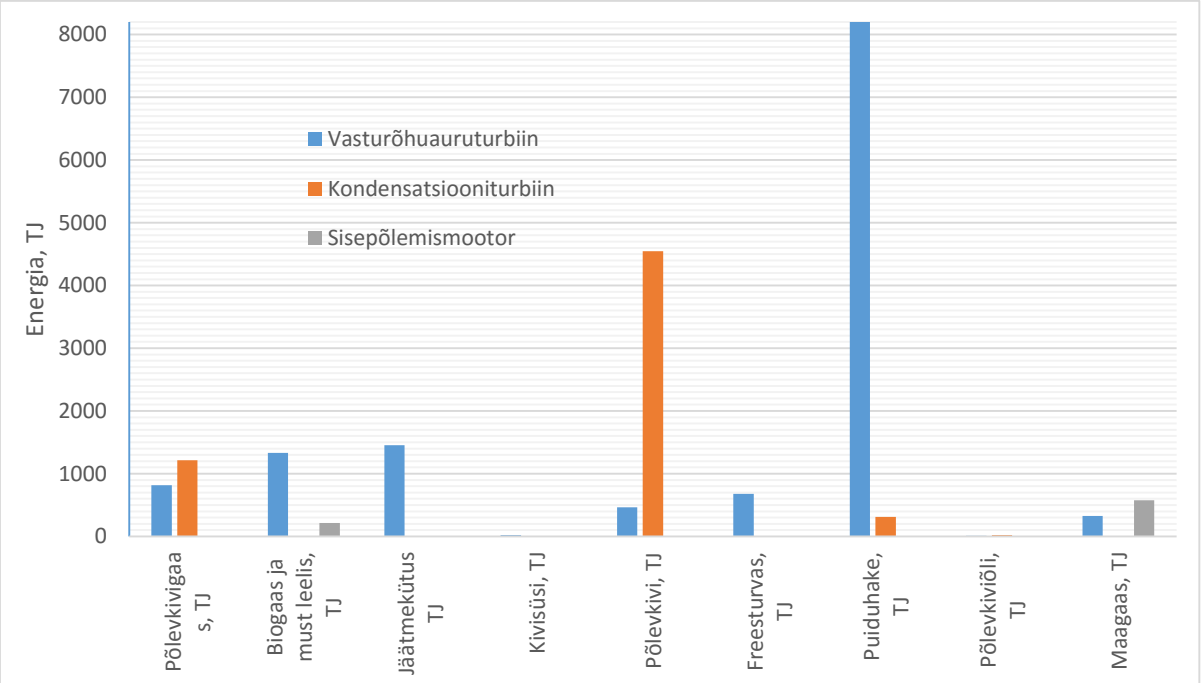
Eesti Statistikaaameti viimaste kättesaadavate andmete järgi oli 2014. aastal Eestis kokku 46 erineva genereerimise liigiga koostootmise turbiini, mille kogu väljundvõimsus oli 1432 MW. Aastal 2014 tootsid koostootmisjaamad 1239 GW·h elektrienergiat ning 3515 GW·h soojusenergiat. [17] Täpsemad andmed Eesti koostootmisjaamade võimsuste ja toodetud elektri ning soojuse kohta genereerimisliigi järgi aastal 2014 on leitavad tabelist 3.1.

Tabel 3.1. Koostootmisjaamade võimsused ja toodetud energia genereerimisliigi järgi aastal 2014 [17]

	Vasturõhu-auruturbiin	**Kondensatsiooni-turbiin**	**Sisepõlemis-mootor**	**Kokku**
Koostootmisjaamade arv	13	14	19	46
Maksimaalne elektrivõimsus, MW	223	220	23	466
Maksimaalne soojuse väljundvõimsus, MW	723	685	24	1432
Maksimaalne väljundvõimsus KOKKU, MW	**946**	**905**	**47**	**1898**
Toodetud elekter, GW·h	819	328	92	1239
Toodetud soojus, GW·h	2477	951	87	3515
Toodetud energia KOKKU, GW·h	**3296**	**1279**	**179**	**4754**

Hetkel on Eestis kasutusel auruturbiinjõuseadmetel ja sisepõlemismootoritel põhinevad koostootmistehnoloogiad. Tööprintsiibist lähtuvalt jagatakse auruturbiinjõuseadmed vaheltvõtuga kondensatsiooni ja vasturõhuauru seadmeteks. Eestis koostootmisrežiimil genereeritavast energiast üle kahe korra suurem energia tootmise osakaal on vasturõhuauruturbiinide tehnoloogial töötavatel koostootmisjaamadel. Kõige väiksem toodetud energia osakaal on sisepõlemismootoritel põhineval tehnoloogial [17].

Eestis kasutatakse koostootmisjaamade kütusena põhiliselt puiduhaket. Puiduhake moodustas 2014 aastal 43% kogu kasutatud energiast. Peale puiduhakke on kasutusel ka põlevkivi, põlevkivigaas, biogaas ja must leelis, jäätmekütus, freesturvas ning maagaas. Väga vähesel määral kasutatakse ka põlevkiviõli ning kivisüsi. Aastal 2014 oli nende osakaal alla 0,2% [17]. Parema ülevaate Eestis kasutatavatest kütustest generaatori liikide järgi saab jooniselt 3.4.



Joonis 3.4. Eestis koostootmisrežiimil tarbitud kütus aastal 2014 [17]

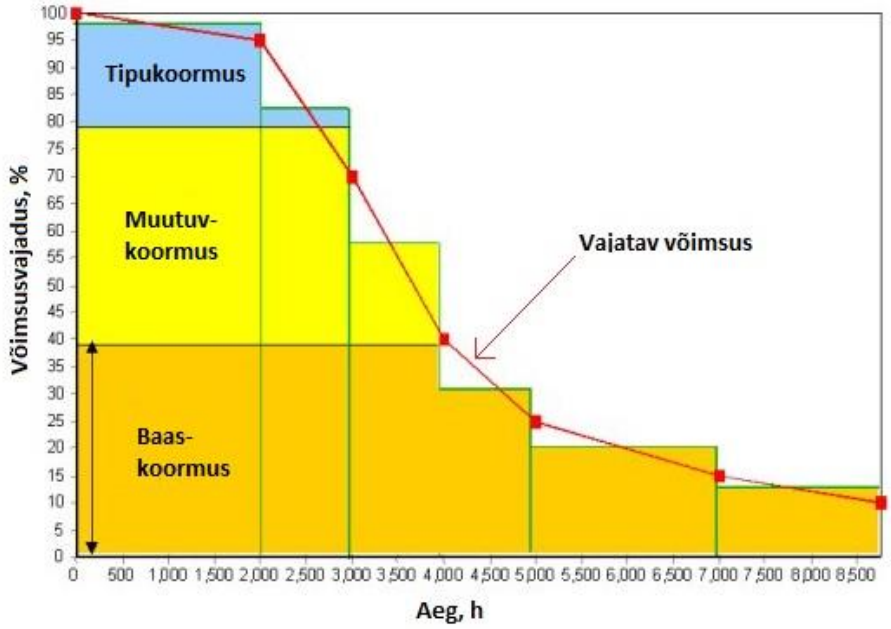
Tabeli 3.1 ning joonise 3.4 põhjal on näha, et Eestis kasutatakse kõige rohkem vasturõhuauruturbiini tehnoloogiaga puiduhakkel töötavaid koostootmisjaamasid. Kuigi vasturõhuauruturbiinide ning kondensatsiooniturbiinide maksimaalsed väljundvõimsused on suurusjärgus sama suured, siis vasturõhuauruturbiini koostootmistehnoloogial põhinevad jaamad toodavad kõige rohkem energiat. Aastal 2013 toodeti 3185 GW·h ning aastal 2014 3296 GW·h. Kuigi kondensatsiooniturbiinide tehnoloogial põhinevate koostootmisjaamade hulk on suur, siis nende üldine toodetud energia kogus on madal. Suurim kütuse osakaal kondensatsiooniturbiinide käitamisel on põlevkivil. Suurima panuse sellesse annab Narvas paiknev Balti elektrijaama 11. energiaplokk, mis saab töötada koostootmise režiimil. Oma 160 MW-se soojustootmisvõimsusega suudab koostootmisjaam varustada Narva soojusvõrgu kaugküttesüsteemi sooja veega. Tööstustarbijaid varustatakse ka auruga [21].

3.4. Koostootmisjaama rakendamise tehnilis-majanduslik analüüs ettevõtetes

Selleks, et otsustada kas koostootmisjaama on otstarbekas teatud tööstuses rakendada ja millist koostootmisjaama ettevõttesse rajada, tuleks läbi mõelda mitmeid tegureid.

Lisaks on vaja läbi viia konkreetse ettevõtte kohta tehnilis-majanduslik analüüs, millega on võimalus leida optimaalseim lahendus [22].

Esiteks on vaja teada milline on ettevõtte või antud piirkonna tarbijate tegelikkusele vastav soojuskoormuse kestvusgraafik ehk tegeliku või oodatava soojuskoormuse ajas muutumise graafik (joonis 3.5).



Joonis 3.5. Koormuskestvusgraafik [23]

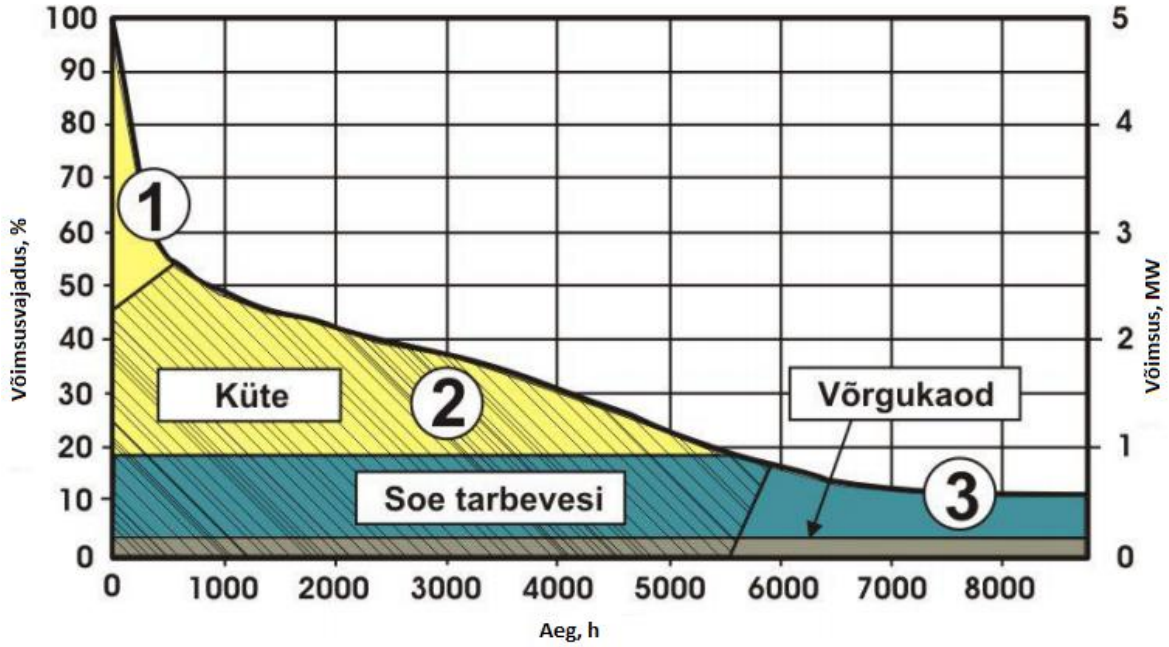
Koostootmisjaama valikul ettevõttesse tuleks lähtuda aastaringsest baaskoormusest. Seega valikul peab välja selgitama, milliseid koostootmise tehnoloogiaid on võimalik ning mõistlik kasutada, et seade saaks töötada aastaringselt võimalikult suure koormusega. Selleks on vajalik, et ettevõttes oleks aasta lõikes võimalikult ühtlane soojuskoormuse vajadus. CHP on põhjendatud juhul, kui seade saab töötada aastas vähemalt 6000-7000 tundi. Ettevõtte baaskoormust ületav soojustarve ostetakse sisse mõnelt muult soojatootjalt või kaetakse eraldi tipuseadmetega [4].

Tuleb teha kindlaks potentsiaalse elektri ja soojuse koostootja oma elektrienergia vajadus ja koostada selle kohta täpne koormusgraafik. Juhul, kui elektrienergiat toodetakse rohkem, kui on ettevõtte omatarve, tuleb toodetud elektrienergia ülejääk müüa võrku [4, 22].

Vajalik on uurida, millised on olnud ettevõtte soojuse ja elektrienergia tarbimise trendid ja suundumused viimaste aastate jooksul. Nende andemete põhjal tuleks kujundada lähiaastate

tarbimise prognoos ettevõtte poolt tarbitava soojustarbimise osas ning tarbitava elektrienergia osas [22].

Kuna koostootmisseadmeid on mõistlik projekteerida ainult baaskoormuse katmiseks, siis tuleks läbi mõelda, millisel viisil saab kaetud ka soojuse tipukoormuse nõudlus [22]. Kõige sobivamad ettevõtted, kus koostootmisjaamasid kasutada, on stabiilse soojuskoormus nõudlusega tootmistes nagu näiteks pelleteid tootvad ja muud puidu töötlemise firmad. Suurepäraselt sobivad koostootmisseadmed ettevõtetele, kes varustavad suuremaid linnasid sooja tarbeveega ja kaugküttevõrku soojusega. Linnade sooja tarbevee vajadus püsib aastaringselt ning majade küttevajadus Eestis on 7 kuu ringis, mida on näitlikustatult näha jooniselt 3.6.



Joonis 3.6. Tüüpiline kaugküttevõrgu koormuskestvusgraafik
1) tipukoormus, 2) muutuvkoormus, 3) suvine baassoojuskoormus [24]

Tuleb üle vaadata, millised on seniajani sooja tootnud ettevõtte finantsolukord (kassavoog, võlad, laenud jm finantskohustused). Juhul, kui on ettevõtte senisel soojustootjal mingisugused võlad, laenud või muud kohustused, tuleb otsustada, kes need katab [22].

Läbi tuleb teha põhjalik investeeringu tasuvuse uuring. Teha kindlaks investeeringu suurus ning milline on ettevõtte finantsvõimekus, et suurt investeeringut rahastada ja uurida, millised võimalused on saada toetuseid ning laenu. Koostootmisjaama rajamise finantsallikateks on omakapital, laenud ning toetused. Paljusid toetusi jagab Euroopa Liit

ning neid saab taotleda Eestis KIK'st, PRIA'st, Kredex'st või mujalt. Peale algse investeeringu tuleb arvestada ka jooksvate kuludega, milleks on erinevad tegevus-, hooldus- ja utiliseerimiskulud [22].

Kui tegemist on ettevõttega, kus on olemasolev elektri- ning soojavõrk siis on vaja teha kindlaks milliseid ümberehitusi tuleb teha soojavarustuses ning elektrilises osas. Elektrilises osas tuleb läbi mõelda, kuidas ja millistel tingimustel on võimalik ülejäävat elektrienergiat võrku müüa. Selleks tuleb Eleringiga liitumisleping sõlmida [22].

Valida tuleb kütuse liik, mida hakatakse koostootmisjaama käitamiseks kasutama. Lisaks tuleb teha kindlaks milline on kütuse kättesaadavus ja prognoosida, milliseks võib kujuneda kütuse hind lähiaastatel. Peamisteks kütuse liikideks, mida Eestis koostootmisel kasutatakse, on biokütusest hakkpuit ning taastumatutest maavaradest põlevkivi [22].

Kasutatava kütuse liigi järgi tuleb koostada hinnaprognoos, milliseks võib kujuneda soojusenergia hind (€/MW·h) tootmisel olemasolevate seadmetega ning analüüsida, kui suureks jääb soojuse tarbimine ning milline võib olla soojuse hind lähikümnenditel. Peale soojuse hinnaprognoosi tuleb vaadelda ka, milliseks võivad kujuneda lähiaastate jooksul elektrienergia müügi- ja ostuhinnad ettevõtte lähipiirkonnas [22].

Tuleks prognoosida milliseid vajalike investeeringuid tuleks tulevikus veel teha, et soojusvõrkude tehniline seisukord püsiks heal tasemel. Peab läbi mõtlema, kas lähitulevikus on vaja läbi viia suuremaid rekonstrueerimise või ümberehitustöid ja kui suured oleksid need investeeringud.

4. TOOTMISETTEVÕTTE JA KOOSTOOTMISJAAMA ISELOOMUSTUS

Antud magistritöö uurimisobjektiks on valitud Tartumaal Luunja vallas asuv soojuse ja elektri koostootmisjaam, mis kasutab kütustena peamiselt hakkpuitu (85 %) ning väiksemal määral freesturvast (15 %). Tartu külje all olevat koostootmisjaama opereerib AS-i Fortum Tartu tütarettevõte AS Anne Soojus. AS Fortum Tartu on kontserni kuuluvate soojusenergia tootmise ning soojus- ja elektrienergia müügiga, vahendamise ja ostmise ning kohalike kütuste tootmise ja varumisega tegelevate äriühingute valdusettevõte. AS-i Fortum Tartu struktuur (joonis 4.1.) koosneb kolmest hallatavast tütarettevõttest. AS Tartu Keskkatlamaja on võrguettevõtja, kelle põhitegevuseks on soojusenergia edastamine ja müük. Soojuse- ning elektrienergia tootmisega, kus asub ka uuritav koostootmisjaam, tegeleb AS Anne Soojus. AS Tartu Jõujaama peamisteks tegevusaladeks on varustada AS Anne Soojuse katlamaju kohalikku päritolu kütustega (puidujäätmed, freesturvas ja hakkpuit) ja turbatootmine katlamajade jaoks [25].

Joonis 4.1. Kontserni struktuur [25]

Ettevõtte Anne Soojus alla kuulub kohalikel kütustel töötav moodne koostootmisjaam. Tartu Elektrijaamas toodetakse kommertseesmärgil elektrit ning sellest üle jäävat jääksoojust kasutatakse aastaringselt täielikult ära Tartu linna kaugküttevõrgu baaskoormuse katmiseks, mis on antud koostootmisjaama põhieesmärgiks. Lisaks on jaam võimeline tootma tehnoloogilist auru rõhuga 8 baari lähiklientide ülekuumendatud kuumaveevõrkude tarbeks ning madalama rõhuga (3 baari) omatarbeks [25, 26].

4.1. Koostootmisjaama üldkirjeldus

Fortum Tartu koostootmisjaama ehitustöödega alustati aprillis 2007. aastal. Oktoobri kuus jõudsid objektile esimesed põhiseadmed ning 2008. aasta oktoobris toimus katlas esimese tule süütamine. 29. mail 2009. aastal toimus Fortum Tartu koostootmisjaama pidulik avamine. Koostootmisjaama seadmete kohta annab üldisema ülevaate järgnevalt esitatud andmed [25].

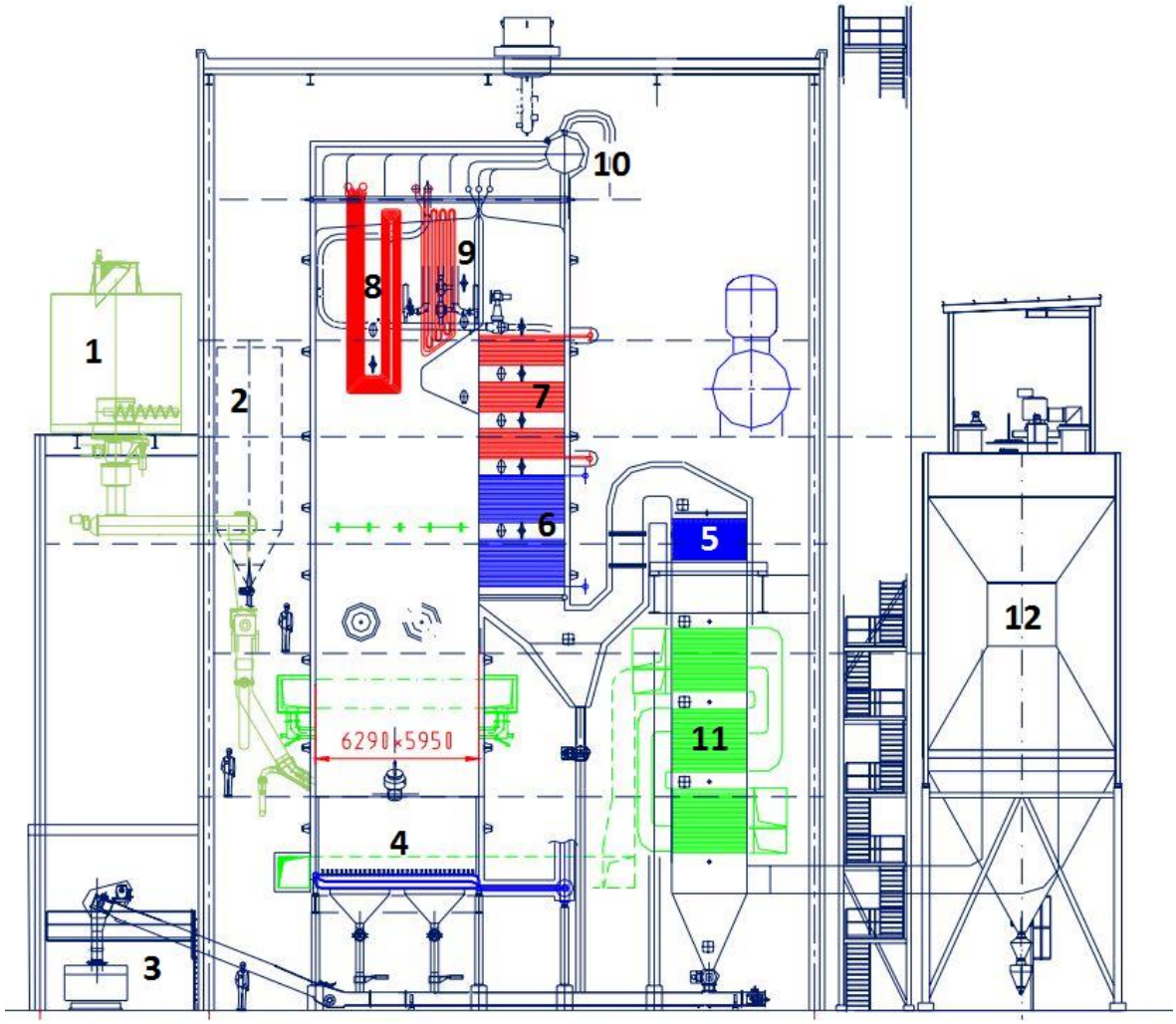
Koostootmisjaama üldandmed [25]:

- Elektriline võimsus: 24,8 MW
- Soojuslik võimsus: 50 MW
- Suitsugaaside pesuri võimsus: 15,8 MW
- Põhikütused: freesturvas, puiduhake, puidujäätmed
- Reserv ja stardikütus: maagaas
- Kütusetarvidus aastas: 520 GW·h
- Katla auru tootlikkus: 28,5 kg/s
- Maksimaalne vee tarbimine: 5 m^3/h
- Vee ettevalmistuse max. tootlikus: 30 m^3/h
- Planeeritud elektritoodang aastas: 158 GW·h
- Planeeritud soojuse toodang aastas: 304 GW·h
- Katla kasutegur (ilma pesurita): 88,4 %

Kasutatavad põhiseadmed ja tootjaandmed:

- Keevkiht aurukatel: Metso Hybex (525°C, 115 bar, 28,5 kg/s)
- Auruturbiin ja generaator: Siemens SST-600 (6774 rpm)
- Generaator: Sünkroongen. (1500 rpm, 10,5 kV, 24,8 MW)
- Suitsugaaside pesur: Metso Power (15,8 MW)
- Suitsugaaside puhastusseade: 3 väljaga elektrifilter
- Kütuse vastuvõtusüsteem: BMH Wood Technology (kaal, konveierid, vastuvõtusõlm, silomahutid)
- Kütuse etteanne peale päevasilosid: Raumaster

Koostootmisjaama katlahoone läbilõige on näha jooniselt 4.2, kust on näha Metso Power'i poolt valmistatud keevkihtkatel ning mõningased tähtsamad koostootmisjaama süsteemi osad. Katlahoone on seitsme korruseline ning 45 meetri kõrgune.



Joonis 4.2. Koostootmisjaama katlahoone läbilõige [27]

1) Kütusesilod, 2) Liivasilo, 3) Põhjatuha kogumispunker, 4) Keevkihtkatla kolle, 5) Ökonomaiseri I aste (kõrgsurve-aurueelsoojendi), 6) Ökonomaiser, 7) Auruülekuumendi I aste, 8) Auruülekuumendi II aste, 9) Auruülekuumendi III aste, 10)Aurutrummel, 11) Õhueelsoojendi, 12) Elektrifilter.

Joonisel 4.2 välja toodud tehnoloogilised süsteemid on pikemalt lahti selgitatud juba järgmises töö jaotises 4.2.

4.2. Koostootmishoone tehnoloogiasüsteemid

4.2.1. Kütuse vastuvõtt ja hoiustamine

Kogu Fortum Tartu Elektrijaama koostootmise protsess saab alguse kütusest ja selle tarnimisest. Kütuse tarnimisega tegeleb Fortumi tütarettevõte AS Tartu Jõujaam, kes ostab eelnevalt sõlmitud lepingute alusel kütte freesturvast, hakkepuitu ja saepuru koos kohaletoomisega [25]. Igal aastal korraldatakse kütte tarnimiseks hanked, millega pannakse paika tarneahelad ning hind. Kütus, mida kateldes kasutatakse peab, olema homogeenne ehk kütus ei tohi sisaldada nimetamisväärses koguses mittepõlevaid võõrlisandeid.

Kütuste vastuvõtmine toimub koostootmisjaama vastuvõtupunktis, mida on näha jooniselt 4.3. Joonisel 4.3 on näha, kuidas hakkpuitu laaditakse vastuvõtupunkti. Vastuvõtupunkt asub hoone sissesõidul ning koosneb kahest vastuvõtupunkrist. Enne kütuse ladustamist vastuvõtupunkrisse kaalutakse kõik veokid ning pärast kütuse maha laadimist uuesti, selleks et saada teada tarnitud kütuse mass. Parempoolne kõrgem punker on mõeldud hakkpuidu vastuvõtmiseks konveieriga masinate jaoks ning vasakpoolne kallutavate masinate jaoks, kus toimub hakkpuidu ja turba vastuvõtt.

Joonis 4.3. Tartu Elektrijaama kütuste vastuvõtupunkt

Enne kütuse transportimist, mööda punkri all oleva konveierit sõelumismajja, võetakse igast kohale toimetatud kütuse koormast kütuseproovid. Kogutud kütuseproovidest üks pool kogutakse niiskuse määramiseks ja teine pool tuhasuse ning küttevääртuse määramiseks. Kohapeal tehakse igapäevaselt kütuse keskmise niiskuse hindamiseks analüüsid ning kaks korda kuus saadetakse kütuse proovid laborisse, kus analüüsitakse kütuse küttevääртust ning tuhasust. Kütuse pideva põlemise tagamiseks ilma abikütuseta tuleb etteantava kütuse alumine küttevääртus hoida üle 5000 kJ/kg, sest vastasel juhul on vaja abikütusena kasutada maagaasi.

Peale kütuse saabumist vastuvõtupunkrisse toimub selle sõelumine. Kuna katlas kasutatava keevkihttehnoloogia üheks nõudeks kütustele on ühtlane hakkpuidu tüki suurus. Sõelumismajas toimub esiteks magnetiga kogu metalli välja võtmine ning seejärel sõelutakse läbi kogu saabunud kütus, et tüki suurus vastaks nõutavale suurusele. Liiga suure fragmendiga hakkpuit purustatakse sõelumismajas ning paraja suurusega kütus saab edasi liikuda mööda konveiereid kütuse põhimahutitesse ehk silodesse, mis asuvad hoone territooriumil ja on näha joonisel 4.4. Kütusesilosid on kaks tükki, üks on hakkpuidu hoiustamiseks ning teine turba jaoks, kumbki neist on mahuga 3000 m^3. Konveier transpordib kütuse sõelumismajast ülesse ning üleval toimub horisontaalse konveieriga vastavalt kütuse tüübist kütuse sorteerimine, kas hakkpuidu või turba silosse.

Joonis 4.4. Turba ning hakkpuidu põhimahutid

Põhimahutite all asub omavahel ühendatud konveier, kus segatakse kokku õiges vahekorras kütusesegu, milleks on 85 % osakaaluga hakkpuit ning 15 % turvast. Kütuse kätte saamiseks silodest on mahutite põhjas kruvi, mis mööda mahuti põhja ringi käib ning vastavalt oma liikumise kiirusele doseerib õiges koguses kütuse alla konveierile, kus kaks kütust omavahel õiges vahekorras segunevad. Põlemiseks õige kütusesegu liigub edasi mööda konveiereid päevasilodesse, mida on samuti kaks, mõlemad 80 m^3 mahutavusega. Kahest päevasilost paralleelselt liigub kütus konveieritega juba õiges koguses katlasse.

4.2.2. Kütuse ja liiva etteandesüsteem

Kütuse etteandesüsteemi ülesandeks on hoida hakkpuidu ja turba segu õiges koguses kütusepunkrites ning tagada tahkekütuse etteanne punkritest katlasse. Sõltuvalt jaama koormusvajadusest, saab kütuse etteande reguleerimise teel muuta aurutootlikust.

Kaks kütusepunkrit, kus sees on õiges vahekorras segatud kütus, paiknevad tootmishoone külje peal üksteise kõrval. Kütuse etteande jõudlus ühe liini kohta on projekteeritud kütuse kogusest 2x75 %, mis teeb kütuse etteandeliini jõudluseks 106 m^3/h. Kütust söödetakse normaalses töörežiimis koldesse kahest päevasilost mõlemat liini pidi korraga ja võimalikult ühtlaselt. Kütuse kättesaamiseks punkritest on neile sisse ehitatud pöördtigu teisaldusseadmed, mis kujutab endast tigukonveierit, mis pidevalt ümber punkri telje ringi tiirleb ja kütust tasakaalustustaskutesse suunab. Väikesed tasakaalustustaskud on mõlema punkri ees ja need on varustatud radiomeetriliste tasememõõdikutega, mis töötavad paralleelselt kolde esiseinaga. Tasakaalustustaskute all on etteande-tigukonveierid, mis juhivad kütust edasi kütuse etteanderennidesse. Etteanderennid on varustatud pöördsööturitega, millega tagatakse ohutus, et tuli ei leviks rikke olukorras edasi punkritesse. Kaks kütuse etteanderenni on varustatud ka kütuse läbipuhumise õhusüsteemiga, millega paraneb kütuse jaotumine ja sisenemine koldesse ning millega toimub ka kütuserennide kuumuse eest kaitsmine jahutamise teel [28].

Katla kolde põhjas on mullistuvat keevkihti, milleks kasutatakse kvartsliiva. Liiva on vaja lisada kolde põhja iga nelja tunni tagant nii palju, kui palju seda puhastamise käigus koos põhjatuhaga välja võetakse. Liiv liigub hoiustamispunkrist koldesse tigukonveieri ja etteandetoru kaudu. Liiva hoiustamiseks kasutatakse lisaliiva punkrit, mida täidetakse

veokitelt pneumaatiliselt. Katlamaja seinal asub toru, mille kaudu saab liiva pneumaatiliselt pumbata liivapunkrisse [28].

4.2.3. Keevkiht katla põlemissüsteem

Kütuste põletamiseks on koostootmisjaamas kasutusel keevkihtkatel, mida nimetatakse ka mullistuvaks ehk statsionaarseks keevkihtkatlaks. Antud katel sobib väga hästi turba, biokütuste ja jäätmete põletamiseks. Keevkihtkatlas antakse kütus katla alumisse ossa ning altkaudu lisatakse kütusekihti suurel kiirusel primaarpõlemisõhku, mis lõpuks kütusekihi õhu poolt ülesse tõstab. Kütuse osakesed hakkavad kolde põhjas hõljuma ning muudavad pidevalt oma asukohta, mis näiliselt on justkui keemine, millest tulenebki termin – keevkiht. Kütusekihist kantakse põlemise käigus välja niiskus, eraldunud lendained ja tuhk, samuti peened kütuseosakesed, mis kolderuumis ära põleda ei jõua. Keevkihi temperatuur on suhteliselt madal, umbes 850 ºC, mille tõttu tuhk ei hakka sulama ja kolle ei šlakistu ning vähenevad lämmastikuheitmed [29].

Hakkpuidu ning turba põletamiseks on vajalik moodustada inertsest materjalist mullistuv keevkiht, milleks kasutatakse kvartsliiva. Keevkiht moodustatakse looduslikust sõelutud liivast, kütusest ja tuhast ning keevkihistatakse lisades primaarõhku. Kuna keevkihis olev liiv on suure soojusmahtuvusega, on võimalik saavutada stabiilne põlemine ka siis, kui kütuse niiskussisaldus on kõrge. Väikesed kütuseosakesed põlevad kihi kohal kiiresti, samal ajal kui suuremad raskemad osakesed vajuvad liivakihti, kus toimub kütuse kuivamine ja gaasistumine. Pealmises keevkihis toimub peamiselt jääksüsi põlemine ja lenduv aine põleb nii keevkihis kui selle kohal.

Selleks, et koldes saaks edukalt toimuda põlemine, on vaja kütuse põlemiseks koldesse anda primaar-, sekundaar- ning uuritava katla puhul antakse ka tertsiaalõhku. Kui kütus on koldesse antud, toimub selle kuivamine. Kütuse niiskussisaldus peaks olema katlasse andmisel suhteliselt kõrge, vastupunktis peab kütuse saabumisniiskus olema 30-56%. See on vajalik selleks, et lahkuvast niiskusest saaks suitsugaaside pesuriga välja võtta soojusenergia. Peale kütuse koldes kuivamist, toimub kütuse pürolüüs, mille tulemusel hakkab kütus gaasistuma ning temperatuuril 500-600 °C toimub gaasi põlemine, milleks on vaja kolderuumi anda hapnikurikast õhku. Keevkihist antakse kütusele põlemisõhku, mida

nimetatakse primaarõhuks ehk altõhuks. Eelsoojendatud keevkihistatav õhk juhitakse koldesse kõrgsurveventilaatoriga õhudüüside kaudu, mis asuvad resti poomidel. Selle toimel tekib kütuse laiendatud põlemise tsoon, tahke aine ja gaasi lähedane kokkupuude ja suur soojusülekanne keevkihis.

Ülevalpool toimuval lendosade ja gaasi põlemisel on sekundaar- ja tertsiaalõhu lisamise vajadus, mis aitavad kaasa paremale põlemisele. Eelsoojendatud sekundaar- ja tertsiaalõhk juhitakse koldesse keevkihi pealt, kus toimub gaasistunud kütuse lõplik põlemine. Kusjuures sekundaar- ja tertsiaalõhu vajadus on hakkpuidu ja turba põlemisel suurem kui primaarõhu oma. Primaar- sekundaar- ja tertsiaalõhu vaheline õhujaotus määratakse sõltuvalt kütuse kvaliteedist, kihitemperatuurist ja katla tootlikusest [28, 29].

Keevkiht katla peamised omadused [27, 29]:

1. Madal ja ühtlane põlemistemperatuur (800-850˚C), mille tõttu tuhk ei sula ja kolle ei šlakistu.
2. Põlemisõhu hea reguleerimine võimaldab hoida madalaid lämmastiku heitmeid.
3. Samas katlas on võimalik kasutada erinevaid kütuseid, mille omadused võivad kiiresti ja olulised muutuda.
4. Hea kütuse ja õhu segamine ning kolde suur soojusmahtuvus võimaldavad ka niiske, viletsa ja madala küttevääртusega kütuse korral kõrge kasuteguriga põletamist.
5. Peaaegu kogu tuhk väljub lendtuha kujul, väljaarvatud suuremad osakesed, mis eemaldatakse põhjatuhana.
6. Keevkihtkatel ei vaja kütuse eeltöötlemist, vajalik on vaid ühtlane kütuse tüki suurus ja rauaeraldus.
7. Keevkihtkolde suure massiga kuum liivakiht omab suurt soojusmahtuvust, mis hoiab põlemise stabiilsena, mida võib mõjutada suuresti muutuv kütuse kvaliteet.

4.2.4. Kolde põhjatuha eraldamissüsteem

Hakkpuidu ja turba põletamisel tekkivast tuhast enamus on lendtuhk, mis väljub koldest koos suitsugaasidega. Väiksem osa tuhast sadestub aga kolde põhja põhjatuhana, kus see kogutakse ja transporditakse kogumispunkrisse. Põhjatuha moodustavad põhiliselt kütusega

koldesse sattuvad raskemad väikesed kivikesed ja metall osakesed, mida eelnevalt välja ei ole suudetud võtta. Kolde põhjas on neli koonuse kujulist lehtrit, kuhu põhjatuha raskemad osakesed sadestuvad. Olenevalt sadestunud võõrlisandite hulgast, puhastatakse aeg ajalt (umbes 4 tunni tagant) koldest põhjatuhk, mis lastakse koos väikese koguse liivaga läbi restirenni põhjatuhakonveierile. Põhjatuhakonveier on varustatud vesijahutusega, kuhu kuulub ka soojusvaheti, millega võetakse süsteemist pärit soojus ja juhitakse see tagasi suletud vesijahutussüsteemi. Vesijahutusega jahutatakse maha jämematerjal, mis kolde põhjast tuleb. Mööda vesijahutusega kraavkonveierit liigub põhjatuhk edasi sõelumisseadmesse, kus suurema fraktsiooniga osakesed sõelutakse välja ja transporditakse kogumiskonteinerisse ning sobilik liivamaterjal suunatakse tagasi koldesse.

4.2.5. Lendtuha puhastussüsteem

Lendtuhk eraldub katla koldest koos põlemisgaasidega ning on vajalik kinni püüda enne korstnasse jõudmist. Katlast väljunud puhastamata suitsugaas läbib esimesena ökonomaiseri, mille järel liiguvad puhastamata suitsugaasid elektrostaatilisse filtrisse, mida on uuritaval jaamal kokku kolm ehk tegemist on kolme väljaga elektrifiltriga. Elektrifiltri tööpõhimõtteks on suitsugaasides oleva lendtuha osakeste elektrostaatiliselt positiivselt laadimine, kui tuhaosakesed läbivad filtri plaatide vahelist kõrge alalispingega (50-80 kV) elektrivälja. Positiivselt laetud tuhaosakesed liiguvad negatiivselt laetud plaatide vahelt läbi ning tõmbuvad vastu plaate ja, kui tuhaosakesi on piisavalt palju kogunenud, puhastatakse koputamisega külge tõmbunud osakesed filtrite all olevasse tuhakogujasse [30].

Elektrifiltrid puhastavad suitsugaase lendtuhast, mis sisaldavad kütusetuhka, põlemata süsiniku ning liiva peenfraktsioone. Kolm elektrifiltrit on omavahel jadamisi ühendatud. Esimene filter filtreerib ligikaudu 90 % suitsugaasides olevast lendtuhast ning teine filter ~10 % lendtuhast ja kolmas elektrifilter on sisuliselt reservis ja saab tööd juhul, kui mõne kahe esimese filtriga peaks midagi juhtuma.

Elektrifiltri plaatidelt alla pudenenud tuhk transporditakse edasi pneumaatiliselt pneumokonveierite abil lendtuhapunkritesse. Lendtuhapunker on varustatud kuiva ja märja mahalaadimisseadmega. Kuivsüsteem koosneb pöördsööturist ja tühjendusvoolikust koos väljutustoruga. Märgsüsteem koosneb tuharennist, pöördsööturist ja tuhaniisutist.

Lendtuhapunkri põhjas olev tuhk muudetakse tühjendamise ajal tehnoloogilise õhu abil perioodiliselt hõljuvaks, et vältida tuha paakumist [28].

4.2.6. Tahmapuhastussüsteem

Tahmapuhastussüsteemi ülesandeks on puhastada auruga katla ülaosas asuvate auruülekuumendite, ökonomaiseri ja suitsugaaside õhueelsoojendi soojusülekandepindu, Puhastamiseks vajalikku auru võetakse põhiülekuumendite vaheltvõttudest. Aururõhku vähendatakse rõhualandusventiilide abil enne tahmapuhuriteni jõudmist umbes 25 baarini ning umbes 351 ºC-ni. Tahmapuhastussüsteem koosneb kokku 15 tahmapuhurist, millest kuus puhastavad auruülekuumendeid, neli ökonomaiserit ja viis õhueelsoojendeid [28].

Tahmapuhastussüsteemi eesmärgiks on igapäevaselt soojusülekande pindasid puhastada kahjulikest tuhasetetest. Tahmunud soojusülekandepinnad võivad tekitada ummistusi ning vähendavad soojusülekannet, mistõttu igapäev toimub ökonomaiserite, õhueelsoojendite ja ülekuumendite puhastamine. Tänu tahmapuhastussüsteemile saab koostootmisjaam igapäevaselt töötada. Ainult umbes kahel nädalal aastast toimub koostootmisjaama katla seiskamine, mille käigus teostatakse põhjalikum katla pindade puhastamine ning viiakse läbi süsteemide korrasoleku inspektsioon.

4.2.7. Vee- ja aurusüsteem

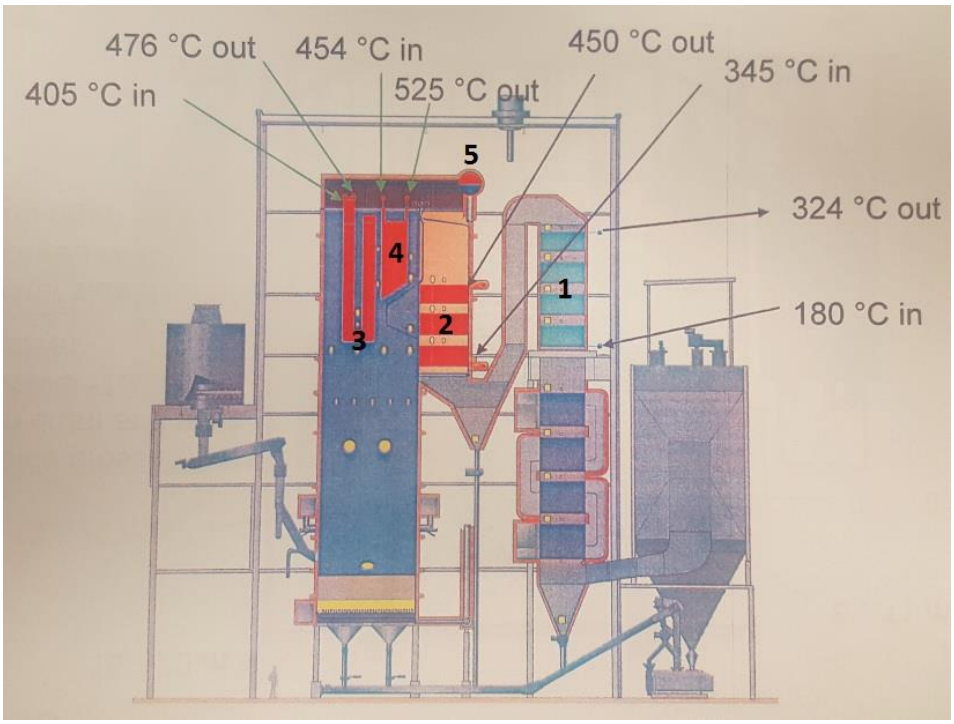
Katla vee- ja aurusüsteem koosneb paljudest erinevatest osadest, millest välja tuua järgnevad põhilisemad süsteemiosad: aurutrummel, ökonomaiser, aurugeneraator (kolle), auruülekuumendi, läbivoolumahuti ning tühjendus- ja õhutusüsteem [28].

Vee- ja aurusüsteemi peamiseks ülesandeks on kuumutada ja aurustada vajalikus koguses vett, mis läheb soojavõrgu varustamiseks ja elektrienergia tootmiseks tarvis. Seda kõike tuleb teha võimalikult energiasäästlikult ning taaskasutades ära lahkuvate suitsugaaside soojust. Katla aururingluse ülesandeks on toota vajalikus koguses ülekuumendatud auru, mis vastaks ettemääratud seadeväärtustele [28].

Vee- ja aurusüsteemi põhiandmed on [28]:

- Katla auru maksimaalne nimitootlikus pidevrežiimis kasutamisel 28,5 kg/s
- Auru temperatuur auru põhiventiili juures 525 ºC
- Auru rõhk põhiventiili juures 115 bar
- Toitevee temperatuur ökonomaiseri sisselaske juures 180 ºC
- Katla surveosa projektikohane rõhk 138 bar

Hea ülevaate toitevee tsirkuleerimise kohta vee- ja aurusüsteemis annab joonis 4.5.



Joonis 4.5. Toitevee ja auru temperatuurid [28]

1) Ökonomaiser, 2) Auruülekuumendi I aste, 3) Auruülekuumendi II aste, 4) Auruülekuumendi III aste, 5) Aurutrummel.

Esimeseks seadmeks, mida vesi läbib, on ökonomaiser (1), kus toimub vee temperatuuri tõstmine umbes 324 ºC-ni. Peale ökonomaiserit liigub eelsoojendatud toitevesi aurutrumlisse (5). Peale aurutrumlit juhitakse eelsoojendatud vesi edasi katla seintes paiknevatesse torudesse, mida nimetatakse aurustiks (ka aurugeneraatoriks), kus toimub vee aurustamine. Aurutrumlis (5) olev vesi on pidevalt ringluses aurustis, kus tekib vee ja auru segu, mis tõuseb läbi katla seinte üles trumlisse. Vesi läheb uuele ringile, aur liigub trumli

ülemisse ossa, kust aur juhitakse esimesse auruülekuumendisse (2), mis koosneb kolmest paketist. Peale auruülekuumendi I astet juhitakse aur auruülekuumendi II astmesse (3), kus saavutab ülekuumendatud aur umbes 476 ºC. Teise astme ülekuumendist juhitakse aur viimasesse ehk III astme ülekuumendisse (4), mille järgselt saavutab ülekuumendatud aur oma nimiparameetrid (525 °C, 115 bar). Nimiparameetritega aur juhitakse siis juba turbiini, kust väljudes aur annab ära oma soojust ning kondenseerub ja toitevesi suunatakse jälle uuele ringile.

Ökonomaiser

Toitevee eelsoojendi ehk ökonomaiseri ülesandeks on eelsoojendada aurukatlasse suunduvat tarbevett katlast lahkuvate suitsugaasidega. Katlast lahkuvate suitsugaaside soojusenergia taaskasutamine on väga otstarbekas, kuna sellega suurendatakse kasutatavast kütusest saadava energia üldkasutegurit.

Uuritava koostootmisjaama ökonomaiser on valmistatud siledatest terastorudest. Ökonomaiser on paigaldatud gaasikäigus auru ülekuumendusastmete järele ehk kolmandasse sektsiooni. Toitevee eelsoojendi töötab vastuvoolu põhimõttel, mis tähendab, et suitsugaasid liiguvad ülevalt alla ja soojendatav toitevesi tõuseb alt ülesse.

Aurutrummel

Aurutrumli ülesandeks katla vee- ja aurusüsteemis on toimida vee ja auru eraldajana katla seintes paikneva aurugeneraatori (aurusti) ja ülekuumendite vahel. Aurutrumlis ringleb pidevalt vesi, mis voolab katla seintes. Katla seintes paiknevates torudes toimub vee ringlus ja vee temperatuuri tõusmine. Vesi aurustub ning vee ja auru segu tõusevad mööda katla seinasid ülesse trumlisse. Aurutrumlis juhitakse auru ja vee segu tsükloneraldisse, kus toimub vee ja auru eraldamine. Tsüklonisse sisenemisel antakse seal keskkonnale pöörlev liikumine, vesi pressitakse tsentrifugaaljõu toimel vastu tsükloni seina, kust vesi alla valgub, aur aga liigub üles. Tsükloneraldist suunatakse vesi katla seintesse uuele tiirule, aur aga liigub ülemisse osasse ning väljub trumlist, kust see juhitakse edasi ülekuumendi esimesse astmesse. Iga tsükloneraldi kohal on lamelleraldi tsoon, mida aur läbib ning millega trumlist väljuva auru niiskus võimalikult madalal hoitakse [28, 31].

Aurugeneraator (kolle)

Katla koldes toimub kütuse põlemine, kus paikneb katla seintes olev aurugeneraator. Aurugeneraatori küttepindadel toimub põlenud kütuselt vabanenud soojuse ülekandmine katla seintes paiknevates torudes ringlevale veele, kus vee temperatuuri tõstetakse keemistemperatuurini kuni vesi aurustub. Selleks, et kogu vesi aurustuks, peab vesi läbima aurugeneraatorit mitu korda. Aurugeneraatoris voolavad vesi ja aur peavad olema pidevas ringluses, millega tagatakse torude pidev jahutamine. Vee ja auru tsirkulatsioon toimub vabaringlusega. See tähendab, et vee ja veeauru segu tiheduste erinevuse tõttu ringleb soojuskandja tänu langev- ja tõusutorudele. Langevtorudeks nimetatakse neid torusid, mida mööda vesi juhitakse kolde alumisse sektsiooni ning tõusutorudeks neid, mida mööda vee ja auru segu ülesse trumli suunas liigub. Aurugeneraator koosneb mitmest tsirkulatsioonikontuurist, mis paiknevad nii keevkiht-põlemisresti kolde põhjas kui ka seintes [32].

Auruülekuumendid

Auruülekuumendi ülesandeks on tagada auru ülekuumendus auru küllastunud olekust kuni maksimaalse temperatuurini 525 °C. Auruülekuumendi koosneb kolmest astmest. Esimene aste on konvektiivtüüpi põhi-auruülekuumendi, teine aste on kiirgustüüpi auruülekuumendi ja kolmas aste on kiirgus-konvektiivtüüpi auruülekuumendi ehk kus soojusülekanne toimub nii kiirguse, kui ka konvektsiooni teel [28].

Esimese astme põhi-auruülekuumendi on jagatud kolmeks vahekollektoritega pakettideks. Aur alustab oma liikumist läbi vahekollektori esimesest paketist, mis asub laes ja tagaseinas. Pärast seda liigub aur alla rõngaskollektorisse, mis asub katlaploki all ja sealt jagatakse aur külgseintes paiknevasse teise paketti. Kui aur on läbinud teise paketi külgseinad, juhitakse aur põhiülekuumendi kolmanda paketi jaotuskollektorisse. Aur suunatakse edasi kolmandasse paketti, kus aur liigub mööda auruülekuumendi torusid suitsugaaside voolule vastu. Sellega lõppeb põhi-auruülekuumendi esimene aste, kust aur liigub edasi ülekuumendi teise astmesse. Ülekuumendi teine aste on vertikaal ja radiatsioon tüüpi ning asub katla kolde ülemises osas. Peale teist astet läbib ülekuumendatud aur ka kolmanda astme ülekuumendi, mille järgselt on aur saavutanud oma ettenähtud nimiparameetrid.

Auruülekuumendite aurutemperatuuri reguleerimiseks kasutatakse aurujahuteid, milleks on pritsjahutid, mis pritsivad auru sisse demineraliseeritud jahutusvett. Aurujahuti ülesandeks on hoida auru temperatuuri ühtlaselt ettenähtud tasemel. Aurujahuteid on kokku kolm ja need asuvad auruülekuumendite astmete vahel. Esimene aurujahuti on esimese ülekuumendi teise ja kolmanda paketi vahel. Teine aurujahuti paikneb esimese ülekuumendi kolmanda paketi ja teise ülekuumendi vahel. Viimane jahuti asub teise astme ülekuumendi ja kolmanda astme ülekuumendi vahel [28].

4.2.8. Põlemisõhusüsteem

Põlemisõhusüsteemi peamiseks ülesandeks on varustada katla kollet vajaliku ning õige põlemisõhu kogusega, olenevalt kasutatava kütuse liigist ning koldesse antava kütuse kogusest. Primaarõhu lisamisega toimub liivakihi keevkihistamine. Kütuse etteandeõhuga jahutatakse kütuse ja liivarenne ning parandatakse tahkekütuse sisenemist koldesse. Põlemisõhusüsteemi üks tähtsamatest osadest on õhu niisuti ja õhueelsoojendi, millega kasutatakse ära lahkuvate suitsugaaside soojust selleks, et soojendada koldesse antavat primaar-, sekundaar- ja tertsiaalõhku [28].

Põlemiseks vajalik õhuhulk võetakse läbi õhukanalite osaliselt välisõhust ja osaliselt katlamaja seest. Katlamaja seest võetava õhuhulga kogus sõltub välistemperatuurist ning katla täiteastmest. Suvel võetakse kogu põlemisõhk katlamaja seest, kuid talvel võetakse umbes pool katlamajast seest ning pool välisõhust. Kogu põlemisõhk võetakse sama kanali kaudu, mis on müra vähendamiseks varustatud ka mürasummutiga. Kogu põlemisõhk puhutakse edasi kahe peaõhuventilaatoriga, mida juhitakse sagedusmuunduritega. Põlemisõhk jaotatakse alumisel korrusel kahe peaõhuventilaatoriga primaarõhuks, mis suunatakse keevkihi alla ja sekundaarõhuks, mida suunatakse koldesse. Sekundaarõhk on vajalik lendosade ja gaasi põlemisel. Väike kogus põlemisõhust juhitakse ka kütuse etteandeõhu ventilaatorisse. Kütuse etteandeõhu ventilaator puhub õhku kütuserennide jahutamiseks ja kütuse koldesse sisenemise parandamiseks. Lisaks on harud ka tahmapuhurite tihendusõhule ja liiva etteanderennide jahutusõhule [28].

Kui katlas kasutatav kütus on väga kuiv, siis on põhiosa põlemisõhust vaja enne koldesse andmist niisutada. Niisutusseadme ülesandeks suurendada suitsugaaside niiskust, millega

tõuseb suitsugaaside märgtemperatuur. Mida kõrgem on suitsugaaside temperatuur seda suuremal määral on võimalik suitsugaasides olevat soojust taaskasutada, kasutades suitsugaaside pesurit. Niisutist juhitakse õhk läbi piisaeraldi auruspiraaliga ülekuumendisse, kus õhk soojendatakse umbes 70 ºC selleks, et vältida suitsugaasi õhueelsoojendite ees olevates kanalites kondenseerumist ja ära hoida suitsugaasi eelsoojendites korrosiooni [28].

Pärast õhuniisutit ning auruspiraaliga ülekuumendit jagatakse õhk primaar- ja sekundaarõhusüsteemidesse. Õhurõhk on sekundaar- ja tertsiaaldüüsidesse suunamise jaoks piisav, kuid primaarõhu rõhku on vaja veel lisaventilaatoriga (primaarõhu ventilaatoriga) tõsta. Mõlemal süsteemil on oma kanalivõrk koos õhu vooluhulga mõõteseadmete ning õhuavade ja –düüsidega. Primaarõhku juhitakse liivakihi alla primaarõhu ventilaatoriga, mis paikneb maapinna tasandil. Peale ventilaatorit läbib primaarõhk suitsugaaside kaheastmelist õhueelsoojendit ja sealt suunatakse õhk juba koldesse kolde all olevast kollektorist vesijahutusega õhujaotuspoomide ja keevkiht-õhudüüside kaudu. Ülejäänud põlemisõhk (sekundaar- ja tertsiaalõhk) juhitakse suitsugaaside neljaastmelise õhueelsoojendi kaudu sekundaarõhudüüsidesse. Sekundaarõhuavad asuvad kolde esi- ja tagaseinal ning tertsiaalõhuavad kolde külgseintel [28].

4.2.9. Maagaasipõletid

Katlas kasutatavaks primaarkütuseks on hakkpuit ning freesturvas. Kuid vajalik on ka reservkütuse ehk sekundaarkütuse kasutamise võimalus, milleks on uuritava koostootmisjaama katla puhul maagaas. Maagaasiga varustatud põleteid on kokku kolm. Kaks 25 MW-se võimsusega põletit on koormuspõletid, mida kasutatakse tagavarasüsteemina juhul, kui primaarkütust mingil põhjusel ei peaks saama kasutada. Koormuspõleteid on kokku kaks ning nad asuvad samal kõrgusel, üks ühel pool seina ning teine teiselpool vastasseinas. Üks maagaasi koormuspõletitest on näha joonisel 4.6.

Kolmas põleti on stardipõleti, mis asub koormuspõletitest üks korrus all pool. Stardipõleti on väiksema võimsusega (22 MW) ning seda sisuliselt kasutatakse üks kord aastas, peale seda kui katelt suvel korralikult seestpoolt puhastatud on. Enne kui koldesse antakse põhikütus on vaja kolde käivitamisel liivakihti kuumutada stardipõletitega. Stardipõleti on suunatud liivakihi peale. Kvartsliiv kuumutatakse stardipõletiga umbes 600 °C-ni, mille järel

antakse keevkihti põhikütus, mis süttib ja kihi temperatuur hakkab tõusma. Kui kütus on korralikult põlema hakanud, saab gaasipõleti välja lülitada.

Joonis 4.6. Üks kahest 25 MW-sest maagaasi koormuspõletist

4.2.10. Suitsugaaside pesur

Uuritav koostootmisjaam on maksimaalse lisavõimsuse saamiseks ning keskkonna hoiu tagamiseks varustatud ka suitsugaaside pesuriga. Pesurit nimetatakse ka heitgaaside pesuriks ning kondensaatoriks. Suitsugaaside pesuriga on võimalik tõsta jaama soojusliku võimsust 15 MW võrra kondenseerides suitsugaasidest veeaur. Selleks on oluline, et kasutatava puit- ning turbakütuse niiskuseprotsent oleks kõrge. Mida kõrgem on kasutatava kütuse niiskuse sisaldus, seda suurem on saadav soojusvõimsus. Kui kasutatav kütus on madala niiskussisaldusega, siis kasutatakse eelpool kirjeldatud niisutit, et tõsta suitsugaaside niiskussisaldust, millega tõstetakse suitsugaaside märgtemperatuuri. Suitsugaaside temperatuur jahutatakse enne korstnasse juhtimist pesuris 150-200 ºC-lt kastepunkti temperatuurini, mis on kuskil 50-70 ºC. Kaugkütte soojusvõrgust tagastuva vee temperatuur, mida soojendatakse enne pesurit, on ligikaudu 45 ºC. Suitsugaaside jääksoojuse abiga tõstetakse kaugküttevõrgust tagasituleva vee temperatuuri ligikaudu 10 ºC võrra.

Tänu suitsugaaside pesuri kasutamisele on võimalik kütuse aurustussoojust kinni püüda ja tõsta katelseadme kogukasutegurit isegi üle 100%, mida arvutatakse kütuse alumise kütteväärtusele põhjal [30].

4.3. Auruturbiin ja generaator

Koostootmisjaamas on kasutusel 24,8 MW-se maksimaalse väljundvõimsusega sünkroongeneraator, mida käitab kombineeritud auruturbiin milleks on vaheltvõtu kondensatsioonturbiin Siemens SST-600 V, mis töötab olenevalt soojuskoormuse vajadusest, kas termofikatsiooni või vasturõhu režiimis. Auruturbiin pöörleb vastupäeva ja nimipöörlemiskiiruseks on 6774 p/min ning generaatori pöörlemiskiiruseks on 1500 p/min. Generaatori väljundpinge on 10 kV ning minimaalne väljundvõimsus on 3 MW [28].

Auruturbiin on varustatud kahe väljavõtuga turbiini lõpus ning nelja vaheltvõtuga, mida kasutatakse omatarbeks selleks, et käitada erinevaid protsesse. Vaheltvõttusid hakatakse lugema madalaima rõhuga ehk turbiini tagantpoolt otsast. Esimese turbiini vaheltvõtust suunatakse aur madalrõhu eelsoojendisse, kus aur kondenseerub ning selle tulemusena tekkinud energiaga soojendatakse toitevett. Teisest ja kolmandast vaheltvõtust juhitakse auru 3,1 baarise rõhu all sõlme, kust see suunatakse edasi kõrgsurve eelsoojendisse, mis soojendab toitevee eelsoojendisse minevat vett. Lisaks sellele 3,1 baarisest sõlmest eelsoojendatakse auruga põlemisõhku, mida antakse katlasse ja kasutatakse toitevee deaereerimiseks ehk gaaside eemaldamiseks veest. 3ndast vaheltvõtust on võimalik auru juhtida nii 8,5 baari, kui ka 3,1 baari sõlme. 8,5 baari sõlme kasutatakse samuti võrguvee deaereerimiseks ning kaugkütte veemahuti soojendamiseks. Neljandat vaheltvõttu normaalsetel töötingimustel üldjuhul ei kasutatagi, kuid sellega on võimalik varustada 8,5 baarist aurusõlme.

Vaheltvõttude maksimaalsed auru tootlikkused [28]:

4. vaheltvõtt (8,5 bar sõlme)	2,5 kg/s
3. vaheltvõtt (8,5 bar ja 3,1 bar sõlme)	1,53 kg/s
2. vaheltvõtt (3,1 bar sõlme)	1,66 kg/s
1. vaheltvõtt (madalrõhu eelsoojendi)	1,55 kg/s

Turbiini lõpust väljub madalaima rõhuga aur, kus aur kondenseeritakse kahe soojusvahetiga, mis on omavahel ühendatud jadamisi. Soojusvahetite abil kantakse saadud soojus edasi kaugküttevõrku ning turbiinist väljunud aur kondenseerub veeks, mis suunatakse toiteveemahutisse, kus toitevesi suunatakse jälle uuele ringile. Esimene soojusvaheti on 21,3 MW-se võimsusega ning teine kaugküttevõrguga ühendatud soojusvaheti on 28 MW-ne. Olemas on ka kolmas soojusvaheti, mida kasutatakse juhul, kui väljas on väga suured külmakraadid. Sellises olukorras elektrienergiat ei toodeta ning ülekuumendatud aur juhitakse soojusvahetisse enne turbiini. Kolmanda lisasoojusvaheti võimsus on 79,6 MW.

5. KOOSTOOTMISJAAMA ISELOOMULIKUMAD PARAMEETRID

Lõputööks valitud katseobjekti arvutuste läbiviimiseks kasutatakse ettevõttest saadud 2015. aasta elektri ning soojuse toodangu andmeid. Toodangu andmed olid edastatud tabeli kujul programmis Microsoft Excel.

5.1. Koostoomisseadme elektri- ja soojusenergia suhe

Praktikas kasutatakse koostootmisseadmete iseloomustamiseks toodetava elektrienergia ja soojuse vahelist suhet. Elektri ja soojuse tootmise seos on määratletud, kui jaama poolsel koostootmisel toodetud elektri- ja soojusenergia suhe. Koostootmisjaama elektrienergia ja soojusenergia suhe on leitav valemiga [11, 33]:

$$\sigma_{CHP} = \frac{P_{el,CHP}}{Q_{th,CHP}} = \frac{\eta_{el}}{\eta_{th}}, \tag{5.1}$$

kus σ_{CHP} on koostootmise elektrienergia ja soojusenergia suhe;

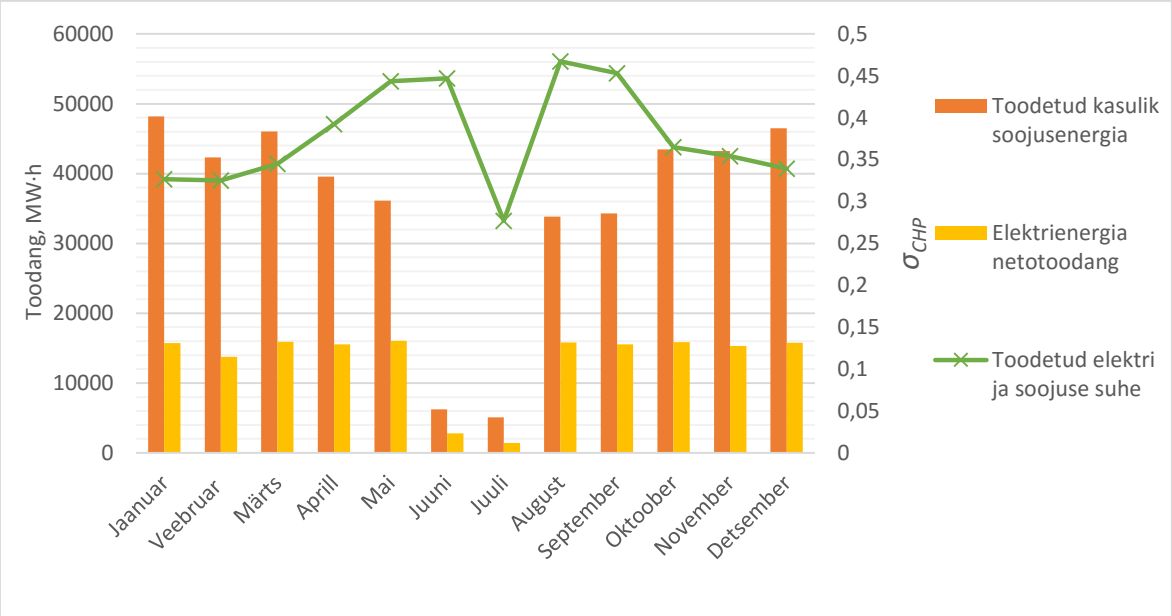
$P_{el,CHP}$ – elektrienergia W·h;

$Q_{th,CHP}$ – soojusenergia W·h;

η_{el} – elektriline kasutegur %;

η_{th} – soojuslik kasutegur %.

Joonisel 5.1. on välja toodud elektrienergia ja soojusenergia aastane tootmine kuude lõikes ning nende omavaheline suhe.



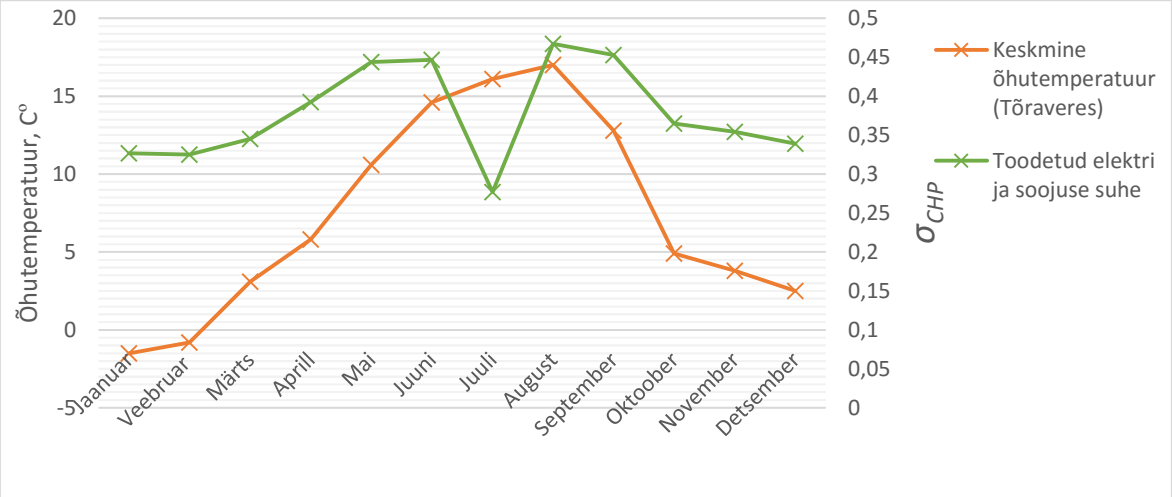
Joonis 5.1. Elektri- ja soojusenergia suhe aastal 2015 [36]

Jooniselt 5.1 on näha, et elektri- ja soojusenergia tootmise suhe aasta jooksul on muutuv. See on tingitud sellest, et kaugkütte võrku antava vee temperatuur mõjutab tugevasti elektrienergia toodangut läbi selle, mis temperatuuril vesi turbiini lõpus soojusvahetites kondenseerub. Auruturbiini elektri tootlikus sõltub sellest, kui suur on tarbijate soojuskoormuse vajadus. Mida suurem on soojuskoormuse vajadus, seda madalam on omakorda elektri ja soojuse suhe. Elektri- ja soojusenergia tootmise keskmiseks suhteks aastal 2015. kujunes 0,37.

Selleks, et saaks suurendada elektri osakaalu on kaks võimalust, kas vähendada auru entalpiat pärast auruturbiini (entalpia väheneb temperatuuri ja rõhu langedes) või suurendada entalpiat enne auruturbiini. Enne turbiini saab auru temperatuuri, seega auru etalpiat, muuta peamiselt kasutatava kütuse koguse ja energiasisalduse teel. Auru temperatuur peale turbiini on aga mõjutatav linna kaugküttevõrgu soojushulga vajadusest ning tagastuva vee temperatuurist, kuna kaugküttevõrgust tagastuv vesi jahutab auruturbiini läbivat auru. Sellest tingituna saaks elektri- ja soojusenergia suhet suurendada, kui kaugküttevõrgu vee temperatuur alaneb [34].

Kaugküttevõrku antava vee temperatuur on omakorda lineaarses sõltuvuses välistemperatuurist. Mida madalam on välisõhu temperatuur, seda kõrgem peab olema kaugküttevõrku antava vee temperatuur ning see tähendab, et toodetud elektri- ja

soojusenergia suhtarv on väiksem, mida on hästi näha ka jooniselt 5.2. Joonise jaoks vajalikud õhutemperatuuri meteoroloogilised seireandmed on kogutud Eesti Keskkonnaagentuuri kodulehelt.



Joonis 5.2. Elektri- ja soojusenergia suhte sõltuvus õhutemperatuurist aastal 2015 [36]

Joonistelt 5.1 ja 5.2 on lisaks näha, et juuli kuus toimus tootmises märgatav elektrienergia osakaalu vähenemine. See oli tingitud sellest, et CHP seisati, kuna toimusid suvised hooldustööd ja see mõjutas koostootmisjaama kuu keskmist katla võimsust. See tähendas, et auru entalpia enne auruturbiini langes ja generaatori võimsuse kasutegur, mis peaks 100 % ringis aastaringselt olema, langes kuu lõikes alla 90 % ja see tõi kaasa koostootmises elektrienergia osakaalu märgatava languse. Elektrigeneraator töötas juuli kuus kõigest 74 tundi ehk 3 päeva.

5.2. Koostootmisjaama toodang ning kasutegurid

Eelnevalt on olnud juba juttu sellest, et primaarenergia kasutamisel koostootmisjaamas tõuseb soojuse ja elektri tootmise kogukasutegur ehk toimub efektiivsemalt primaarenergia kasutamine. Koostootmisjaama kasutegurite arvutamine toimub kütuse alumise küttevääртuse alusel. Kogukasutegur on koostootmisjaamas kogu kasutatud kütusest saadud

energia ja toodetud elektrienergia ning kasuliku soojusenergia suhe. Elektrienergiat ja soojus tootva jaama kogukasutegur on leitav valemiga [11]:

$$\eta_{kogu} = \frac{P_{el,CHP}}{Q_{kütus}} + \frac{Q_{th,CHP}}{Q_{kütus}} = \eta_{el} + \eta_{th} \quad (5.2)$$

kus η_{kogu} on koostootmisjaama kogukasutegur %;

$Q_{kütus}$ – kütuse põlemisel saadud energia W·h.

Hakkpuidu, turba ja maagaasi põletamisel eralduvat soojushulka (primaarenergiat) on võimalik mõõta ülemise- ja alumise kütteväärtusega. Alumine kütteväärtus sõltub kütuses sisalduvast tuhasisaldusest ning niiskusest. Mida kõrgem on kütuse tuhasus ja niiskus, seda madalam on kütusest saadav soojushulk alumise kütteväärtuse järgi. Alumise kütteväärtuse puhul ei arvestata suitsugaasidega lahkuva veeauru energiasisaldust ehk soojushulka, mis eraldub veeauru kondenseerumisel. Kui aga kütuse põlemisel eralduv veeaur kondenseerida suitsugaaside pesuriga, kus vabaneb kondensatsioonisoojus, siis tuleks arvestada juba kütuse ülemist kütteväärtust, kus arvestatakse auru veeldumise energiat.

Uuritava koostoomisjaama kogukasuteguri leidmisel, kui arvestada juurde ka suitsugaaside pesuriga kondenseerumisel saadav energia, on võimalik koostootmisjaama kasutegur saada üle 100 %. See aga ei ole energia jäävuse seaduse järgi õige ja tähendab, et tegelikult oleks õige kasutada kütuse ülemist kütteväärtust, kus arvestatakse ka veeauru kondenseerumisel saadavat energiat.

Selleks, et leida millised on koostootmisjaama elektriline-, soojuslik- ning kogukasutegur tuleb selgitada, millised on koostootmisjaama netotoodangud ehk kasuliku energia toodangud. Soojuse netotoodangu leidmisel on maha arvestatud bruto soojustoodangult soojus, mida on kasutatud jaama erinevate protsesside käitamiseks nagu näiteks põlemisõhu või toitevee eelsoojendamiseks ning toitevee deaereerimiseks jne. Elektrienergia netotoodangu leidmiseks tuleb brutotoodangult, mida mõõdetakse generaatori väljundklemmidelt, maha arvestada jaama elektrienergia omatarve, mis jääb uuritava jaama

puhul ligikaudu 12 % ringi. Elektritoodangu netotoodang on võrku antud ja otseliinide kaudu tarbijatele edastatud saldeeritud toodang [35].

Koostootmisjaamas katlasse antud kütuse koguses sisalduva primaarenergia leidmiseks tuleb kokku liita katlas kasutatud kõikide kütuste energia kogused, mis jagunesid 2015. aastal 84,24 % hakkpuidule, 15,31 % turbale ning 0,45 % maagaasile. Soojuse tootmiseks kasutati 52,78 % kütusest saadavast energiast ning 47,22 % energiast läks elektri tootmiseks [36].

Tabelis 5.1 on välja toodud uuritava koostootmisjaama 2015. aasta neto soojustoodangud koos ja ilma suitsugaaside pesuris kondenseeritud soojuseta ning leitud on suitsugaaside pesuri osakaal kogu soojustoodangul. Välja on toodud ka neto elektritoodangud. Lisaks ka katlasse antud kütusekoguses sisaldunud primaarenergia kuude kaupa.

Tabel 5.1. Jaama 2015. aasta soojus- ning elektritoodangud ja kasutatud primaarenergia [36]

Kuu (2015 a.)	**Soojustoodang (neto) MW·h**		**S.gaaside pesuri osakaal %**	**Elektritoodang (neto) MW·h**	**Kasutatud primaarenergia MW·h**
	Ilma pesurita	**Koos pesuriga**			
Jaanuar	36237,0	48183,0	24,79	15748,4	64374,9
Veebruar	31898,5	42300,5	24,59	13746,6	55388,5
Märts	36394,6	46053,6	20,97	15898,5	61690,4
Aprill	34873,6	39577,6	11,89	15535,6	59256,0
Mai	36032,3	36125,3	0,26	16029,0	61773,5
Juuni	6208,0	6215,0	0,11	2777,3	10163,0
Juuli	5104,7	5112,7	0,16	1415,6	8104,4
August	33831,1	33834,1	0,01	15812,2	60064,3
September	34252,5	34287,5	0,10	15534,6	58808,2
Oktoober	35493,3	43487,3	18,38	15873,9	61003,8
November	33343,9	43223,9	22,86	15304,2	58245,1
Detsember	35459,5	46485,5	23,72	15765,7	61669,4

Aasta 2015 kuu keskmine kasuliku soojuse toodang, koos pesuriga oli 35407 MW·h, mida mõjutas tugevasti juunis ja juulis toimunud hooldusseisakud. Kuu keskmine elektrienergia netotoodang kujunes koostootmisel 13286,8 MW·h.

Tabelist on ka selgesti näha, et külmematel kuudel, kui linna soojuskoormus on kõrgem, saab suitsugaaside pesuriga jaama soojuslikku võimsust kuni 25 % võrra tõsta. Jooniselt 5.2 on näha, et 2015. aasta kõige külmem kuu oli jaanuari kuu ning samal kuul on ka

suitsugaaside pesuri soojustoodangu osakaal kogu soojustoodangust kõige suurem. Seda saab seletada sellega, et suitsugaaside toodang on otseselt sõltuv välistemperatuurist ehk kaugkütte tagasivoolu vee temperatuurist. Suvekuudel langeb suitsugaaside pesuri osakaal ligikaudu 0 % juurde. Aasta keskmine osakaal oli 2015. aastal 15,5 %.

Aastas kokku toodeti aga 425 GW·h jagu kasulikku soojusenergiat, mis on koostootmisjaama planeeritud soojuse toodangust (304 GW·h) 121 GW·h jagu rohkem. Aastane elektrienergia kogu netotoodang oli 159,5 GW·h, mis on aastasest planeeritud elektritoodangust (158 GW·h) pisut rohkem.

Tabelis 5.2 on välja toodud uuritava koostootmisjaama 2015. aasta soojuslikud, elektrilised ning kogukasutegurid, mis on välja arvutatud valemi 5.2 järgi.

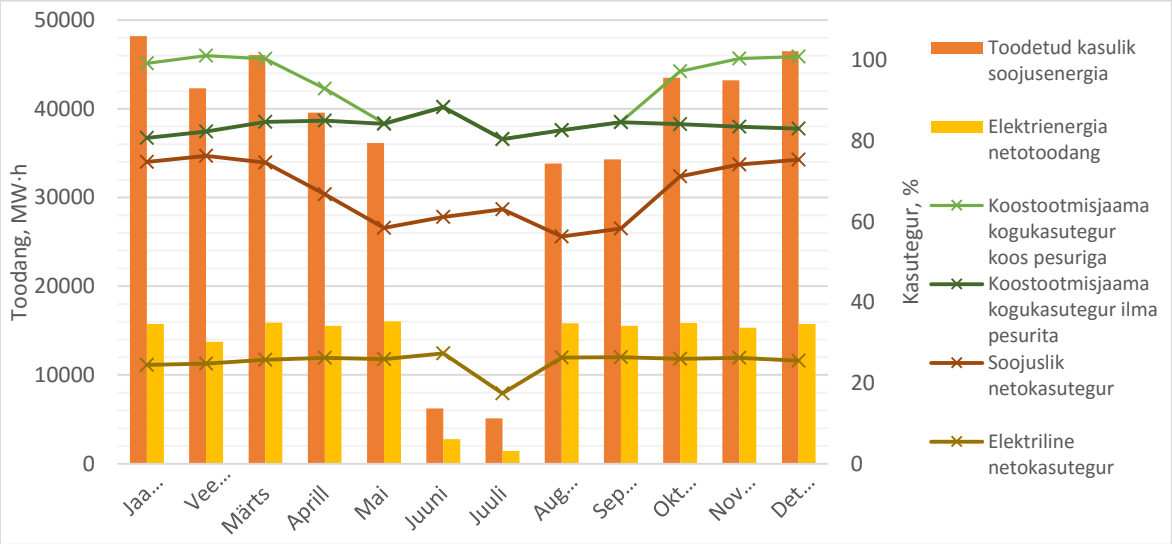
Tabel 5.2. Koostootmisjaama 2015. aasta kasutegurid

Kuu (2015 a.)	Soojuslik kasutegur %		Elektriline (neto)kasutegur %	Kogukasutegur (ilma pesurita) %	Kogukasutegur (koos pesuriga) %
	Ilma pesurita	Koos pesuriga			
Jaanuar	56,29	74,85	24,46	80,75	99,31
Veebruar	57,59	76,37	24,82	82,41	101,19
Märts	59,00	74,65	25,77	84,77	100,42
Aprill	58,85	66,79	26,22	85,07	93,01
Mai	58,33	58,48	25,95	84,28	84,43
Juuni	61,08	61,15	27,33	88,41	88,48
Juuli	62,99	63,09	17,47	80,45	80,55
August	56,32	56,33	26,33	82,65	82,66
September	58,24	58,30	26,42	84,66	84,72
Oktoober	58,18	71,29	26,02	84,20	97,31
November	57,25	74,21	26,28	83,52	100,49
Detsember	57,50	75,38	25,56	83,06	100,94

Tabeli 5.2 kõik kasutegurid on välja arvutatud kütuse alumise kütteväärtuse järgi, mille tõttu on näha, et kogukasutegur veeauru kondenseerimisega suitsugaaside pesuriga tõuseb osadel kuudel ka üle 100 %. Antud olukorras oleks korrektne kasutada kasuteguri välja arvutamisel ülemist kütteväärtust, kuid selline alumise kütteväärtusega arvutamise metoodika on praktikas kasutamisel laialt levinud ja juurdunud tava. Tegemist pole mitte energia jäävuse

seaduse rikkumisega, vaid kokkuleppe ja traditsiooniga, mis võimaldab katlatüüpide ja koostootmisjaamade efektiivsusi omavahel võrrelda [29].

Joonisel 5.3. on välja toodud graafiliselt koostootmise 2015. aasta kasutegurid ning elektri ja kasuliku soojuse toodangud. Soojustoodangud on välja toodud koos suitsugaaside pesuri toodanguga.



Joonis 5.3. Koostootmisjaamas toodetud energia ja kasutegurid aastal 2015

Jooniselt 5.3 on näha, kuidas koostootmisjaam on aastaringselt suhteliselt ühtlasel koormusel saanud töötada. Ainult kahel kuul aastas, suvekuudel juunis ja juulis on toimunud koostootmisel seisakud. Üldiselt on katel töötanud 2015. aastal 98,75 %-lise nimikoormuse juures ning generaator on töötanud 98,96 %-lise nimikoormatuse juures ehk sisuliselt on CHP saanud toimida täiskoormusel kogu aasta vältel, välja arvatud kahel suvekuul. Generaator on saanud töötada 2015. aastal 7505 tundi, mis on samuti väga hea näitaja. Nende näitajate järgi saab öelda, et seade töötab optimaalselt nii nagu see on ettenähtud ja projekteeritud, milleks on Tartu linna soojusvõrgu aastaringne baaskoormuse katmine.

Jooniselt 5.3 ja tabelist 5.2 on näha ka, et soojuslik kasutegur ilma pesurita püsib aasta vältel suhteliselt ühtlaselt 58,5 % ringis. Kuid kui arvestada juurde ka suitsugaaside pesuriga toodetud soojuse hulk, siis on selgelt näha, et suvine linna soojuse vajadus pole piisavalt kõrge ning pesur suve kuudel rakendamist ei leia. Mai kuust septembrini on suitsugaaside pesuri soojustoodangu osakaal kogu soojustoodangus väga väike. Langedes augustikuus 0,1 %-ni. Selle tulemusena veeauru kondensatsioonienergia jääb kasutamata ning üldine

koostootmise energeetiline efektiivsus ehk kasutegur langeb. 2015. aasta keskmine kasuliku soojuse kasutegur koos suitsugaaside pesuriga on uuritaval koostootmisjaamal 67,57 %. Elektriline netokasutegur kujunes 2015. aastal 25,22 %. Mis teeb koostootmisjaama aasta keskmiseks kogukasuteguriks koos suitsugaaside pesuriga 92,79 % ning ilma -pesurita 83,69 %.

5.3. Primaarenergia sääst

Hea ülevaate koostootmise energiasäästlikkuse hindamiseks annab primaarenergia säästu (PES) välja arvutamine. Primaarenergia sääst näitab, kui palju hoitakse primaarenergiat kokku elektrit ning soojust koostootes võrreldes sama kogust elektrienergiat ja soojust eraldi tootes. Primaarenergia termin on Vabariigi Valitsuse määruse järgi defineeritud kui „ühe kilovatt-tunni tarnitud energia tootmiseks vajalik esmane energiahulk taastuvatest ja mittetaastuvatest energiaallikatest, mis sisaldab kõiki energiaallika ammutamise, energia tootmise, ülekande ja jaotamise kadusid“ [37]. Koostootmisel tekkiva primaarenergia säästu on võimalik arvutada järgmise valemiga [38]:

$$PES = \left[1 - \frac{1}{\frac{CHPH\eta}{REFH\eta} + \frac{CHPE\eta}{REFE\eta}}\right] \cdot 100 \qquad (5.3)$$

kus *PES* on primaarenergia sääst %;

CHPHη – kasuliku soojuse kasutegur %;

REFHη – soojuse eraldi tootmise viiteväärtus, puitkütus/turvas = 86% [36];

CHPEη – koostoodetud elektrienergia kasutegur %;

REFEη – elektrienergia eraldi tootmise viiteväärtus, puitkütus= 34% [36].

Valemis olev koostootmise kasuliku soojuse kasutegur ja koostoodetud elektrienergia kasutegur on arvutatud viimase 12 kuu soojuse või elektri toodangu jagamisel kütuseenergiaga, mida kasutati kasuliku soojuse ja elektri koostootmiseks aastal 2015. Soojusliku kasuteguri arvutamisel kasutatakse alumist küttevääртust. Elektrienergia kasuteguri arvutamisel võetakse kasuliku soojuse tootmisprotsessis toodetud elektrienergia, mis on mõõdetud generaatori väljundklemmidel ehk brutokasutegur, kus ei arvestata elektrienergia tootmise omatarvet [36].

Soojuse eraldi tootmise viiteväärtuse puhul tuleb arvestada ka aastase keskmise välisõhu temperatuuriga. Tõhusa koostootmise nõuete määruses on soojuse viiteväärtused arvestatud välisõhu aasta keskmisele temperatuurile +15 °C. Kui aasta keskmine välisõhu temperatuur erineb viiteväärtusest, siis tuleb seda väärtust arvutamisel korrigeerida. Viiteväärtusi korrigeeritakse Riigi Ilmateenistuse veebilehel avaldatud keskmise õhutemperatuuri järgi. 2015. aastal oli õhu keskmine temperatuur 7,6 ºC, seega väärtust peab korrigeerima 0,1 protsendipunkti võrra tõhususe suurenemise suunas iga kraadi kohta, mis on madalam kui +15 °C [38]. Seega soojuse eraldi tootmise viiteväärtuseks puidu ja turba kasutamisel võib võtta REFHη = 85,3 %.

Seega uuritava koostootmisjaama 2015. aasta primaarenergia sääst valemi 5.3 järgi arvutades on:

$$\mathrm{PES} = \left[1 - \frac{1}{\frac{67{,}57}{85{,}3} + \frac{28{,}59}{34}}\right] \cdot 100 = 35{,}27\ \%$$

Koostootmist loetakse seaduse mõistes tõhusaks juhul, kui aruandlusperioodi jooksul on vasturõhuauruturbiini üldkasutegur vähemalt 75 % ning valemiga 5.3 arvutatud primaarenergia sääst vähemalt 10 % [38].

Seega valemi 5.3 ning eelnevalt vaadeldud üldkasuteguri põhjal võib öelda, et AS Fortum Tartu koostootmist saab lugeda tõhusaks. Kuna 2015. aasta primaarenergia sääst oli 35,27 % ning alumise küttevääртuse järgi arvutatud aastane üldkasutegur 92,8 %.

Eelnevalt on leitud ka koostootmisel toodetud kasulik soojus- ning elektrienergia. Selle põhjal saab leida, palju primaarenergiat uuritavas jaamas kokku hoiti. Kokku toodeti 2015. aastal 584327,78 MW·h kasulikku energiat. Seega saavutatud primaarenergia sääst oli 481121,15 MW·h ehk arvutuslikult 481 GW·h energiat jäeti tarbimata.

6. KOKKUVÕTE

Käesolev magistritöö koosneb- kolmest suuremast osast. Töö esimeses osas käsitletakse elektri ja soojuse koostootmise eeliseid ning puuduseid üldisemalt. Samuti antakse põhjalikum ülevaade CHP laialt levinumatest tehnoloogiatest. Lisaks käsitletakse energia koostootmise rolli Eestis ja Euroopas ning millise tehnilis-majandusliku analüüsi peaks läbi tegema enne, kui koostootmist ettevõttesse rajada. Töö teises osas antakse põhjalikum ülevaade magistritöös uuritava ja analüüsitava koostootmisjaama kohta. Kirjeldatakse millised on uuritava ettevõtte CHP peamised tehnoloogilised süsteemid ja milliseid ülesandeid need täidavad. Kolmandas osas viiakse läbi uuritava koostootmisjaama kohta iseloomulikumate ja tähtsamate parameetrite arvutused.

CHP on juba pikalt tuntud ja kasutamist leidnud tehnoloogia, kuid Eestis on siiani koostootmisprotsessis toodetud elektri osatähtsus elektrienergia kogutoodangus väga madal, jäädes Euroopa Liidu keskmisest alla. Koostootmise osakaal Eestis võiks olla palju suurem, kuna sellel on palju eeliseid ning seda võib pidada termodünaamiliselt parimaks viisiks, kuidas suurendada kütuse kasutamise efektiivsust ning tõsta energia tootmise efektiivsust. Eestis on olemas energia efektiivsemaks ja säästlikumaks kasutamiseks olemas suur kasutamata potentsiaal, mida saaks realiseerida koostootmisjaamade laialdasemal kasutusele võtmisel ettevõtetes. Koostootmise rakendamisel ettevõttesse tuleb eelnevalt aga teha läbi põhjalik tehnilis-majandulik analüüs.

CHP on kõrge kogukasuteguriga, kütuse kasutamise kogukasutegur on tavaliselt 85−92 %. Koostootmisjaamad võib jagada toodetud energia genereerimiseviisi järgi viieks: vaheltvõtu kondensatsioonturbiiniga, vasturõhuauruturbiiniga, gaasiturbiiniga, kolbmootoriga ja kütuseelemendiga seadmeteks. Energia kasutamise efektiivsus on Eestis üldiselt väga madalal tasemel, Eesti energiakasutamise efektiivsus on 50 % ringis, kõikudes 45-55 % vahel olenevalt aastast. Koostootmisprotsessis toodetud elektri osatähtsus elektrienergia kogutoodangus on Eestis 2013. aasta seisuga 9,3 %, Euroopa Liidu keskmine on 11,7 %. Viimaste kättesaadavate andmete järgi oli Eestis 2014. aastal kokku 46 erineva genereerimise liigiga koostootmise turbiini, kogu väljundvõimsusega 1432 MW. Põhiliselt kasutatakse Eesti koostootmisjaamades kütusena puiduhaket, puiduhake moodustas 2014 aastal 43 % kogu kasutatud primaarenergiast. Puiduhakkele järgnevad põlevkivi, põlevkivigaas, biogaas ja must leelis, jäätmekütus, freesturvast ning maagaas.

Töö teise osa koostamiseks oli vajalik käia uuritavas koostootmisjaamas korduvalt kohapeal tehnoloogiaga tutvumas, et koguda vajalikku informatsiooni selleks, et mõista, kuidas toimivad keerukad koostootmise tehnoloogilised süsteemid. Uuritava koostootmisjaama põhieesmärgiks on Tartu linna soojusvõrgu aastaringne baassoojuskoormuse katmine. Koostootmisjaama soojuslik võimsus on 50 MW. Lisaks on suitsugaaside pesuriga võimalik tõsta jaama soojuslikku võimsust, mis annab kevad-, sügis- ja talveperioodil veel lisa soojuslikku võimsust 15,8 MW. Talvise tipukoormuse ajal on võimalik jaam tööle panna ka täielikult soojuse tootmisele. Sellisel juhul elektrit ei toodeta ning soojuslik võimsus on siis 80 MW. Soojuse tootmisega kaasnevaks tegevuseks on elektri tootmine. Elektrigeneraatori maksimaalne võimsus on 24,8 MW ning väljastatav pinge on 10 kV. Sünkroongeneraatorit käitab kombineeritud auruturbiin, milleks on vaheltvõtuga kondesatsioonturbiin Siemens'lt, mis töötab olenevalt soojuskoormuse vajadusest, kas termofikatsiooni või vasturõhu režiimis. Auruturbiin on varustatud kahe väljavõtuga turbiini lõpus ning nelja vaheltvõtuga, mida kasutatakse omatarbeks selleks, et käitada erinevaid protsesse. Auruturbiini jaoks vajalike nimiparameetritega (525°C, 115 bar, 28,5 kg/s) auru toodab keevkiht aurukatel. Katla põhikütusteks on freesturvas (15 %) ning puiduhake (85 %) ning katel töötab 88,4 % kasuteguriga.

Töö viimases osas viidi läbi uuritava koostootmisjaama tähtsamate termodünaamiliste parameetrite kohta arvutusi ja analüüsi. Arvutused viidi läbi ettevõtte poolt saadud 2015. aasta toodangu andmete põhjal. Koostootmise seadme elektri- ja soojusenergia keskmine suhe aastal 2015 oli 0,37. Kuna elektrienergia on kõrgeima kvaliteediga energialiik, siis on soovitav selle suhte võimalikult kõrge väärtus. Koostootmise elektri- ja soojusenergia suhe on aasta lõikes muutuv suurus, väärtus sõltub välisõhu temperatuurist ehk soojuskoormuse ajalisest muutumisest. Talvel on väärtus väiksem (~0,33) ning suvekuudel kõrgem (~0,45). Jaama kasuliku soojuse toodang oli uuritaval aastal 425 GW·h, mis on koostootmisjaama planeeritud soojuse toodangust (304 GW·h) 121 GW·h jagu rohkem. Suitsugaaside pesuriga oli võimalik tõsta jaama soojuslik toodangut 15,5 % võrra, ilma pesurita oleks olnud toodang 359 GW·h. Aastane elektrienergia kogu netotoodang oli 159,5 GW·h, mis on aastasest planeeritud elektritoodangust (158 GW·h) pisut rohkem. Üldiselt on katel töötanud 2015. aastal 98,75 %-lise nimikoormuse juures ning generaator on töötanud 98,96 %-lise nimikoormatuse juures. Koostootmisjaama keskmine kasuliku soojuse kasutegur koos suitsugaaside pesuriga oli uuritaval koostootmisjaamal 67,57 %. Soojuslik kasutegur ilma suitsugaaside pesurita püsib aasta vältel suhteliselt ühtlaselt 58,5 % ringis. Elektriline

netokasutegur kujunes 2015. aastal 25,22 %. Mis teeb koostootmisjaama aasta keskmiseks kogukasuteguriks koos suitsugaaside pesuriga 92,79 %, mis arvutati kütuse alumise kütteväärtuse järgi. Hea ülevaate koostootmise energiasäästlikkuse hindamiseks annab primaarenergia säästu (PES) välja arvutamine. PES näitab, kui palju hoitakse primaarenergiat kokku elektrit ning soojust koostootes võrreldes sama kogust elektrienergiat ja soojust eraldi tootes. Uuritava koostootmisjaama 2015. aasta primaarenergia sääst oli 35,27 % ehk arvutuslikult 481 GW·h kütuse primaarenergiat säästeti. Seega AS Fortum Tartu koostootmist saab lugeda tõhusaks, kuna primaarenergia sääst on üle 10 % ning üldkasutegur samuti üle 75 %.

KIRJANDUS

1. Carrington D. World population to hit 11bn in 2100 – with 70% chance of continuous rise. *The Guardian,* 18.09.2014. Kättesaadav: http://www.theguardian.com/environment/2014/sep/18/world-population-new-study-11bn-2100 (11.05.2016)

2. Paist, A. Soojuse ja elektri koostootmise tehnoloogiatest. *Eesti põlevloodusvarad ja –jäätmed, 2013, ISSN 1736-0315,* lk. 6–9.

3. n2 Integrated Energy Solutions. Combined heat & power solution for a commercial/intustrial facility. 2014. Kättesaadav: http://www.n2ies.com/combined-heat-power-solution-industrial.html (18.02.2016).

4. Siirde, A., Ingermann, K. Soojuse ja elektri koostootmise alused. Koostootmise majanduslik ja keskkonnakaitseline põhjendatus. Tallinna Tehnikaülikool. Kättesaadav: http://www.staff.ttu.ee/~asiirde/Loengud/EAS/TTU_slaidimall%20PaideII-I-paar.ppt (18.02.2016).

5. Risthein E. Sissejuhatus energiatehnikasse. – Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli elektriajamite ja jõuelektroonika instituut. Kirjastus Elektriajam, 2007. – 260 lk.

6. AS Tamult. Renergy suitsugaaside kondensaator pesurid. 2010. Kättesaadav: http://www.tamult.ee/article/ee/231/1186 (15.03.2016).

7. Condens Heat Recovery Oy. Suitsugaaside puhastamiseks ja soojuse taaskasutamine. 2014. Kättesaadav: http://www.condens.fi/ee/LTO_ee.htm (15.03.2016).

8. Amiri, S. Linköping University Institute of Technology. Economic and Environmental Benefits of CHP-based District Heating Systems in Sweden. 2013. *Division of Energy Systems Department of Management and Engineering.* Kättesaadav: http://liu.diva-portal.org/smash/get/diva2:622636/FULLTEXT01.pdf (15.03.2016).

9. Siirde, A. Koostootmisseadmed. Erinevate koostootmisseadmete valik ja nende efektiivsus. Tallinna Tehnikaülikool, Soojustehnika instituut. Kättesaadav: http://www.staff.ttu.ee/~asiirde/Loengud/Tlnsoojus/LOENGU%20ise.doc (12.03.2016).

10. The Arkansas Industrial Energy. CHP Types. Kättesaadav: http://www.arkansasiec.org/industrial-systems/combined-heat-and-power/chp-types/ (13.03.2016).

11. Kruus, R., Vares, V. Perspektiivsetest elektri ja soojuse koostootmise tehnoloogiatest Eestis. – Tallinn: Grafica Malen, 2002. – 35 lk.

12. Petchers, N. Combined Heating, Cooling & Power Handbook: Technologies & Applications. An Integrated Approach To Energy Resource Optimization. – Ameerika Ühendriigid, New York: The Fairmont Press, Inc., 2003. – 875 lk.

13. Bini, R., Manciana, E. Organic Rankine cycle turbogenerators for combined heat and power production from biomass. 1996. Kättesaadav: http://www.turboden.eu/en/public/downloads/ORC_for_biomass_cogeneration.pdf (01.03.2016).

14. Phillips, J. CHP and Other Technologies Could Breathe New Life into U.S. Coal-Fired Power Plants. 02.01.2016. *Power*. Kättesaadav: http://www.powermag.com/chp-technologies-breathe-new-life-u-s-coal-fired-power-plants/?pagenum=3 (25.02.2016).

15. Maurstad, O. An Overview of Coal based Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) Technology. 09.2005. Massachusetts Institute of Technology. Kättesaadav: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=5D97FEE3529F3D6165D0AAA72F07255E?doi=10.1.1.208.5891&rep=rep1&type=pdf (03.03.2016).

16. Thombare, D. G. Stirling Engine: Micro-CHP System for Residential Application. 01.2008. Kättesaadav: https://www.researchgate.net/publication/230807417_Stirling_Engine_Micro-CHP_System (02.03.2016).

17. Eesti statistikaamet. Koostootmisjaamade võimsus, toodang ja kasutatud kütus. 15.09.2015. Kättesaadav: http://pub.stat.ee/px-web.2001/Database/Majandus/02Energeetika/02Energia_tarbimine_ja_tootmine/01Aastatistika/01Aastastatistika.asp (19.02.2016).

18. Truuts, H., Raudjärv, R. Koostootmine kui energiasäästuvõimalus. 04.2009. Statistikaamet. Kättesaadav: https://www.stat.ee/dokumendid/51776. (08.03.2016).

19. Euroopa Komisjoni statistikaamet Eurostat. Combined Heat and Power (CHP) data. 2015. Kättesaadav: http://ec.europa.eu/eurostat/documents/38154/4956229/CHP+data+2005-2013/62e87958-0b9a-4195-af70-356493e12233 (19.02.2016).

20. Euroopa Komisjoni statistikaamet Eurostat. Combined heat and power generation. 2013. http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/mapToolClosed.do?tab=map&init=1&plugin=1&language=en&pcode=tsdcc350&toolbox=types (19.02.2016).

21. Eesti Energia. Koostootmisjaamad, Balti elektrijaam. 2016. Kättesaadav: https://www.energia.ee/et/koostootmine (22.02.2016).

22. Siirde, A., Tammoja, H. Tallinna Tehnikaülikool, Soojustehnika instituut. Tõhusa koostootmise viiteväärtused ja tõhusa koostootmise potentsiaal Eestis. 2005. Kättesaadav: https://www.mkm.ee/sites/default/files/tohusa_koostootmise_viitevaartused_ja_tohusa_koostootmise_potentsiaal_eestis_ttu.pdf (24.03.2016).

23. LEAP. Dispatching Processes On A Load Curve. Kättesaadav: http://energycommunity.org/WebHelpPro/Transformation/Dispatching_Processes_on_a_Load_Curve.htm (28.03.2016).

24. Eesti Arengufond. Kaugkütte energiasäästu uuring. 2013. Kättesaadav: http://www.energiatalgud.ee/img_auth.php/4/46/Eesti_Arengufond._Kaugk%C3%BCtte_energias%C3%A4%C3%A4st.pdf (29.03.2016).

25. Fortum Tartu AS. Firma üldinformatsioon. Kättesaadav: https://www.fortumtartu.ee/ (01.04.2016).

26. Fortum Tartu AS. Soojuse ja elektri koostootmisjaam. Tartu Elektrijaama infovoldik.

27. Kinni J. Metso Power. Energy. Future. Responsibility.Challenges and Tools for regional planning. 2007. Kättesaadav: http://documents.mx/documents/biomass-in-chp-escobalt-2007-06-14.html (22.04.2016).

28. Metso Power. Elektrienergia tootmise süsteemid. Tehniline dokumentatsioon. 2008. – 109 lk.

29. Vares, V., Kask Ü., Muiste P., Pihu T., Soosaar S. Tallinna Tehnikaülikool. Biokütuste kasutaja käsiraamat. 2005. – 172 lk.

30. Mets Ü. SusDev Consulting OÜ. Eksperthinnang soojuse tootmiseks vajaliku katlamaja soetusmaksumuse, soojuse tootmise ehk katlamaja kasuteguri ja katlamaja tehnilise eluea kohta. Kättesaadav: http://www.konkurentsiamet.ee/file.php?27478 (12.04.2016).

31. Veski A. Katelseadmed. – Tallinn: Valgus, 1991. – 192 lk.

32. Paist A. Katlatehnika. 2015. Tallinna Tehnikaülikool. Mehaanikateaduskond. Kättesaadav: http://www.ttu.ee/public/m/Mehaanikateaduskond/Instituudid/soojustehnika-instituut/Katlatehnika.pdf (16.04.2016).

33. Pohl E., Diarra D. A method to determine primary energy savings of CHP plants considering plant-side and demand-side characteristics. *Applied Energy, nr 113.* – Herzogenrath, Germany, 2014, lk. 287–293.

34. Saarinen L. Modelling and control of a district heating system. 03.2008. Uppsala Universitet. Kättesaadav: http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:461661/FULLTEXT01.pdf (25.04.2016).

35. Riigi Teataja. Biomassist elektrienergia koostootmise juhis. 08.2010. Kättesaadav: https://www.riigiteataja.ee/akt/13347500 (28.04.2016).

36. Fortum Tartu koostootmisjaama 2015. aasta toodangu andmed. Microsoft Excel tabel.

37. Energiatõhususe miinimumnõuded. Riigi Teataja, RT I, 05.09.2012. Kättesaadav: https://www.riigiteataja.ee/akt/105092012004 (19.05.2016).

38. Tõhusa koostootmise nõuded. Riigi Teataja, RTL 2007, 41, 696. Kättesaadav: https://www.riigiteataja.ee/akt/12825847 (02.05.2016).

CHP Application in Industry

Summary

This master thesis consists of three major parts. The first part of the thesis covers general advantages and disadvantages of power and heat cogeneration. Additionally the work presents comprehensive overview of widespread technologies of combined heat and power cogeneration (CHP). The intension of thesis paper is also to show cogeneration importance in the power production in Estonia and in Europe. In addition the thesis introduces what kind of technical-economic analysis should be carried out before applying cogeneration plant into a factory.

In the second section a CHP plant which is connected to district heating (DH) system is investigated. All the CHP plants main technologies are represented with description of tasks they perform.

The aim of the third part is to identify the key parameters and main characteristics of the researched cogeneration plant.

The aim of this thesis is to provide a comprehensive overview over various CHP technologies and the necessity and the usage advantages in companies for energy supply. The study is based on analysing scientific literature that is associated with CHP technologies. Additionally there was surveyed and the information data was collected in order to carry out the analysis in the analysed cogeneration plant.

Cogeneration (CHP) is considered to be as an important key technology towards efficient energy supply. In this paper, a CHP system study is proposed to promote wider use of CHP to approach higher primary energy using efficiency in energy production. It is a long known technology, but still the share of electricity produced from cogeneration is very low in Estonia (9,3 % in 2013) but it could be much higher. European Unions average combined heat and power share of gross electricity generation in 2013 was 11,7 %. CHP has many advantages and it can be considered thermodynamically the best way to increase the efficiency of the fuel consumption in energy production and that's why the share of gross electricity generation must be increased by cogeneration.

In this thesis a biomass CHP plant that is connected with Tartu city DH-system was studied. It was found out that the plants efficiency in 2015 was 92,79 %. The plant has a higher

efficiency because the waste heat in flue gas is also recovered for DH. The heat efficiency was with flue gas heat recovery 67,57 %. The net electrical efficiency was 25,22%. CHP plant has the highest possible efficiency when it is operated at full power under the designed optimal power to heat ratio. The overall power to heat ratio was on the studied year 0,37. CHP primary energy savings (PES) was 35,27 %, these results show that due to cogeneration there was saved 481 GW·h of primary energy in 2015 . These results show that cogeneration is a thermodynamically very efficient way to use fuel and should be preferred to separate heat and power production systems. CHP systems can achieve efficiencies up to 85−92 %.

LISAD

Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, MIHKEL MERIMAA, sünniaeg 26.05.1989,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö „Elektri ja soojuse koostootmisjaam ettevõtte energiavarustuses“, mille juhendaja on Andres Annuk,

    1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

    1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

    1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks pärast tähtajalise piirangu lõppemist kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____
(*allkiri*)

Tartu, _____
(*kuupäev*)

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

_____ _____

(*juhendaja nimi ja allkiri*) (*kuupäev*)