



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

KOOSTOOTMISJAAMADE TALITLUSE OPTIMEERIMINE KAUGKÜTTEVÕRGUS

OPTIMAL OPERATION OF COGENERATION PLANTS IN DISTRICT HEATING NETWORK

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Ingmar Tamsalu

Üliõpilaskood 185729EAAB

Juhendaja: Heiki Tammoja, emeriitprofessor

Tallinn 2021

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." 202.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 202.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Ingmar Tamsalu,

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Koostootmisjaamade talitluse optimeerimine kaugküttevõrgus,

mille juhendaja on Heiki Tammoja,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

17.05.2021

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Ingmar Tamsalu

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Koostootmisjaamade talitluse optimeerimine kaugküttevõrgus

Kuupäev:
17.05.2021

41 lk

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja: emeriitprofessor Heiki Tammoja

Sisu kirjeldus:

Bakalaureusetöö põhieesmärgiks oli läbi viia kahe koostootmisjaama vaheline talitluse optimeerimine kaugküttevõrgus soojuskoormuse alusel. Selleks viidi läbi koostootmisjaamade sisend-väljund karakteristikute funktsioonide määramised, aproksimeerimine ning optimaalse koormusjaotuse tingimuste määramine ning nende põhjal arvutusülesande lahendamine ja graafikute koostamine.

Töö jagunes kolme peatükki, millest esimeses käsitleti koostootmisjaamade eripärasid, nende otstarbekust, efektiivsust energiasüsteemides ning rajamise kaalutlust. Teises peatükis käsitleti koostootmisjaamade põhiseadmete tehnoloogiaid ja kolmandas peatükis põhieesmärgi saavutamiseks vajalikke teoreetilisi aluseid ja arvutusülesannet.

Kokkuvõttes on töö eesmärk saavutatud ning on loogiline ja vastavuses teoreetilise ootusega.

Märksõnad: Koostootmisjaam, optimaalne talitus, sisend-väljund karakteristikud, energiatõhusus, koostootmine.

ABSTRACT

Author: Ingmar Tamsalu

Type of the work: Bachelor Thesis

Title: Optimal operation of cogeneration plants in district heating network

Date: 17.05.2021

41 pages

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisor(s) of the thesis: Professor Emeritus Heiki Tammoja

Abstract:

The main aim of the present bachelor's thesis was to find optimal operation of two cogeneration plants in district heating network on basis of heat load. For that functions for cogeneration plant input-output characteristics were composed and approximated then optimum conditions were set for optimal load distribution. After that calculations and graphs were made.

This bachelor thesis was separated into three main chapters. In the first chapter establishment of cogeneration plants, their efficiency and benefits in the energy system and peculiarities were addressed. In the second chapter cogeneration plant main units and used technologies were described. In the last chapter theoretical foundations for the main task were set and described and then calculations were made to find out optimal load distribution between two cogeneration plants.

In conclusion the main aim of the thesis was achieved and was logical and in accordance with the theoretical expectations.

Keywords: Cogeneration plant, optimal operation, input-output characteristics, energy efficiency, cogeneration.

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema: **Koostootmisjaamade talitluse optimeerimine
kaugküttevõrgus**

Lõputöö teema inglise keeles: **Optimal operation of cogeneration plants in
district heating network**

Üliõpilane: **Ingmar Tamsalu, 185729EAAB**

Eriala: **Elektroenergeetika**

Lõputöö liik: **bakalaureusetöö**

Lõputöö juhendaja: **Heiki Tammoja, emeriitprofessor**

Lõputöö ülesande
kehtivusaeg: **Detsember, 2021**

Lõputöö esitamise tähtaeg: **18.05.2021**

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Soojuse ja elektri koostootmine on majanduslikult kindlasti põhjendatud. Koostootmis elektri jaamade optimaalseks juhtimiseks on vajalik teada jaama põhiseadmete sisendväljund karakteristikuid. Eriti oluline on see kaugküttevõrkudes, kus on töös korraga mitu koostootmisjaama ja millede soojuskoormusi tuleb optimaalselt jaotada, et saavutada maksimaalne kasum.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on leida kahe koostootmisjaama vaheline optimaalne taliltus kaugküttevõrgus.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

1. Koostootmisjaamade üldine kirjeldus: nende eripärad, kasutatavad tehnoloogiad, põhiagregaadid.
2. Põhiagregaatide kulu-, eri-, ja marginaalkulukarakteristikud kahe koostootmisjaama kohta

3. Kahe koostootmisjaama vahelise soojuskoormuse jaotuse optimeerimine

4. Lähteandmed

Tööks vajalikud algandmed saadakse juhendajalt.

5. Uurimismeetodid

Töö tulemusteni plaanitakse jõuda analüüsidest olemasolevaid algandmeid. Andmete analüüsiks ja karakteristikute arvutusteks ja aproksimeerimiseks kasutatakse Excelit.

6. Graafiline osa

Tekstijoonised.

7. Töö struktuur

1. Kirjanduse ülevaade
2. Põhilised agregaadid koostootmisjaamas
3. Katelde karakteristikute määramine
4. Koostootmisjaamade vahelise soojuskoormuse jaotuse analüüs
5. Kokkuvõte

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Raamatud, aruanded, teadusartiklid.

9. Lõputöö konsultandid

Konsultante ei vajata.

10. Töö etapid ja ajakava

1. Kirjanduse läbitöötamine (26.11.2020)
2. Lähteandmete kogumine (18.12.2020)
3. Teoreetilise osa kirjutamine, arvutuste teostamine, töö esmane versioon (10.04.2021)
4. Juhendajale läbilugemiseks saatmine (12.04.2021)
5. Paranduste sisseviimine (20.04.2021)
6. Juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine (25.04.2021)
7. Töö lõplik versioon (08.04.2021)

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel.

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
EESSÕNA	9
SISSEJUHATUS	10
1. Üldiselt koostootmisjaamadest	11
1.1 Koostootmisjaama eripärad	11
1.2 Koostootmisjaamade liigitus	12
1.3 Koostootmisjaamade efektiivsus ja otstarbekus	14
1.3.1 Koostootmisjaamade rajamise kaalutus	16
1.3.2 Koostootmisjaamades kasutatavad kütused ja nende osakaal	17
1.3.3 Soojusesalvestamine	18
2. Põhiagregaadid	19
2.1 Aurukatel	19
2.1.1 Kolded ja põletustehnoloogiad	20
2.2 Koostootmisturbiinid	24
2.2.1 Vaheltvõttudega turbiinid	24
2.2.2 Vasturõhuturbiin	25
3. Koostootmissõlme talitluse optimeerimine	26
3.1 Aurukatelde karakteristikute määramise ja aproksimeerimise teoreetiline alus ..	26
3.2 Katelde parameetrite arvutamine ja karakteristikute koostamine	30
3.2.1 Tallinn 2 aurukatla karakteristikute määramine	30
3.2.2 Tallinn 1 aurukatla karakteristikute määramine	34
3.3 Jaamade vaheline optimaalne kaugkütte koormuste jagunemine	36
3.3.1. Tallinn 1 ja 2 koostootmisjaamade karakteristikute määramine	36
3.3.2 Jaamade vaheline optimaalne kaugkütte koormuste jagunemine	37
KOKKUVÕTE	38
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	40

EESSÕNA

Käesolev bakalaureusetöö teema oli pakutud töö juhendaja ja emeriitprofessor Heiki Tammoja poolt elektroenergeetika ja mehhatroonika eriala lõputööks. Algandmed pärinevad Heiki Tammojalt, sest koostootmisjaamad ei võtnud andmete kogumisel ajal vastu ning ei soovitud avaldada vajalikke andmeid kõrvalistele isikutele. Seetõttu sooviksin tänada oma juhendajat koostöö, lõputöö kirjutamise juhendamise ja motiveerimise eest.

SISSEJUHATUS

Soojuselektrijaamad on energiat muundavad ettevõtted, mis genereerivad tarbijatele ja omatarbeks elektrienergiat ja kus elektrigeneraator pannakse tööle soojusjõumasina abil. Selleks võib olla auruturbiin, gaasiturbiin või sisepõlemismootor. Need on keerukad tehnilised süsteemid, kus töötab tavaliselt mitu agregaatit või energiaplokki paralleelselt [1].

Maailmas kui ka Eestis on soojuselektrijaamad põhiliseks elektrienergia tootjateks, näiteks Eesti puhul toodetakse neis üle 95% elektrienergiast. Elektrienergia genereerimise kasutegur on kaasaegsetes soojuselektrijaamades 30-40%. Mis tähendab, et kulutatakse palju kütust ning keskkonda satub palju tuhka ja heitgaase (CO₂, SO₂ jne) [1]. Soojuselektrijaamade põhikütuseks on veel fossiilsed kütused, kuid aina kõrgenevate CO₂ maksude ja Euroopa Liidu poolt seatud kliimaeesmärkide tõttu väheneb neist allikatest toodetud elektrienergia osakaal jõudsalt. Näiteks veel 2018. aastal toodeti Eestis 76% elektrienergiast põlevkivist, siis 2019. aastal vaid 57%. Mis on selge märk, et ollakse teel keskkonnasõbralikumale tootmisele [2].

Aina rohkem leiavad rakendust koostootmisjaamad, mille põhikütusteks on puitmass ja segaolmejäätmed. Koostootmisjaamad on soojuselektrijaamad, kus peamisteks agregaatideks on aurukatlad, koostootmisturbiinid (vaheltvõttutodega kondensatsiooniturbiin või vasturõhuturbiin) ja tihti on kasutusel ka soojaveekatlad. Soojuse ja elektri koostootmisjaama põhiliseks eesmärgiks on tarbijate varustamine soojusenergiaga kuuma vee või auruna. Elektrienergiat toodetakse neis jaamades kõrvalproduktina ning seetõttu töötavad koostootmisjaamad üldiselt soojuse tarbimise järgi ning toodetud elektrienergia aitab katab energiasüsteemi baasosa [1].

Käesolevas töös räägitakse esimeses osas üldiselt sellest, mis neid eristab tavalistest soojuselektrijaamadest, kuidas neid liigitatakse ja millised on nendes kasutatavad tehnoloogiad. Lisaks ka miks on need tänapäeval olulise tähtsusega ja miks on koostootmine tõhusam kui soojuse ja elektrienergia eraldi tootmine. Töö teises osas räägitakse koostootmisjaamade põhiagregaatidest, mis need on ja millised tehnoloogiad on kasutusel.

Kolmandas osas käsitletakse töö põhieesmärki, milleks on leida kahe koostootmisjaama vaheline optimaalne talitus kaugküttevõrgus ning selleks vajalike karakteristikute koostamise teoreetilisi aluseid ja viiakse läbi arvutusülesanne kahe hüpoteetilise koostootmisjaama Tallinn 1 ja Tallinn 2 näitel.

1. Üldiselt koostootmisjaamadest

1.1 Koostootmisjaama eripärad

Koostootmisjaamad (inglise keeles *combined heat and power plant* ehk CHP) erinevad tavalistest soojuselektrijaamadest selle poolest, et neis toodetakse tarbijatele nende vahetus läheduses nii soojust kui ka elektrienergiat. Seejuures on nende põhieesmärgiks on tarbija varustamine soojusega kas kuuma vee või auru kujul ning elektrienergiat genereeritakse koostootmisjaamades kõrvalproduktina [1].

Üldjuhul töötab koostootmisjaam soojuse tarbimise järgi ja sellega koos genereeritav elektrienergia aitab katta elektri tarbimise graafiku baasosa. Genereeritav elektrienergia on soojuse vaheltvõttudega kondensatsiooniturbiini puhul sõltumatult juhitav väga väikeses vahemikus (10 – 15% nimivõimsusest). Vasturõhuturbiini puhul ei ole genereeritav elektriline võimsus üldsegi juhitav. Kusjuures juhul, kui soojuskoormus puudub või on väga väike võivad vaheltvõttudega turbiinid töötada ka tavaliste kondensatsiooniturbiinidena ja sellel juhul on koostootmisjaama elektriline võimsus sõltumatult juhitav ning see saab osaleda elektrisüsteemis elektrilise koormuse reguleerimisel [1].

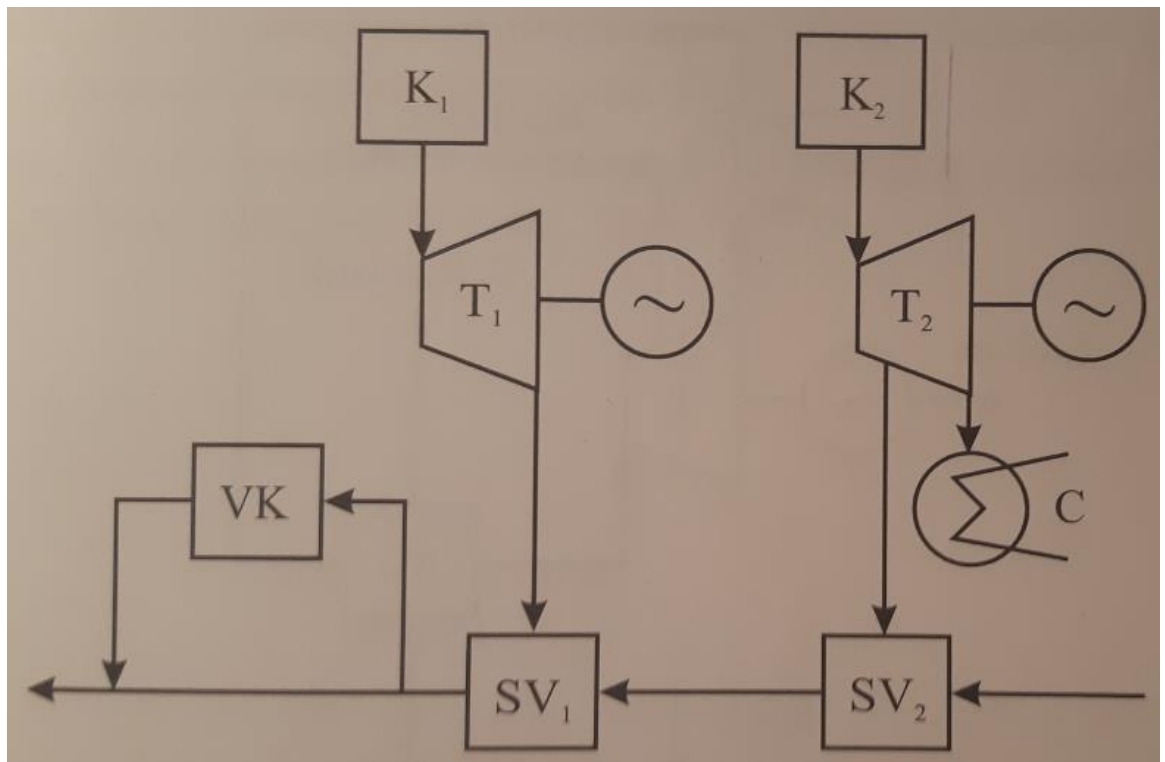
Koostootmisjaamades on jahutussüsteem tavaliselt suletud süsteem. Kondensaatorite jahutamiseks kasutatakse küttevõrgust tagasitulevat vett. Suviti on võib probleemiks kujuneda tagastuva jahutusvee liiga kõrge temperatuur [1].

Kaugkütte võrguvee soojendamine toimub nendes 1-4 astmeliselt [1].

1.2 Koostootmisjaamade liigitus

Ühes jaamas võidakse kasutada mitmeid erinevaid meetodeid ja tehnoloogiaid soojuste ja elektri tootmiseks, kuid üldiselt liigitatakse koostootmisjaamad järgnevalt:

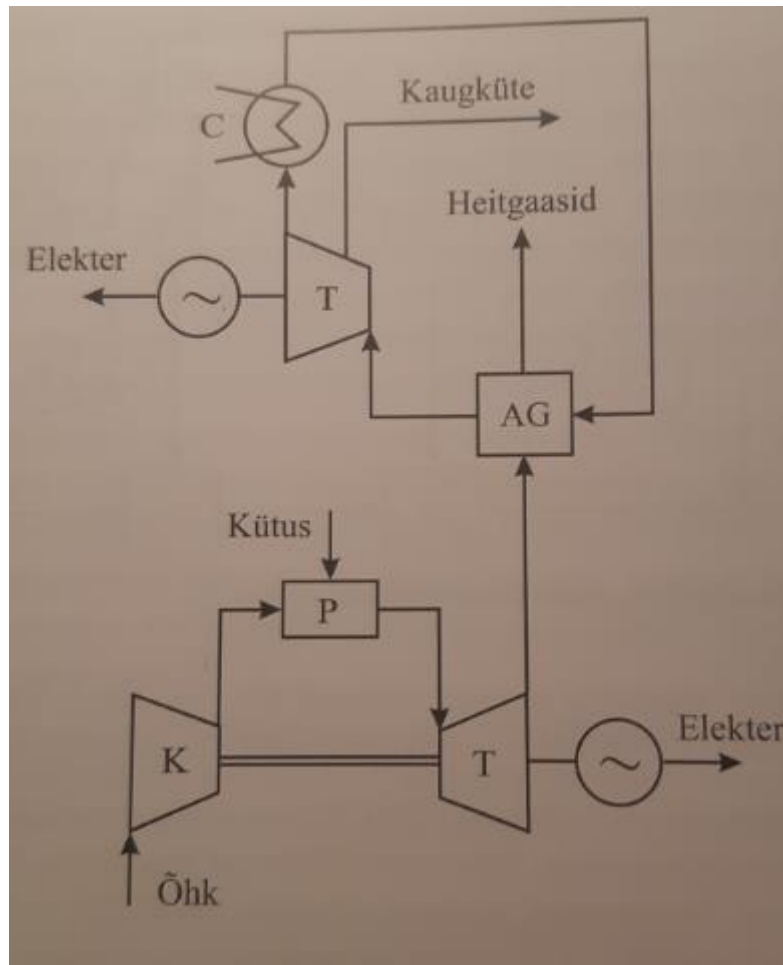
- tavaline koostootmisjaam - elektri jaam, mille põhiagregaatideks on koostootmisturbiinid, aurukatlad, sünkroongeneraatorid ja soojaveekatlad. Kus koostootmisturbiinid võivad olla kuni kolme vaheltvõtuga kondensatsiooniturbiinid või ilma vaheltvõttudeta vasturõhuturbiinid (joonis 1.1).



Joonis 1 Koostootmisjaama põhimõtteline skeem [1]

Joonisel 1 on kasutatud järgnevaid tähiseid: K - aurukatel, VK - veekatel, SV - soojusvaheti, T - turbiin, ~ - turbogeneraator, C - kondensaator. [1]

- kombi-koostootmisjaam - kombitsükliline elektri jaam, mille põhiagregaatideks on gaasiturbiin, vaheltvõttudega või ilma vahelt võttudega vasturõhuturbiin ning utilisaatorkatel (joonis 1.2).



Joonis 2. Kombi-koostootmisjaama põhimõtteline skeem [1]

Joonisel 2 on kasutatud järgnevaid tähiseid: K – kompressor, P – põleti, AG – aurugeneraator, T – turbiin, ~ - turbogeneraator, C - kondensaator. [1]

- tuuma-koostootmisjaam – selle põhiagregaatideks on tuumareaktor, koostootmisturbiin ja sünkroongeneraator.
- Soojusakuga diiselelektrijaam – selle põhiagregaatideks on diiselmootor, elektrigeneraator ja soojusaku.
- Soojusakuga gaasiturbiinjaam – selle põhiagregaatideks on õhukompressor, gaasiturbiin, elektrigeneraator ja soojusaku. [1]

Või soojusjõumasinate tüübi järgi:

- Sisepõlemismootoriga jõuseadmed - põhinevad Dieseli või Otto ringprotsessidel. Neis toodetakse soojus peamiselt heitgaaside ja jahutussüsteemi soojuse arvelt. Üldjuhul on nende peamiseks kütuseks maagaas. Võimsus jääb seda tüüpi jaama puhul vahemikku 100 kW – 5 MW.

- Auruturbiin - põhineb Rankine' ringprotsessil. Kasutatakse erinevaid kütuseid sealhulgas biomass, puit, segaolmejäätmed. Leiavad rakendust suurtematel kaugküttevõimsustel.
- Gaasiturbiin - mis põhineb Braytoni ringprotsessil. Elektriline võimsus võib gaasiturbiinil ulatuda 30 kW kuni 480 MW.
- Kombineeritud süsteem gaasi- ja auruturbiiniga - leiavad rakendust võimsustel alates 75 MW ning see võimaldab saavutada kuni 60% elektrienergia genereerimise kasutegurit. [2]

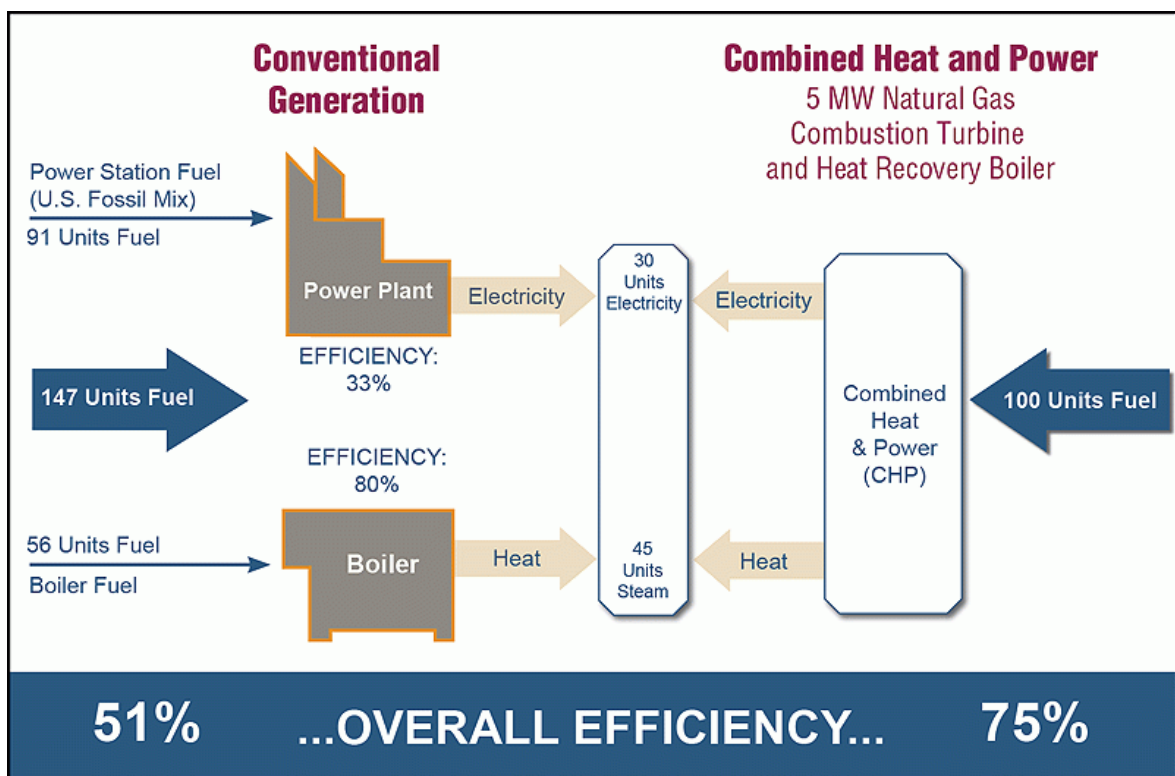
Tabel 1. Koostootmise tehnoloogiate iseloomustus ja võrdlus [3]

	Auruturbiin		Gaasiturbiin	Kombineeritud gaas-auruturbiin	Kolbmootor		Kütuse-element
	Vasturõhu turbiin	Vaheltvõtuga turbiin			Otto mootor	Diiselmootor	
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
Elektri / 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
Elektritootmise Kasutegur, %	7-20	10-20	25-40	35-50	25-33	35-42	40-70
Kogukasutegur, %	75-84	75-85	65-86	73-86	70-90	65-90	55-80

1.3 Koostootmisjaamade efektiivsus ja otstarbekus

Euroopa Liidu elektri ja soojuse koostootmise direktiiv 2004/8/EC määrab ära, et koostootmine on mõttekas vaid juhul kui sealt saadav kütuse sääst on üle 10% võrreldes nende lahustootmisega ainult elektrienergiat genereerivas elektrijaamas ja soojuskatlamaja ning koostootmise tehnoloogia üldkasutegur ületab 75-80%.

Koostootmine on väga tõhus kütuses oleva energia kasutamise tehnoloogia. Koostootmisjaamade kasutegurid ulatuvad tänapäeval kuni 90%, mis on 15 – 40% kõrgem, kui elektri ja soojuse eraldi tootmise puhul [3]. Seda kirjeldab joonis 3, kust selgub, et 45 ühiku kasuliku soojuse ja 30 ühiku kasuliku elektri saamiseks tuleb neid eraldi tootes sisestada 147 ühikut kütust, millest kadudeks läheb 72 ühikut ehk üldkasutegur on 51%. Kuid sama koguse kasuliku energia saamiseks kulub koostootmisprotsessiga kõigest 100 ühikut kütust, mis on 32% vähem, ja protsessis on kaod ligi 3 korda väiksemad ning jaama üldkasutegur on 75%. Suurima osa kadudest moodustabki ainult elektrit genereeriva elektrijaamas tekkiv ja kasutamata jäänud soojus, mis lastakse gaaside näol atmosfääri. Selle soojuse kasulik rakendamine, näiteks kaugküttevõrgu vee soojendamiseks, suurendab kütuses oleva energia efektiivset ärakasutamist märgatavalt.



Joonis 3. Soojuse ja elektri lahus- ja koostootmise tõhususe võrdlus [16].

Eestis on suure soojuskoormusega piirkondades elektri ja soojuse koostootmise potentsiaal praeguseks juba suuresti realiseeritud. Kuid on veel piisavalt potentsiaali väiksematele koostootmisjaamadele madalama soojuskoormusega piirkondades, mis põhinevad taastuvenergiaallikatel, näiteks biomassil. Lisaks on olemas potentsiaalne vajadus elektri- ja soojuse koostootmise vastu tööstustes, kus on stabiilne soojuse ja elektri tarbimine, näiteks tselluloositööstuses. Ehk suureneb võimalus hajutatud energia

tootmiseks, kus koostootmisjaamad projekteeritakse vastavalt kohaliku tarbija vajadustele, mis suurendab kohalikku varustuskindlust, efektiivsust ja paindlikkust [4].

Hajutatud koostootmisega kaasnev tootmisüksuste mitmekesisus suurendab ka üldist konkurentsivõimet energiaturul, võimaldades taskukohasemaid hindu ja laialdasemat valikut nii tööstus- ja äritarbijale kui ka kodutarbijale, mis on oluline osa vaba energiakaubanduse kujunemisel. Lisaks luuakse koostootmisjaamade rajamisega uusi töökohti ning piirkonna tööhõive paraneb [4].

Eesti ei saavutanud Euroopa Liidu poolt 2020. aastaks seatud soojuse ja elektri koostootmise eesmärki, milleks oli saavutada neis jaamades toodetud elektri osakaaluks 20% brutotarbimisest, osakaaluks jäi ~15%. Koostootmisjaamades toodetud soojusenergia kogus jääb natuke alla 50% kogu soojustoodangust. Energiamaajanduse arengukava aastani 2030 raames jätkatakse koostootmise edendamist ning loodetakse rajada täiendavaid koostootmisjaamu vähemalt 25 MW_{el} jagu, rekonstrueerida vanu, suurendada jaamade energiatõhusust ja suurendada taastuvate kütuste osakaalu, millega väheneb ka emissioonide hulk [5].

1.3.1 Koostootmisjaamade rajamise kaalutlus

Koostootmisjaama ehituseks vajalik algne investeering on küllaltki suur ning tasusuvaeg on pikk. Selleks tuleb jaama teostatavust põhjalikult hinnata, et suurendada toodetava elektri- ja soojusenergia kasutamisega kaasneva suurema tõhususe arvelt saavutatavat kulude kokkuhoidu. Oluline on arvestada kogu elutsükli kulusid, mis lisaks algsele investeeringule hõlmab ka tegevus-, hooldus- ja utiliseerimiskulusid ning võrrelda neid ka teiste tootmistehnoloogiate kuludega.

Uute koostootmisjaamade vajalikkus ja majanduslik elujõulisus sõltub piirkonna elektri- ja soojusvajadusest. Koostootmisjaama teostatavuse uurimise ajal tuleb neid suuta õigesti hinnata, et saaks valitud sobiva võimsusega ja tootmistehnoloogiaga jaam.

Õigesti valitud võimsusega ja tehnoloogiaga jaama töötundide arv on võimalikult suur ning seisakuid võimalikult vähe. Seetõttu on oluliseks kulukaalutluseks ka hoolduskulud, mis sõltuvad jaama suurusest, tüübist jms. Tõhusa ja järjepideva hooldusega tagatakse jaama optimaalne töö ja seisakuaegade lühenemine.

Tähtis on arvestada ka koostootmisjaamas kasutatava kütusega, mis mõjutab jaama pikaajalist tasuvust. Koostootmisjaama pikaajalise majandusliku elujõulisuse tagamiseks tuleb arvestada kütusehinna võimaliku tõusuga ning kas kasutatav kütus on oma omadustelt ja saadavuselt persektiivikas ka tulevikus kasutamiseks. [6]

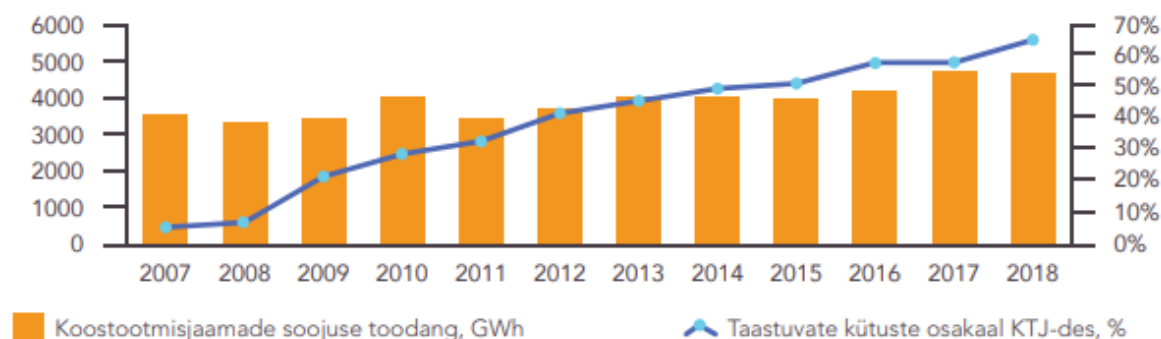
Kui neid ei suudeta õigesti hinnata ei tööta jaam efektiivselt ning mõjutab koostootmislahenduse majanduslikku elujõulisust ja energia tootmise tõhusust.

Uute taastuvenergiaallikatel põhinevatel koostootmisjaamade ehitamine oleneb peamiselt seadusandjast, sest lisanduva elektritootmisvõimsuse investeeringu maksumus elektrivõimsuse ühiku kohta on oluliselt kõrgem investeeringu maksumusest soojusvõimsuse ühiku kohta. Sellepärast ei ole need konkurentsivõimelised taastuvenergia vähempakkumistel suure alginvesteeringumaksumuse ning kütusekomponendi tõttu. Seetõttu on väga oluline, et taastuvenergia oksjoneid viidaks läbi tehnoloogiapõhiselt, kui soovitakse edendada selliseid koostootmisüksuseid [7].

1.3.2 Koostootmisjaamades kasutatavad kütused ja nende osakaal

Koostootmisjaamad on väga paindlikud ning neis saab kasutada mitmeid erinevaid kütuseid. Kasutusel on nii biokütused, maagaas, põlevkivi, põlevkiviõli, põlevkivigaas ja jäätmekütus. Tänapäeval uutes ja planeeritavates koostootmisjaamades on peamiseks kütuseks biokütused. Lähiminekis töötasid enamus jaamu maagaasil [7].

Eestis ja ka üldiselt maailmas pannakse suurt rõhku kodumaiste- ja taastuvkütuste kasutamise osakaalu suurendamisele. Taastuvallikatest pärit kütuse kasutamine on koostootmisjaamades viimase kümne aasta jooksul suurenenud enam kui 50% võrra, moodustades 2018. aastal 66% kogu kasutatavast kütusest [7]. Suurima osa sellest 2019. aasta andmetel moodustab puitkütuse põletamine, mis moodustab ligi 65% (15739 TJ) kõikidest koostootmisjaamades kasutatavatest kütustest saadavast energiast (24975 TJ). Biogaas moodustas 3,8% ja freesturvas 1,1%, biogaasi kasutus on püsinud üldiselt samas mahus, kuid freesturvase kasutus on viimase 10 aastaga vähenenud pea 4 korda [8].



Joonis 4. Taastuvatest kütustest toodetud soojuse osakaal koostootmisjaamades [7].

Maagaas on küll puhtaim fossiilne kütus, kuid koostootmisjaamades on selle kasutamine muutunud pea olematuks, vähendes viimase 10 aastaga 10 korda ning moodustab tänaseks 1,2% [8]. Selle põhjus on nii üleminek taastuvenergiaallikatele ja kohalikule kütusele, maagaasi tõusev hind kui ka geopoliitilised küsimused ning energiajulgeoleku suurendamine.

Fossiilsestest kütustest on Eesti koostootmisjaamades veel kasutusel põlevkivi ning selle töötlemisel saadav põlevkivigaas ning väga vähesel määral ka põlevkivikütteõli (raske fraktsioon). Põlevkivist ja põlevkivigaasist saadav energia osakaal on seoses energiapoliitikaga ning kallite emissioonimaksude pärast vähenemas moodustades 2019. aastal 23% [8].

Viimastel aastatel on koostootmisjaamades populaarsust kogunud segaolmejäätmete kasutamine kütusena. Tekkiva prügi energeetiline väärtus on samaväärne põlevkivi ja hakkepuiduga ning selle asemel, et seda prügilasse ladustata saab selle koostootmisjaamades tõhusalt ära kasutada, kusjuures heitmete poolest on prügipõletus võrdne biokütusel töötava koostootmisjaamaga [9]. 2019. aastal moodustas sealt saadav energia 7% kogu koostootmisjaamades toodetud energiast [8].

1.3.3 Soojusesalvestamine

Koostootmisjaamadel tulenevalt nende soojusgraafiku põhisest tööst sestoone iseloom. Suvel ja soojematel aegadel, mil puudub küttekoormus, et mitte jaama seisma panna või madalal koormusel töös hoida, kasutatakse neis väga laialdaselt soojusakusid. Enamikel energeetilistel seadmetel on maksimaalne kasutegur saavutatud kui seade töötab nimivõimsuse lähedal. Seadme kasutegur väheneb märgatavalt, kui see töötab väiksemal koormusel. Näiteks on koormatusele väga tundlikud gaasiturbiinid ja gaasimootorid [1]. Hetkel mil soojuskoormus süsteemis on madal akumeleeritakse tootmisest ülejääv soojus soojusakusse, kust suurema soojuskoormuse ajal saab soojustarbija võtta soojust vastavalt vajadusele. Lisaks suudavad soojusakudega varustatud koostootmisjaamad osaleda ka võimsusbilansi reguleerimisel [9].

Üldiselt toimub soojuse salvestamine kaugküttevõrgu tarvis väga tõhusalt isoleeritud soojusakupaagis, kus selleks kasutatakse kas vett või muid vedelaid ained või tahkeid ained nagu liiv.

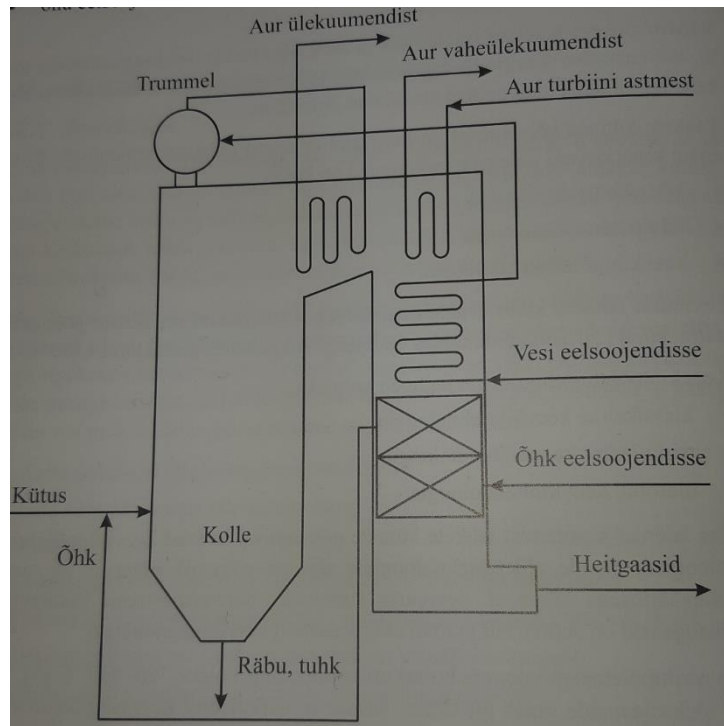
2. Põhiagregaadid

2.1 Aurukatel

Aurukatel on energeetiline seade koostootmisjaamas, mis kütuse põletamisel tekkiva soojuse arvelt toodab ülekuumendatud veeauru auruturbiinile. Katlasse antakse kütust, eelsoojendatud õhku ja eelsoojendatud toitevett. Selle põhikomponendid on kolle, põletid, küttepindade puhastussüsteem, aurutusküttepinnad, auru ülekuumendi, auru vaheülekuumendi, ökonomaiser ja õhu eelsoojendi [1].

Aurukatla põhilised talitluse parameetrid on:

- katla soojuskoormus või aurutoodang
- kütusekulu
- ülekuumendatud auru rõhk, temperatuur ja temperatuur peale vaheülekuumendit
- toitevee temperatuur
- liigõhutegur
- lahkuvate gaaside temperatuur
- põlemisjääkide kogused [1]



Joonis 5. Aurukatla põhimõtteline konstruktsioon [1].

Lisaks aurukateldele kasutatakse ka soojaveekatlad ja utilisaatorkatlad. Soojaveekatlad kasutatakse koostootmisjaamades kaugküttevõrgu tipukoormuse katmiseks ja soojuskoormuse reserviks. Utilisaatorkatel on selline aurugeneraator, millel puudub kolle ja soojusallikana kasutatakse gaasiturbiini või muu tehnoloogilise seadme kuumi põlemisgaase [1].

Vee liikumise iseloomu järgi jaotatakse katlad:

- vabaringluse katlad – neis ringleb vee ja auru segu nende tiheduse erinevuste tõttu
- mitmekordse sundringlusega katlad – pannakse segu ringlema ringluspumbaga
- otsevoolukatlad – toitepump pumpab segu läbi katla järjestikku lülitatud küttepindade [1]

2.1.1 Kolded ja põletustehnoloogiad

Tahkete kütuste põletamisel kasutatakse põhiliselt kolme põletustehnoloogiat, milleks on kihtpõletus-, tolmpõletus- ja keevkihtpõletustehnoloogiat [1].

2.1.1.1 Kihtpõletustehnoloogia ja restkolded

Kihtpõletustehnoloogia on tahkete kütuste põletustehnoloogia restkoldel, mis on laiaulatuslikumalt kasutusel väikesevõimsusega tööstusküttekateldes ning harvem ka

elektri genereerimisel. Kütustena kasutatakse peamiselt hakkpuitu, muid puidujäätmeid, sorteeritud jäätmeid ja turvast. Ülekuumendatud auru parameetrid koostootmiseseadme puhul 2,3 MPa ja 450 °C [10].

Kolderesti põhiülesanne on toetada sellel üldiselt vabalt lebavat kütusekihti ja ühtlustada kihi alla suunatud põlemisõhku. Resti konstruktsioon sõltub kasutatavast kütusest, selle tuhasisaldusest, niiskusest jne ja katla üldisest konstruktsioonist. Restkollete põhitüüpideks on:

- Liikumatu rest – Paigutatakse koldesse sellise nurga all, mis tagab kütuse varisemise kuivamistsoonist kuni täieliku põlemise tsoonini. Liikumatu kaldrestiga kolde kaldenurk on ligilähedane kasutatava kütuse varisemise nurgaga. Sõltuvad kütusest ja konstruktsioonist on see üldiselt piirides 30° - 40°.
- Mehaanilise restiga kolded – Restielementide liigutamine võimaldab paremini ja kontrollida kütusekihi liikumist ja ühtlasemat jaotust restil ning tänu sellele saavutab efektiivsema põlemise ja alandab kahjulike heitgaaside sisaldust suitsus võrreldes liikumatu restiga. Niiske kütuse korral kasutatakse ka eelkoldega kombineeritud lahendust, mille seinad on ilma küttepindadeta ning neid seinu jahutatakse põlemisõhuga, mis annab õhule ettesoojenduse ja parandab põlemistingimusi. Väga niiske kütuse korral on seinad ilma jahutuseta, et seinte kiirgus annaks piisavalt soojust, et kuivatada kütust ning luua sobivad põlemistingimused.
- Pöördliikumise kettrest – Sobivad paremini suurtemate võimsuste korral erinevate kütuste põletamiseks samas koldes. Kettrest ehk lint liigub koldes ning selle ühele otsale antakse kütust, mis kuivab ja põleb sellel kuni see kantakse tuhakambrisse. Kettresti liikumist on võimalik väga paindlikult reguleerida saavutades veelgi optimaalsema põlemise ja kuivamise aja, efektiivsuse ning põlevainevaba tuha eemaldamise. [11]

2.1.1.2 tolmpõletustehnoloogia

Tolmpõletustehnoloogia on enamlevinumaks tahketel kütustel töötavates elektrijaamades. See seisneb kütuse eelnevas peeneks jahvatamises ja selle põletamises koldes. Kütuse põlemise stabiilsus ja efektiivsus tagatakse põleti konstruktsiooniga ja koldesisese aerodünaamikaga. Tolmpõletiti võimsus on määratud kolde mahuga. Enamlevinumaks on tahkešlaki ärastusega kolded, mille korral on temperatuur koldes madalam ning see eraldub tahkel kujul. Tänapäevane tolmpõletite on oma olemuselt peale põletustehnilise seadme ka soojusvaheti koos selleks vajalike soojusvahetuspindadega ehk teisesõnaga aurukatel. Tolmustamise

süsteem ja aurukatla konstruktsioon sõltuvad peamiselt kasutatava kütuse omadusest ning temperatuur koldes võib tõusta kuni 1300 °C [10].

Selle põletustehnoloogia kasutamisel on oluliseks küsimuseks vääveldioksiidide ja lämmastikoksiidide heitmed atmosfääri. Nende vähendamiseks kasutatakse erinevaid väävlipüüdeseadmeid, mille tõttu langeb aga katla kasutegur 3-4% võrra ning väälipüüdeseadmete hind võib ulatuda kuni 30%-ni katla hinnast. Lämmastikdioksiidide ja süsihappegaasi kontsentratsiooni vähendamiseks kasutatavad meetodid langetavad katla kasutegurit ja kasumlikkust veelgi [10].

2.1.1.3 keevkihtpõletustehnoloogia

Tänapäeval leiab üha rohkemat kasutamist keevkihttehnoloogiad. Selle tehnoloogiaga on võimalik põletada ka madala kütteväärtusega kütuseid. Enamlevinumaks on klassikaline, tsirkuleeriv ja ülerõhul keevkihttehnoloogiad [1].

Keevkiht on hõljuvatest tahkekütuse osadest ja seda läbiva gaasivooluse aerodünaamiline süsteem, milles tekib sisemist liikumist omav keha. Kuna keevkihil on mõned sarnased omadused vedelikuga ning seetõttu käitub ka sellega sarnaselt tuntakse keevkihti ka pseudovedelikuna. Kuumutades osakestest moodustuva keevkihi vähemalt süttimistemperatuurini ning suunates sinna kütuse peale voo, toimub pidev põlemine vajamata kõrget temperatuuri ning vajadusel lisatakse kütuse voole juurde ka väävliühendite sidumiseks sorbenti. Keevkihttehnoloogia korral on temperatuur koldes üldiselt vahemikus 750 – 950 °C [10].

Suurevõimsuselistes energiablokkides on laialdaselt kasutusel tsirkuleeriva keevkihiga katlad. Selle tehnoloogia korral rebitakse kütuse osakesed keevkihist lahti ja suunatakse separaatorisse, kus eraldatakse jämedad osakesed tagasi katlasse ning peened osakesed suunatakse koos põlemisgaasidega katla konvektiiv-küttepinnale. Kõikidel tsirkuleeriva keevkihiga kontuuridel on lukustusseaded, mis lubab kütuse osakestel liikuda ainult kõrgema rõhuga piirkonda. Tänapäevased tsirkuleeriva keevkihiga katlates seadistatakse tahkete osakeste tagasivoolule paigaldatud õhk keevkiht soojusvahetiga, milles asub küttepind soojuse ülekandeks kõrgetemperatuuriga keevkihtkeskkonnast kuumutatavale keskkonnale, milleks on üldjuhul ülekuumendatud aur [10].

Tsirkuleeriv keevkihtpõletustehnoloogia vähendab oluliselt emissioonide koguseid ja seejuures suureneb põlemisprotsessi kasutegur ning suitsugaasid on suhteliselt puhtad ja vastavad seejuures keskkonnanõuetele [1].

Ülerõhul töötav keevkihtpõletustehnoloogia põhineb liitringprotsessil. Soojusjõuseade koosneb kahest soojusjõumasinast, millesk on Brayton'i ringprotsessil töötav gaasiturbiiniseade ja Rankine'i ringprotsessiga aurujõuseadet. Energiamuundusseadme võimsusest on 20 – 25% gaasiturbiinile ja 75 – 80% auruturbiinile. Kõigis tööstuslikes seadmetes on kasutusel tavalise keevkihiga kolded, kui aga tahkekütuse ülerõhul põletustehnoloogiat kasutavad seadmed võrrelduna atmosfäärirõhul töötavata keevkiht- või tolmpõletusseadmetega on väiksemate mõõtmetega ja kompaktsemad. Suurimaks probleemiks on gaasiturbiini siseneva põlemisgaasi puhastamine tahkekütuse osakekestest [10].

2.2 Koostootmisturbiinid

Tööprintsibiibist lähtuvalt saab jagada auruturbiinjõuseadmed vaheltvõtuga turbiinideks ja vasturõhuturbiinideks. Aurujõuseadmete termodünaamiline tööprotsess põhineb Rankine'i ringprotsessil. Auruturbiinis suunatakse kütuse põlemise tagajärjel kuumendatud aur läbi turbiini töölabade, mille toimiv jõud paneb turbiini töörotta pöörlema. Auruturbiini pöörlemisest tekkiva mehaanilise energia saab generaatori abil muundada elektrienergiaks [3].

Auruturbiinseadmete põhilisteks eelisteks on väga hea töökindlus ja pikaldane eluiga, peale selle on neis seadmes võimalik kasutada kõiki kütuseid. Samuti sobivad auruturbiinseadmed ühtlasel koormusel töötama ning valides sobivat seadet on võimsuste ulatus väga lai. See tehnoloogia on koostootmisjaamades üks enamkasutatavaid. Puudustena on aurujõuseadmetel väga kõrged hoolduskulud ning vähene automatiseeritus. Väikese võimsusega (alla 1 MW) seadmetel on väike elektriline kasutegur, seega ei talu antud seadmed madalaid koormusi, kuna aur ei ole piisavalt kõrge temperatuuri ja rõhuga [12].

2.2.1 Vaheltvõttudega turbiinid

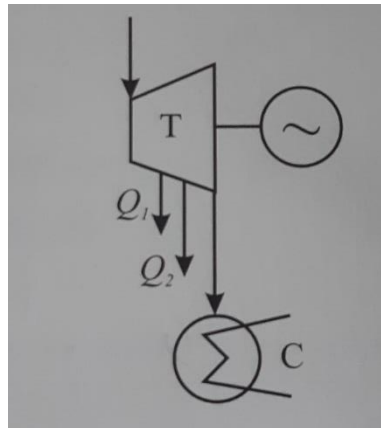
Auru vaheltvõttudega turbiinil on tavaliselt kuni kolm vaheltvõttu. Vaheltvõttudest võetavat auru kasutatakse tööstuses tehnoloogilise auruna või kaugküttesüsteemis võrguvee soojendamiseks. Sellisel tootmisturbiinil on alati ka kondensaator, ehk turbiin võib töötada nii soojus- kui ka elektrigraafiku järgi [1].

Talitlust elektrilise graafiku järgi iseloomustab elektri ja soojuse sõltumatu tootmine ja see on võimalik juhul, kui töötanud auru soojus antakse soojustarbijale ja kondensaatori jahutusveele [1].

Soojusgraafiku järgi talitlusel on turbiini madalrõhu silindri reguleerimisorganid suletud ja kondensaatorisse suundub minimaalne kogus auru. See minimaalne kogus auru on vajalik madalrõhuastme jahutamiseks. Seda talitlust iseloomustab jäik sõltuvus soojuskoormusest [1].

Termofikatsiooniturbiinides on vaja reguleerida ka auru vaheltvõtte, milleks kasutatakse reguleerimisdiafragmasid. Diafragmade juhtimiseks kasutatakse vaheltvõttude auru rõhuregulaatoreid. Diafragmad on väiksema tihedusega ning need saab paigaldada turbiini töösilindrisse. Tavaliselt on diafragmas umbes 50 ava ja pöördenurk 5° [1]. Reguleeritava vaheltvõtuga turbiinide võimsusekadu on üpris väike. Kõrge vaheltvõtu rõhk (< 6 bar) sobib tööstuslikuks kasutamiseks ning madala vaheltvõturõhuga aur (0,7-2,5 bar) sobib nii kütte- kui ka tarbevee soojendamiseks. Soojuskoormuse

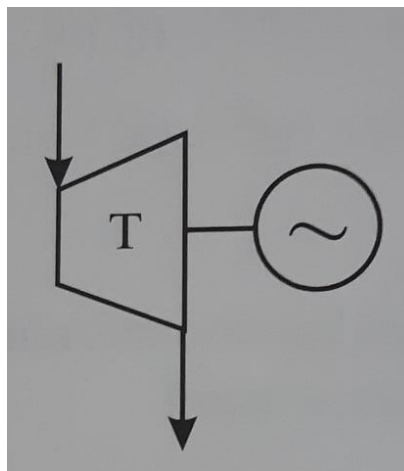
puudumisel töötab turbiin kondensatsioonrežiimil, kuid sellisel juhul on seadmel väiksem kasutegur võrreldes ainult elektrit tootva jõuseadmega. Reguleeritavate vaheltvõttudega auruturbiin töötab kõige efektiivsemalt, kui reguleeritavad vaheltvõttud on koormatud ja soojuse tarbijad asuvad lähedal. Nende seadmete elektriline võimusus on 25-250 MW [12].



Joonis 6. Vaheltvõttudega auruturbiini põhimõtteline skeem [1]. (T – auruturbiin, C – kondensaator, Q_1 ja Q_2 – auru vaheltvõttud, \sim - generaator)

2.2.2 Vasturõhuturbiin

Vasturõhuturbiine kasutatakse nii tehnoloogilise auru tootmisel kui ka kaugküttevõrkude toiteallikana. Selle elektriline võimsus sõltub otse turbiini soojuskoormusest, sest neis puudub madalrõhuosa koos kondensaatoriga ehk vasturõhuturbiin talitleb alati soojusgraafiku järgi ning on seetõttu vähe paindlikud. Vasturõhuturbiinid on suhteliselt lihtsa ehitusega ja selle kulukarakteristik sõltub otseselt vasturõhust [1].



Joonis 7. Vasturõhuturbiini põhimõtteline skeem [1]. (T – auruturbiin, \sim - generaator)

3. Koostootmissõlme talitluse optimeerimine

Koostootmisjaamade talitluse optimeerimine seisneb vaadeldava jaama sellise talitluse leidmises, mille puhul on seal kasutatava kütuse kulu ajaperioodis T minimaalne ja kasum sealjuures maksimaalne. Üldiselt talitlevad koostootmisjaamad soojusgraafiku alusel ning tavaliselt on neis jaamades soojusgraafiku täitmiseks palju erinevaid seadmeid [1].

3.1 Aurukatelde karakteristikute määramise ja aproksimeerimise teoreetiline alus

Koostootmisjaamade peamine soojusvarustus on aurukatel. Aurukatla töö tehnoloogilised parameetrid näitavad olulist mõju konkreetsele kütusekulule ning toodetava soojuse ja elektrienergia maksumusele, määrates kogu jaama ökonoomsuse. Tähtsate agregaatide hulka kuuluvad ka auru- ja gaasiturbiinid või turbogeneraatorid. Sellest tuleb arvutada agregaatide või energiablokkide sisend-väljundkarakteristikud [14].

Katlede kütusekulu ja soojuskoormuse iseloomustamiseks kasutatakse praktikas mitmesuguseid mõõtühikuid, nendest levinuimad on, massiühikud (t/h) või energiaühikud (MW/h). Iga katla jaoks määratakse vähemalt MW_{\min} ja MW_{\max} koormused, kuid soovitatavalt ka rohkem. Nende koormustega katel võib pikaajaliselt ja püsivalt töötada ilma kahjulikke tagajärjedeta (tsirkulatsiooni rikkumine, põletamise püsivuse rikkumine jm.) ning samuti töötada lubatud auru parameetrite piires. Katelde parameetrid võivad muutuda suurtes piires sõltuvalt kütuse liigi ja kvaliteedi ning katla seisundi jms muutumisel [15].

Katla kütusekulu karakteristikuks nimetatakse funktsiooni, mis näitab, kuidas katla kütusekulu ühes ajaühikus sõltub katla soojuskoormusest (valem 1) [1, 13]:

$$B_K = B_K(Q_K) \quad (\text{valem 1})$$

B_K – katla kütusekulu ühes ajaühikus; Q_K – katla soojuskoormus ehk väljundvõimsus

Aurukatla kütuse erikuluks δ_K nimetatakse aga kütuse keskmist kulu ajaühikus katla koormuse ühiku kohta [1, 13]:

$$\delta_K = \frac{B_K}{Q_K} \quad (\text{valem 2})$$

Sellest tulenevalt näitab aurukatla kütuse erikulu karakteristik sõltuvust aurukatla koormusest [1,13]:

$$\delta_K = \frac{B_K(Q_K)}{Q_K} \quad (\text{valem 3})$$

Kütuse marginaalkulu karakteristik ehk kütusekulu suhteline juurdekasvu karakteristik b_K on ka katla koormuse funktsioon ning näitab, kui palju muutub katla kütusekulu, kui suurendada selle koormust ühe ühiku võrra [1, 13]:

$$b_K = \frac{\partial B_K(Q_K)}{\partial Q_K} \quad (\text{valem 4})$$

Agregaadi karakteristikute saamiseks tuleb katsete tulemusi aproksimeerida sobiva analüütilise funktsiooniga, selleks võib olla näiteks lineaarfunktsiooniga aproksimeerimine või aproksimeerimine ruutpolünoomiga. Üldiselt on eelnevatest uuringutest selgunud, et aurukatla kütusekulu karakteristikute aproksimeerimiseks sobivad 2-4 astme polünoomid. Suuruste X ja Y vaheline tulemuste alusel kujundatuud sõltuvus silutakse ruutfunktsiooniga [1]:

$$Y = \varphi(X; a, b, c) = aX^2 + bX + c \quad (\text{valem 5})$$

Järgnevalt leitakse valemi 5 põhjal selle osatuletised a, b, c alusel [1]:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial a} = X^2 \quad (\text{valem 6})$$

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial a}\right)_i = x_i^2 \quad (\text{valem 7})$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial b} = X \quad (\text{valem 8})$$

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial b}\right)_i = x_i \quad (\text{valem 9})$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial c} = 1 \quad (\text{valem 10})$$

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial c}\right)_i = 1 \quad (\text{valem 11})$$

Saame kolm võrrandit, millega määratakse a, b ja c [1]:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n [y_i - (ax_i^2 + bx_i + c)]x_i^2 = 0 \\ \sum_{i=1}^n [y_i - (ax_i^2 + bx_i + c)]x_i = 0 \\ \sum_{i=1}^n [y_i - (ax_i^2 + bx_i + c)] = 0 \end{cases} \quad (\text{valem 12})$$

Koostootmisjaamades tuleb tihti ette, et jaamas pole ainult mitte üks katel, vaid mitu aurukatelt, mis töötavad paralleelselt. Selliseid paralleelselt töötavaid katlaid võib käsitleda ühe ekvivalentse katlana.

Ekvivalentse katla sisend-väljundkarakteristikute määramiseks tehakse eeldus, et koormusjaotus jaamas olevate katelde vahel on optimaalne. Sellel puhul määratakse ekvivalentse katlagrupi karakteristikud üldjuhul sarnaselt ükski katlaga, kuid nende leidmiseks tuleb kasutada suurust $Q_{K\Sigma}$ ehk ekvivalentse katla summaarset koormust ning nende määramist kirjeldavad valemid 14 – 16 [1, 13].

Ekvivalentse katla kulukarakteristik:

$$B_K(Q_{K\Sigma}) = \delta_{K\Sigma}(Q_{K\Sigma}) \cdot Q_{K\Sigma} \quad (\text{valem 14})$$

Ekvivalentse katla erikulu karakteristik:

$$\delta_K(Q_{K\Sigma}) = \frac{B_K(Q_{K\Sigma})}{Q_{K\Sigma}} \quad (\text{valem 15})$$

Ekvivalentse katla marginaalkulu ehk kütusekulu suhtelise juurdekasvu karakteristik:

$$b_K(Q_{K\Sigma}) = \frac{\partial B_K(Q_{K\Sigma})}{\partial Q_{K\Sigma}} \quad (\text{valem 16})$$

Edasi vaatleme jaamade vahelise optimaalse kaugkütte koormuse jaotuse ülesannet. Koormusjaotuse optimeerimise eesmärgiks on minimeerida paralleelselt töötavate jaamade summaarne kütusekulu. Ülesande püstitus on järgmine [1, 13]:

Minimeerida

$$\sum_{i=1}^N B_{KTji}(Q_{KKi}) \quad (\text{valem 17})$$

Lisatingimusel

$$Q_{KK\Sigma} - \sum_{i=1}^N Q_{KKi} = 0 \quad (\text{valem 18})$$

Järgmisena leiame optimaalsustingimuse kasutades selleks Lagrange'i funktsiooni

$$\Phi = \sum_{i=1}^N B_{KTJi}(Q_{KKi}) - \mu(Q_{KK\Sigma} - \sum_{i=1}^N Q_{KKi}) \quad (\text{valem 19})$$

Kus μ on Lagrange'i kordaja.

Optimumi tingimuseks on

$$\frac{\partial \Phi}{\partial Q_{KKi}} = \frac{\partial B_{KTJi}}{\partial Q_{KKi}} - \mu = 0 \quad (\text{valem 20})$$

Minimaalse kütusekulu tagamiseks on vajalik selline koormuse jaotus jaamade vahel, et igal ajahetkel nende marginaalkulud oleksid võrdsed ehk oleks täidetud nn kütuse suhtelise juurdekasvu võrdsuse printsiip ehk matemaalisel kujul:

$$b_{KTJ1} = b_{KTJ2} = b_{KTJN} = \mu$$

3.2 Katelde parameetrite arvutamine ja karakteristikute koostamine

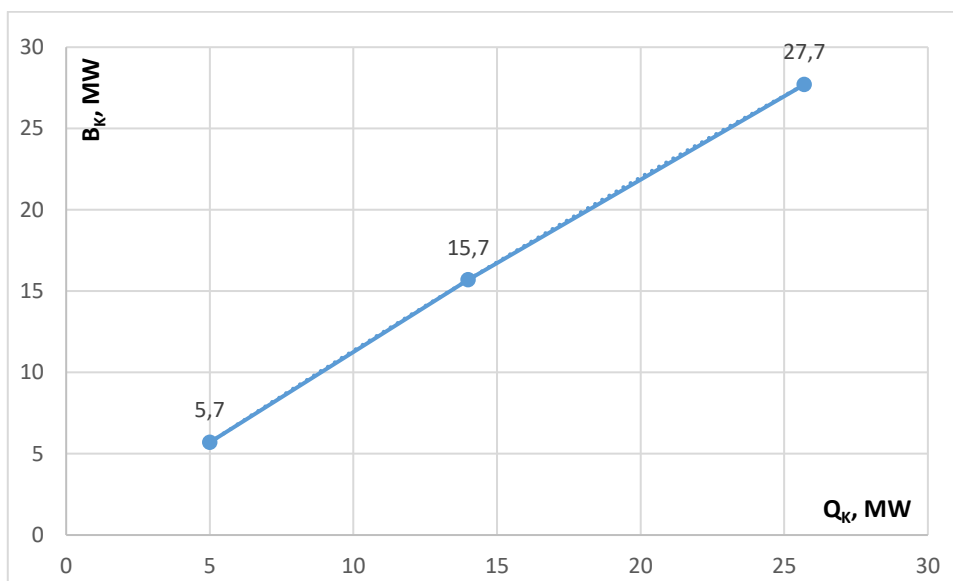
Arvutused viiakse läbi kahe hüpoteetilise koostootmisjaama, Tallinn 2 ja Tallinn 1, näitel. Tallinn 2 on ühise aurumagistraaliga koostootmisjaam, kus töötab paralleelselt 3 eelrestkoldega aurukatelt ja Tallinn 1 koostootmisjaam on ühe keevkihtkoldega aurukatla plokki jaam.

Arvutusteks vajalikud algandmed pärinevad käesoleva töö juhendajalt ning on analoogsed realselt eksisteerivate koostootmisjaamade omadega.

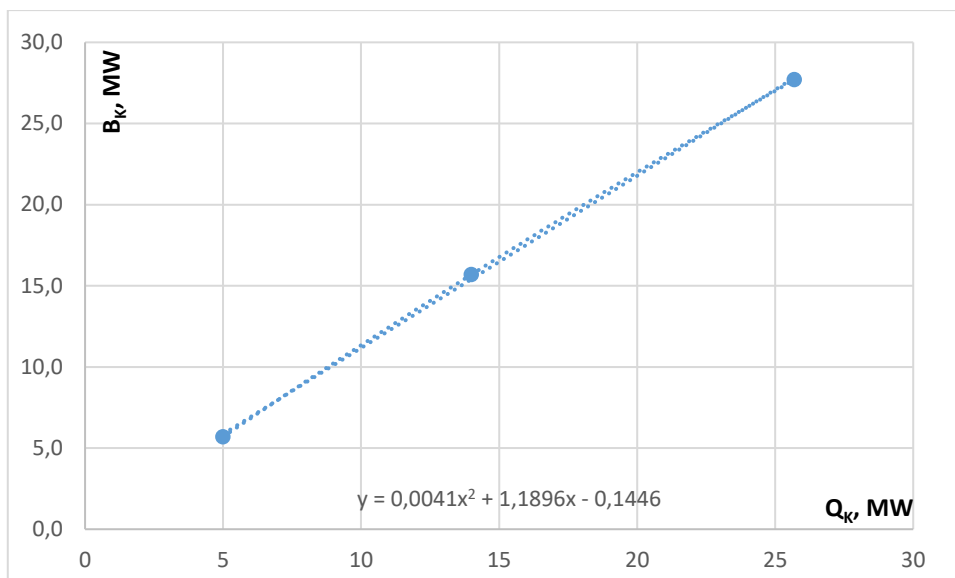
3.2.1 Tallinn 2 aurukatla karakteristikute määramine

Tabel 2. Aurukatla kulukarakteristik

Sisend (MW)	5,7	15,7	27,7
Väljund (MW)	5,0	14,0	25,7



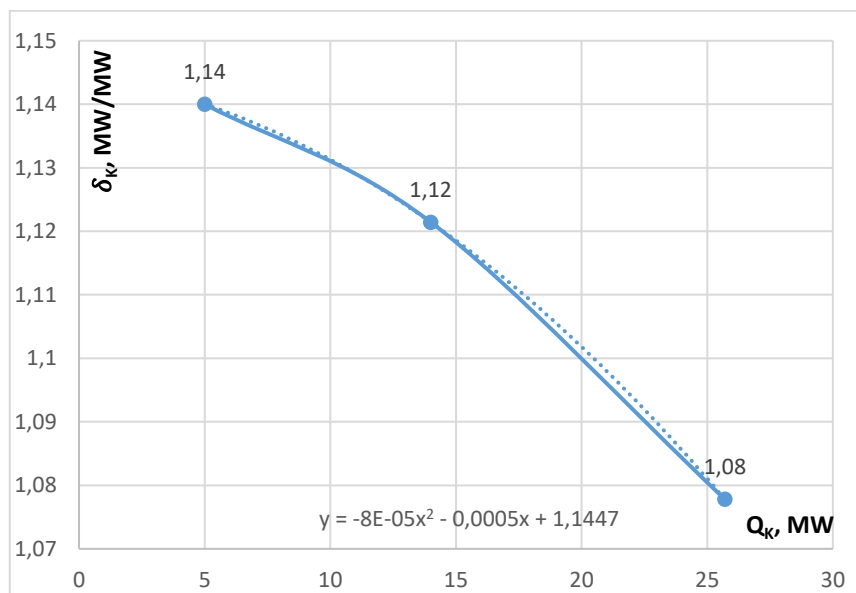
Joonis 8. Tallinn 2 aurukatla kulukarakteristik



Joonis 9. Tallinn 2 aurukatla apromikseeritud kulukarakteristik

Tabel 3. Tallin 2 aurukatla erikulu karakteristik

Sisend (MW)	1,14	1,12	1,08
Väljund (MW)	5	14	25,7



Joonis 9. Tallinn 2 aurukatla erikulu karakteristik

Aurukatla kütuse marginaalkulu karakteristik:

Marginaalkulu ehk kütusekulu suhtelise juurdekasvu karakteristikku saamiseks tuleb võtta apromikseeritud kulukarakteristikust 1. tuletis:

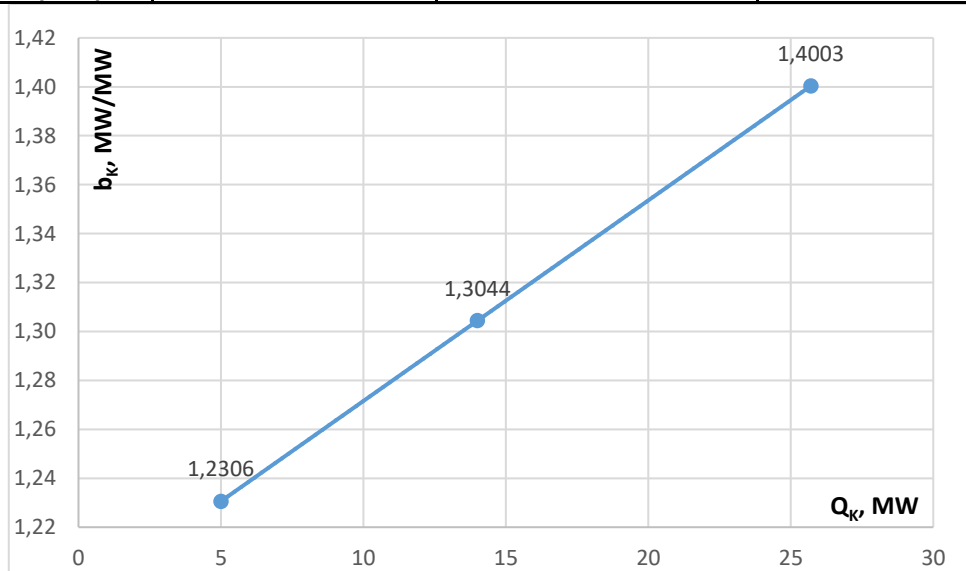
$$F(x) = 0,0041x^2 + 1,1896x - 0,1446$$

millest tuletis on

$$f(x) = 0,0082x + 1,1896$$

Tabel 4. Tallinn 2 aurukatla marginaalkulu karakteristik

Sisend (MW)	1,2306	1,3044	1,4003
Väljund (MW)	5	14	25,7

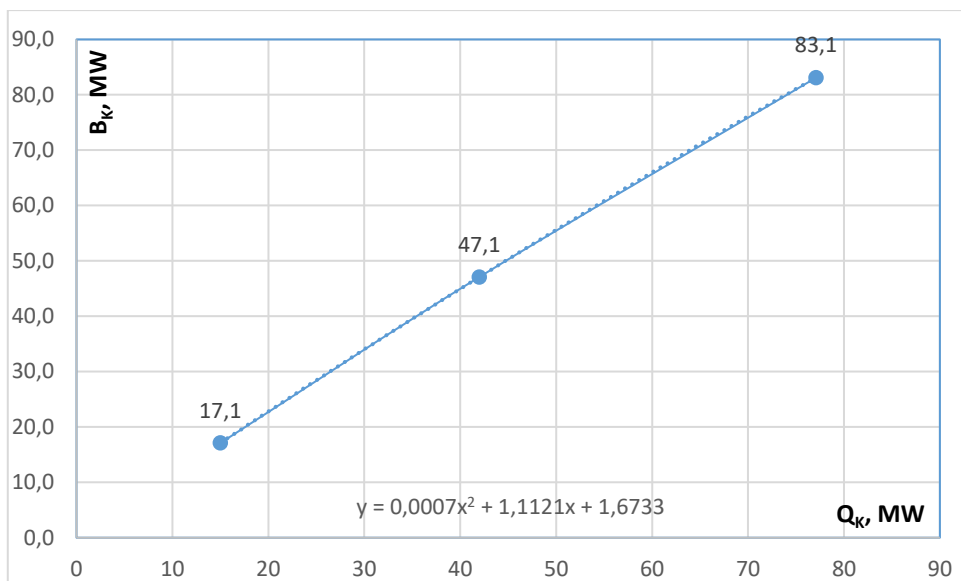


Joonis 10. Tallinn 2 aurukatla marginaalkulu karakteristik

Tallinn 2 koostootmisjaamas on kolm paralleelselt töötavat aurukatelt, mis kõik on oma ehituselt, kasutatava põletustehnoloogia ja võimsuse poolest identsed. Sellest tulenevalt on selle kateldegrupi ekvivalentseid karakteristikud sarnased üksiku katlaga, kuid arvestada tuleb kateldegrupi summaarsete parameetritega.

Tabel 5. Tallinn 2 kateldegrupi ekvivalentne kulukarakteristik

Sisend (MW)	17,1	47,1	83,1
Väljund (MW)	15	42	77,1



Joonis 11. Tallinn 2 kateldegrupi ekvivalentne kulukarakteristik

Tallinn 2 ekvivalentse aurukatla apromikseeritud kulukarakteristikuks saadi 2. astme polünoom

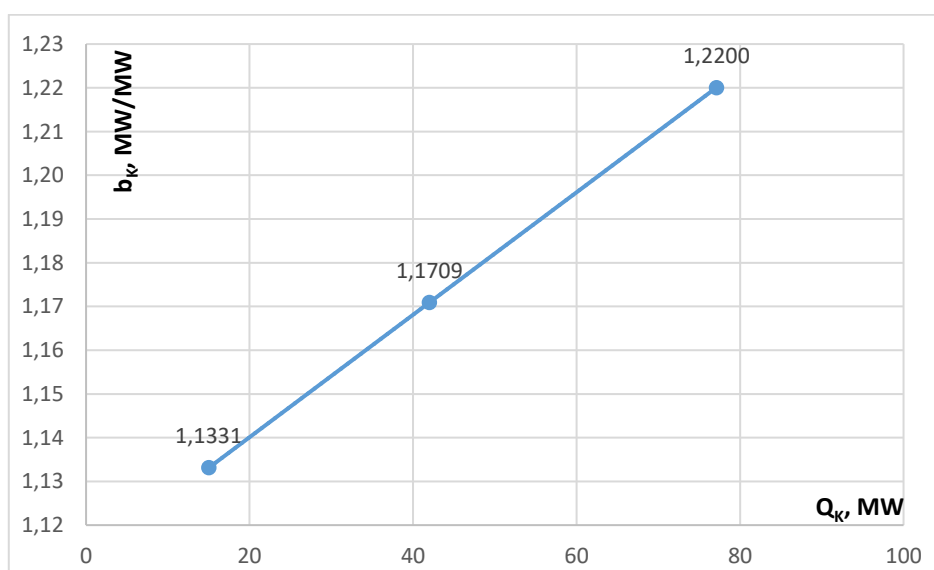
$$F(x) = 0,0007x^2 + 1,1121x + 1,733$$

millest tuletis on

$$f(x) = 0,0014x + 1,1121$$

Tabel 6. Tallinn 2 ekvivalentne marginaalkulu karakteristik

Sisend (MW)	1,1331	1,1709	1,2200
Väljund (MW)	15	42	77,1



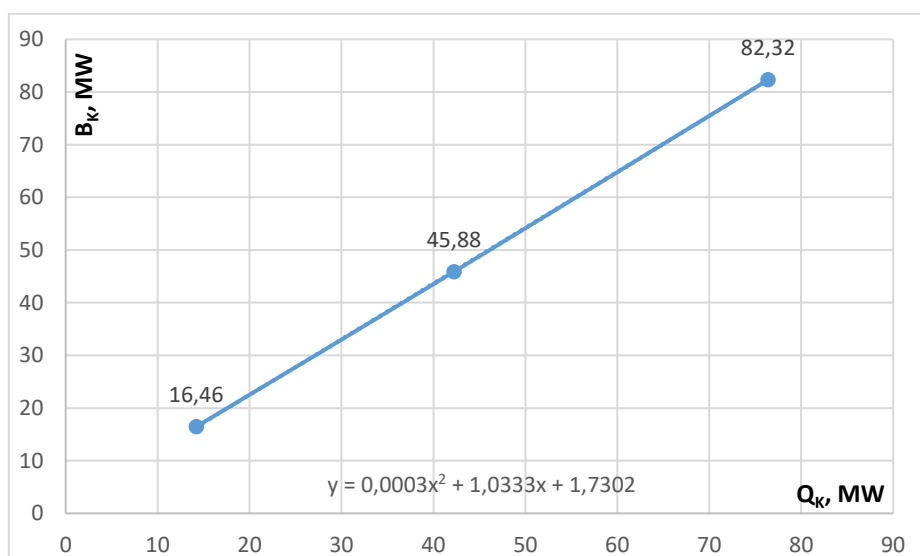
Joonis 12. Tallinn 2 kateldegrupi ekvivalentne marginaalkulu karakteristik

3.2.2 Tallinn 1 aurukatla karakteristikute määramine

Teiseks analüüsitavaks jaamaks on ühe keevkihtkoldega aurukatla Tallinn 1 koostootmisjaam.

Tabel 7. Tallinn 1 aurukatla kulukarakteristik

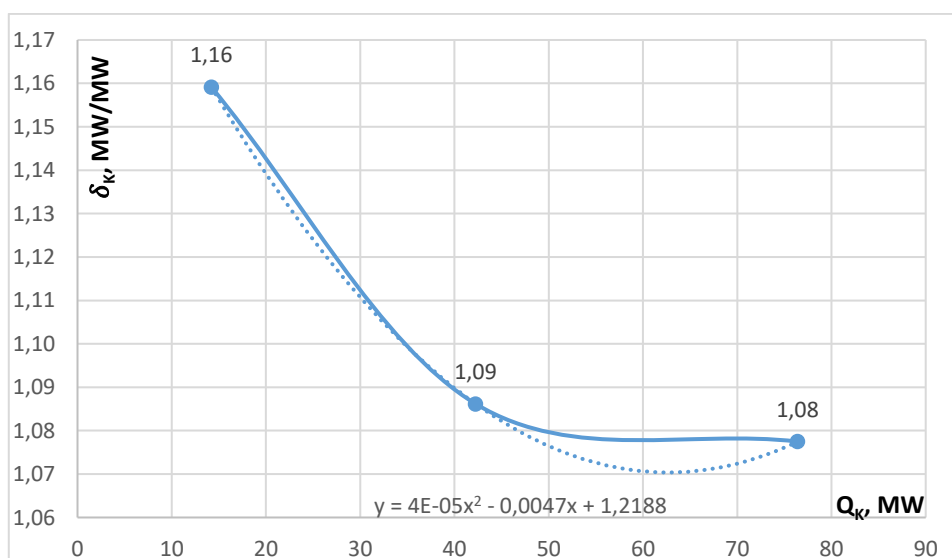
Sisend, MW	16,46	45,88	82,32
Väljund MW	14,2	42,24	76,4



Joonis 9. Tallinn 1 aurukatla apromikseeritud kulukarakteristik

Tabel 8. Tallinn 1 aurukatla erikulu karakteristik

Sisend (MW)	1,16	1,09	1,08
Väljund (MW)	14,2	42,24	76,4



Joonis 9. Tallinn 1 aurukatla erikulu karakteristik

Tallinn 1 jaama aurukatla apromikseeritud kulukarakteristikuks saadi 2. astme polünoom

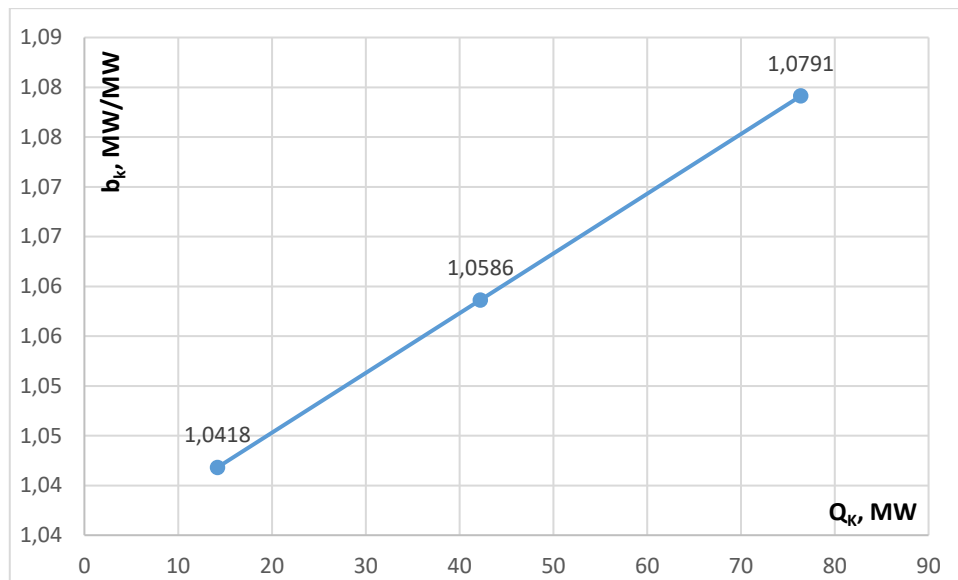
$$F(x) = 0,0003x^2 + 1,0333x + 1,7302$$

millest tuletis on

$$f(x) = 0,0006x + 1,0333$$

Tabel 9. Tallinn 1 aurukatla marginaalkulu karakteristik

Sisend (MW)	1,0418	1,0586	1,0791
Väljund (MW)	14,2	42,24	76,4



Joonis 10. Tallinn 1 aurukatla marginaalkulu karakteristik

3.3 Jaamade vaheline optimaalne kaugkütte koormuste jagunemine

3.3.1. Tallinn 1 ja 2 koostootmisjaamade karakteristikute määramine

Jaamade vahelise optimaalse koormuste jagunemise leidmiseks on vajalik teada koostootmisjaamade kulukarakteristikut ning marginaalkulu karakteristikut, meid huvitab antud juhul põhiliselt marginaalkulu karakteristik, et täita kütuse suhtelise juurdekasvu võrdsuse tingimus.

Koostootmisjaama kulu karakteristikud on turbiini kulu karakteristikud, mille sisendiks on katla väljundvõimsus Q_K ja väljundiks on kaugküttevõrgu soojuskoormus Q_{KK} ehk koostootmisjaama väljundvõimsus Q_{KTJ} . Need karakteristikud leitakse samadel teoreetilistel alustel nagu aurukatelde puhul punktis 3.1.

Tabel 10. Koostootmisjaamade kulukarakteristikud

Tallinn 1 koostootmisjaama kulukarakteristik			
Sisend, MW	14,2	42,24	76,4
Väljund, MW	12,3	38,1	68
Tallinn 2 koostootmisjaama kulukarakteristik			
Sisend, MW	15	42	77,1
Väljund, MW	13,5	38,9	73,2

Tallinn 1 kulukarakteritiku aproksimeerimisel 2. astme polünoomiga saadi võrrand

$$F(x) = 0,001x^2 + 1,0365x + 1,3003$$

ja sellest tuletis

$$f(x) = 0,002x + 1,0365$$

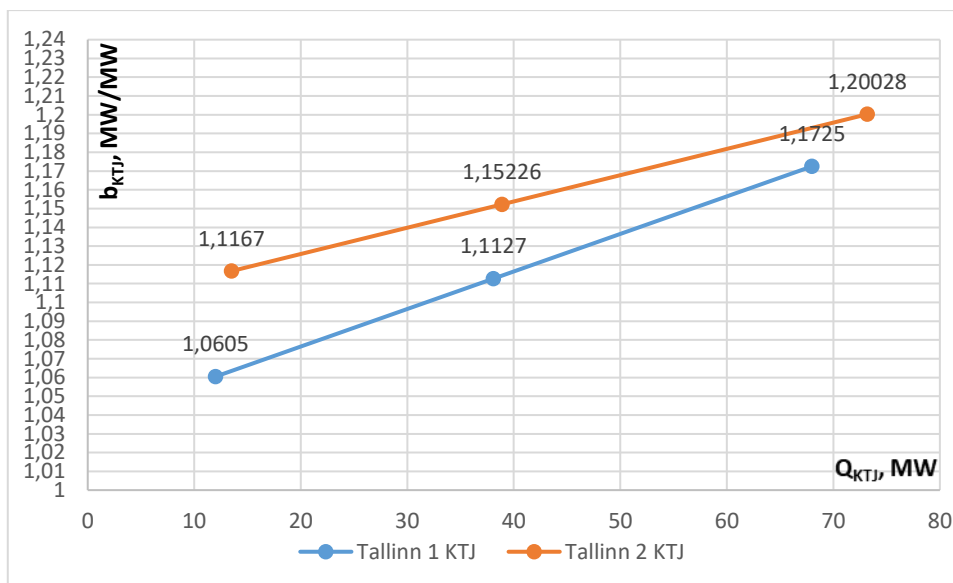
Tallinn 2 kulukarakteritiku aproksimeerimisel 2. astme polünoomiga saadi võrrand

$$F(x) = 0,0007x^2 + 1,0978x + 0,3007$$

ja sellest tuletis

$$f(x) = 0,0014x + 1,0978$$

Nende põhjal leiame, samamoodi nagu aurukatla puhul, koostootmisjaamade marginaalkulu karakteristikud, mis on esitatud selguse huvides ühisel joonisel 11.



Joonis 11. Tallinn 1 ja 2 koostootmisjaamade marginaalkulu karakteristikud.

3.3.2 Jaamade vaheline optimaalne kaugkütte koormuste jagunemine

Järgnevalt leiame koostootmisjaamade vahelise optimaalse koormuse jaotuse erinevate valitud marginaalkulude μ korral. Jättes meelde, et igal hetkel peab olema tagatud kütuse suhtelise juurdekasvu võrdsuse printsiip ehk $b_{KTJ1} = b_{KTJ2} = \mu$, vastavad väärtused on leitavad ka jooniselt 11.

Järgnevalt on optimaalkoormuste tingimuste ja valemite 17-20 alusel teostatud excelis arvutused ning koondatud tabelisse 11:

Tabel 11. Koostootmisjaamade optimaalkoormuste diagramm

μ	$Q_{KTJ\Sigma}$, MW	Q_{KTJ1} , MW	Q_{KTJ2} , MW	B_{KTJ1} , MW	B_{KTJ2} , MW
1,15	94,04	56,75	37,29	63,34	42,21
1,163	109,82	63,25	46,57	70,86	52,94
1,169	117,1	66,25	50,85	74,36	57,93

Nagu eelnevast tabelist 11 selgub, optimaalses talitluses koormatakse koostootmisjaamu vastvalt nende marginaalkulu kasvule ehk suurema osa soojuskoormusest võtab enda kanda Tallinn 1 jaam, sest selle marginaalkulu on madalam ning väiksema koormuse osa katab Tallinn 2 jaam. Nii saavutatakse maksimaalne kütuse sääst ja jaama kasumlikkus.

KOKKUVÕTE

Koostootmisjaamad on soojuselektrijaamade üks liik, kus põhilisteks agregaatideks on aurukatlad ja koostootmisturbiinid (vaheltvõttudega või vasturõhuturbiin). Koostootmisjaama esmaseks eesmärgiks on tarbijate varustamine soojusenergiaga kuuma vee või auruna kaugküttevõrgus. Elektrienergiat toodetakse koostootmisjaamades kõrvalproduktina ning seetõttu töötavad koostootmisjaamad üldiselt soojuse vajaduse järgi ning toodetud elektrienergia aitab katta energiasüsteemi baasosa. Koostootmine on direktiivi 2004/8/EC alusel kasulik, kui kasutusel oleva tehnoloogiaga ning kütusega saavutatakse üldkasutegur üle 75% ning kütuse sääst on 10% võrreldes soojuse ja elektri lahus tootmisega.

Tänapäevased koostootmisjaamad võimaldavad 90% kasutegureid olles palju paindlikumad, kasutades taastuvatel allikatel põhinevaid kütuseid nagu hakkpuit ja seejuures vähendades heitgaaside hulka märgatavalt võrreldes fossiilsete kütuste põletamisega. Seetõttu on koostootmine majanduslikult ja energiatõhususe poolest kindlasti põhjendatud ning edendatav Euroopa Liidu ja Eesti poolt ka tulevikus.

Käesoleva bakalaureusetöö põhieesmärgiks oli leida optimaalne koormusjaotus kahe samas kaugküttesõlmes talitleva hüpoteetilise koostootmisjaama Tallinn 1 ja Tallinn 2 vahel, mille sisend ja väljund parameetrid on analoogsed realselt eksisteerivate jaamadega. Optimaalse koormusjaotusega tagatakse kaugküttesõlmes olevate jaamade kütuse kulu minimeerimine ning maksimaalne kasum.

Koostootmisjaamade vahelise optimaalse koormusjaotuse leidmiseks teostati järgmised etapid:

- Määrati marginaalkulu, erikulu ja kulukarakteristikute funktsioonid
- Määrati karakteristikute ruutpolünoomiga aproksimeerimise funktsioon
- Määrati optimaalse kaugkütte koormusjaotuse tingimused ja funktsioon

Seejärel viidi nende etappide järgi läbi arvutusülesanne Tallinn 1 ja Tallinn 2 koostootmisjaama kohta ning leiti kolme erineva summaarse soojuskoormuse korral selle optimaalne jaotus jaamade vahel ning minimaalne kütusekulu. Selgus, et Tallinn 1 jaama marginaalkulu, mis näitab palju muutub kütusekulu, kui jaama koormust suurendada ühe ühiku võrra, on väiksem kui Tallinn 2 jaamal. Sellest tulenevalt langes 56-60% soojuskoormusest Tallinn 1 jaamale ning ülejäänud Tallinn 2 jaamale.

Kasutatud algandmete põhjal saadud agregaatide ja koostootmisjaamade karakteristikud ning soojuskoormuste jaotused on realistlikud. Need vastavad

teoreetilistele ootustele ning varasemalt teostatud optimeerimisülesannetes saadud tulemustele ning töö eesmärgi saab lugeda teostatuks.

Käesolevat bakalaureusetöö alusel saaks jätkata kogu Tallinna kaugküttevõrgus olevate koostootmisjaamade, ehk arvestades ka Iru prükipõletusjaama, vahelist optimaalse koormusjaotuse ülesannet ning võimaluse korral teostada kogu ülesanne jaamadest saadud ajakohaste katseandmetega.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] M. Valdma, H. Tammoja, M. Keel, Soojuselektrijaamade talitluse optimeerimine, 2008.
- [2] A. Siirde, A. Hlebnikov, Kiviõli linna soojusvarustuse arengukava, 2008. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.riigiteataja.ee/aktilisa/4280/8201/2045/19052009_m67_lisa2.pdf [12.02.21]
- [3] M. Merimaa, Elektri ja soojuse koostootmisjaama ettevõtte energiavarustus, 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <https://dspace.emu.ee/xmlui/handle/10492/2932> [10.04.2021]
- [4] Ü. Kask, Soojuse ja elektri lokaalne väikekoostootmine, 2016. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.koda.ee/sites/default/files/inline-files/U.Kask_Soojuse_ja_elektri_vaikekoostootmine_STEEEP.pdf [24.02.21]
- [5] MKM, Energiamaajanduse arengukava aastani 2030, 2017. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.mkm.ee/sites/default/files/enmak_2030.pdf [24.02.21]
- [6] Soojuse- ja elektrienergia koostoomine keskkonnahoidliku riigihanke tooteleht. [Võrgumaterjal]. Available: <https://ec.europa.eu/environment/gpp/pdf/criteria/chp/et.pdf> [26.02.21]
- [7] Eesti Taastuvenegia Koda, Taastuvenegia Aastaraamat, 2019. [Võrgumaterjal]. Available: http://www.taastuvenegergeetika.ee/wp-content/uploads/2020/10/ETEK_aastaraamat_A4_2019_veeb.pdf [03.03.21]
- [8] Statistikaamet, KE035: Koostootmisjaamades kasutatud kütus, 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <http://andmebaas.stat.ee/Index.aspx?lang=et&DataSetCode=KE035> [06.03.21]
- [9] Eesti Energia, Elekter ja soojus jäätmetest. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.energia.ee/documents/10187/15087/elekter_ja_soojus_jaatmetest_a4_est.pdf [10.03.21]
- [10] A. Paist, Katlatehnika, 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <https://manualzz.com/doc/12646559/katlatehnika> [18.04.21]
- [11] V.Vares, Ü. Kask, P. Muiste, T. Pihu, S. Soosaar, Biokütuse kasutaja käsiraamat, 2005. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.digar.ee/arhiiv/nlib-digar:261542> [18.04.21]
- [12] C. Eiche, Lokaalse koostootmisjaama toodangu modelleerimine ja majanduslik analüüs Ülemiste City näitel, 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://digikogu.taltech.ee/en/Download/3c12de33-0b7d-4672-9da8-7cf3fbeeda0b> [18.04.21]
- [13] Урин В.Д., Кутлер П.П. Энергетические характеристики для оптимизации режима электростанций и энергосистем, Москва, 1974.
- [14] A. Gussev, Utilitas Tallinna Elektri jaama ja elektri jaama talitluse analüüs. [Võrgumaterjal]. Available: <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/7d37e661-641a-4af7-9ac2-59b1e68483da> [31.05.21]

[15] J. Zenin, Eesti Elektriijaama talitluse analüüs, 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://digikogu.taltech.ee/en/Item/0296d656-f2e7-400f-8667-ced6ec76bb3a> [31.05.21]

[16] EPA, Combined Heat and Power (CHP) Partnership. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.epa.gov/chp/chp-benefits> [12.02.21]