

Energiatehnoloogia instituut

**SOOJUSSLALVESTI KASUTAMINE MUSTAMÄE  
KOOSTOOMISJAAMAS**

**USE OF HEAT STORAGE AT MUSTAMÄE CHP PLANT**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Oskar Imre Saik

Üliõpilaskood 206172 EACB

Juhendaja: Igor Krupenski, vanemlektor

Tallinn 2023

# 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.

“30” mai 2023

Autor: Oskar Imre Saik

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab bakalaureusetööle esitatud nõuetele

“30” mai 2023

Juhendaja: Igor Krupenski

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

“.....” mai 2023

Kaitsmiskomisjoni esimees: Oliver Järvik

/ allkirjastatud digitaalselt /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina, Oskar Imre Saik sünd. 30.01.2000

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Soojussalvesti kasutamise Mustamäe koostootmisjaamas,

mille juhendaja on Igor Krupenski,

- 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.

---

<sup>1</sup>*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

/ allkirjastatud digitaalselt /

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Oskar Imre Saik, 206172 (nimi, üliõpilaskood)  
Õppekava, peeriala: EACB, Keskkonna-, Keemia-, ja energiatehnoloogia  
Juhendaja(d): Igor Krupenski

**Lõputöö teema:**

(eesti keeles) SOOJUSSALVESTI KASUTAMINE MUSTAMÄE KOOSTOOMISJAAMAS

(inglise keeles) USE OF HEAT STORAGE AT MUSTAMÄE CHP PLANT

**Lõputöö põhieesmärgid:**

1. Koostootmise, kaugkütte ja soojuste salvestamine lühituvustamine
2. Mustamäe KTJ ja soojussalvesti tehnoloogia koosmõju hindamine
3. Soojuse salvestamise tehnoloogia ettepaneku sõnastamine Mustamäe KTJ jaoks

**Lõputöö etapid ja ajakava:**

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Töö struktuuri sõnastamine	04.03.23
2.	Töö ülevaatus ja statistiliste andmete kogumine	12.04.23
3.	Lõputöö esitamine	30.05.23

**Töö keel:** eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 04.06. 2023a

**Üliõpilane:** Oskar Imre Saik ".....".....202....a

/ allkirjastatud digitaalselt /

**Juhendaja:** Igor Krupenski ".....".....202....a

/ allkirjastatud digitaalselt /

**Programmijuht:** O. Järvik ".....".....202....a

/ allkirjastatud digitaalselt /

# SISUKORD

EESSÕNA .....	6
LÜHENDTE JA TÄHISTE LOETELU .....	7
SISSEJUHATUS .....	8
1. KOOSTOOMISJAAM .....	9
1.1 SEJ ja KTJ iseloomustus .....	9
1.2 KTJ eelised.....	11
1.3 Jahutid ja gradiirid .....	11
1.4 Toodetava elektri- ja soojusenergia tootmise toetamine .....	14
2. MUSTAMÄE KTJ ISELOOMUSTUS.....	16
2.1 Tallinna ühtne kaugküttevõrk .....	16
2.2 Kasutatavad kütuseallikad .....	17
2.3 Väljundvõimsused ja tööparameetrid .....	18
3. SOOJUSE SALVESTAMINE .....	20
3.1 Soojussalvestite liike .....	20
3.1.1 Faasimuutuseta soojuse salvestamine.....	20
3.1.2 Faasimuutuse ehk latentse soojusega soojuse salvestamine .....	22
3.1.3 Termokeemiline soojuse salvestamine .....	23
3.1.4 Soojuse salvestamise rakendusi .....	24
3.2 Soojuse salvestamise rakendamine kaugküttevõrgus ja koostootmises .....	25
3.3 Vaatlusaluse soojuse salvestamise tehnoloogia valiku põhjendus .....	26
4. SOOJUSE SALVESTAMISE HINDAMISE METOODIKA JA TULEMUSED .....	30
4.1 Sisendamete kirjeldus .....	30
4.2 Arvutuskäigu kirjeldus .....	30
4.2.1 Inseneritehniline arvutus .....	30
4.2.2 Majanduslik arvutus.....	32
4.3 Tulemused .....	33
KOKKUVÕTE .....	34
SUMMARY.....	35
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	36

## **EESSÕNA**

Töö autor leidis sobiva bakalaureusetaseme lõputöö teema juhendaja, Igor Krupenski, soovitusel. Töö koostamine andis ülevaate nii üldhariduslikest alustest millel põhineb energeetika õpe kui ka erialalistest teadmistest.

Töö autor soovib tänada juhendajat meeldiva koostöö ja asjakohaste suuniste eest. Kaugküte, koostootmine, soojuse salvestamine, soojussalvesti, bakalaureusetöö.

## LÜHENDTE JA TÄHISTE LOETELU

KTJ- Koostootmisjaam.

SEJ- Soojuselektrijaam.

Nm<sup>3</sup>- Normaalruumala, gaasi ruumala 25°C ja 1 atm rõhu juures.

MW- Megavatt ehk 1000000 vatti.

MWth- Soojuslik megavatt ehk soojusvõimsus megavattides.

GW- Gigavatt ehk 1000 megavatti.

MWh- Megavatt-tund ehk energia mida tarbib või toodab 1 megavatt võimsusel töötav seade ühe tunni jooksul.

GWh- Gigavatt-tund ehk 1000 megavatt-tundi.

t- tonn, 1000 kg.

m<sup>3</sup>- kuupmeeter.

## SISSEJUHATUS

Soojussvarustuse tagamine Tallinna linnas on suures ulatuses lahendatud koostoomise abil. Tallinna linnas on mitmeid erinevaid kaugküttevõrke, mis jagunevad kaugkütte võrgupiirkondadeks. Võrgupiirkonnad on: kesklinn, Põhja-Tallinn, Nõmme linnaosa, Pirita Linnaosa ja Järve keskus. Lisaks eelmainituile on ka nn „ühtne Tallinna võrgupiirkond“, mida varustab soojusenergiaga vaatlusalune Mustamäe KTJ. [1] Koostootmine on väga efektiivne viis energiakandjatest energia eraldamiseks. Küll aga on koostootmisjaamade puhul toodetav elektrienergia juhitav vähesel hulgal (10-15% nimivõimsusest), on ka süsteemi kaudu genereeritav elektriline võimsus ei olegi juhitav. [2] St. KTJ puhul ei ole võimalik toota meelevaldselt valitud hulka soojus- või elektrienergiat. Vähesel küttekoormusega perioodidel ei ole otstarbekas toota kaugküttevõrku soojusvõimsust jaama näidatud nimivõimsuse ulatuses, otstarbekas aga oleks toota elektrivõimsust. Hetkel lahendatakse antud probleem liigse soojusenergia väljutamisega atmosfääri jahutite abil. Elektritootmisel ülejääv soojus tuleks aga kasutada ära otstarbekalt või salvestada hilisemaks tarbimiseks.

Käesoleva töö eesmärgiks on hinnata Mustamäe koostootmisjaamale kavandatava soojussalvestustehnoloogia majanduslikku ja tehnilist perspektiivikut. Töö raames tutvustatakse ja analüüsitakse lühidalt erinevaid soojussalvestamise võimalusi ja valitakse eksperthinnangutele ning kirjandusele toetudes perspektiivikaim soojussalvestamise tehnoloogia. Samuti analüüsitakse töö raames Mustamäe KTJ soojuskoormust ning tehakse esmased järeldused soojussalvestamise tehnoloogia valikuga edasiminekuks või antakse soovitus tehnoloogia juurutamise edasi arendamiseks.

Teema valik on aktuaalne kuna 2023 aastal valitsev energiaturu seisund näitab selgelt vajadust leidmaks efektiivsemaid viise kuidas juhtida olemasolevat energiatootmist. Era ja avaliku sektori lõikes on vähe initsiatiivi tagada Eesti elektrivõrgu reguleerimisvõimsuse säilimine ja kasv kliimaaeesmärke kaaludes. Soojussalvestamine võimaldaks koostootmisjaamadel toimida suurematel koormustel rahuldades ka elektrienergia baaskoormust elektrivõrgus.

Koostootmist ja soojussalvestamist on ka TalTechi inseneriteaduskonna lõputöodes käsitletud mitmetel kordadel. Küll aga pole vaadeldud koostootmist ja soojussalvestamist just Mustamäe KTJ piiratud mastaabis. Eesmärk on süveneda ühe toomisüksuse eripäradesse ja tuua välja töö käik KTJ soojussalvestamise juurutamiseks.



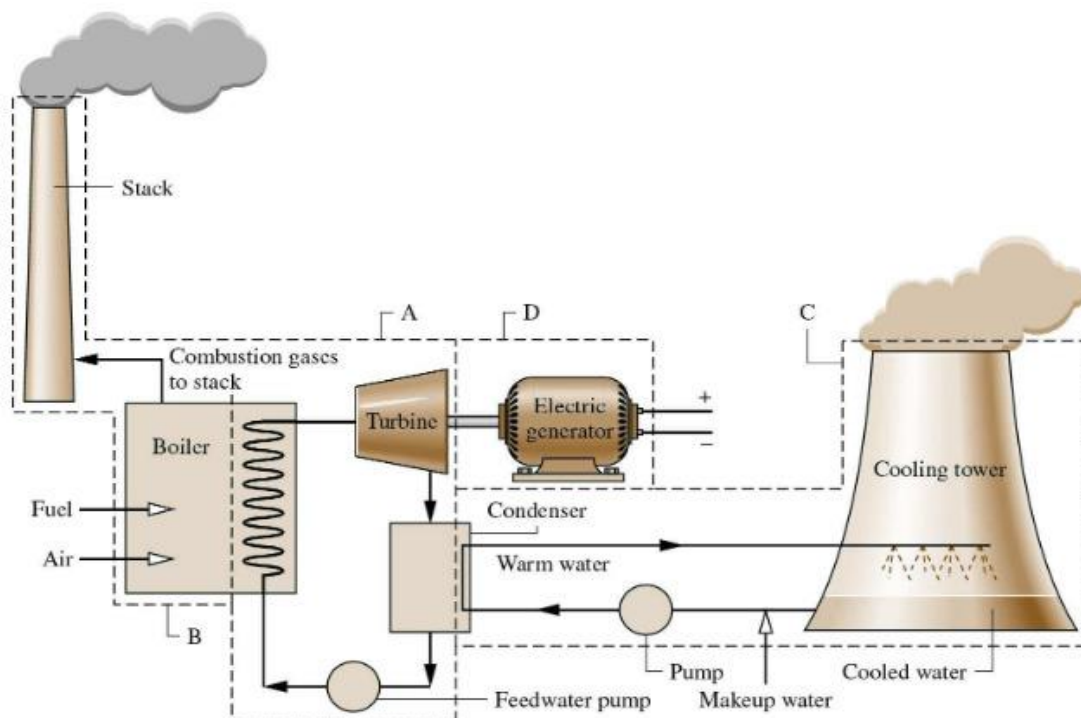
# 1. KOOSTOOMISJAAM

Tänapäeval on võimalik elektri- ja soojusenergiat toota mitmetel erinevatel viisidel. Lisaks traditsioonilisele põlemisprotsessidel põhinevatele soojuselektrijaamale on võimalikud ka päikese-, tuule- ja tuumaelektrijaamad. Kusjuures ka tuumaelektrijaam on definitsiooni poolest soojuselektrijaam. Lisaks antud valikutele on võimalik ka koostootmisjaam, lühendatult KTJ. Koostootmisjaamas kasutatakse ära heitesoojus, et varustada soojusenergiaga eratarbijaid. Teiste tehnoloogiate puhul väljutatakse heitesoojus atmosfääri.

## 1.1 SEJ ja KTJ iseloomustus

Tänapäeval toodetakse Eestis tarbitav elektrienergia peamiselt soojuselektrijaamade (SEJ) abil. Soojus Soojuselektrijaama tööpõhimõte on lihtsustatult järgnev. Soojuselektrijaama on paigaldatud katel või põletuskamber kuhu juhitakse energiakandja. Eesti puhul on energiakandjateks peamiselt puiduhakke, olmeprügi, põlevkiviõli, põlevkivi utegaas ning maagaas.

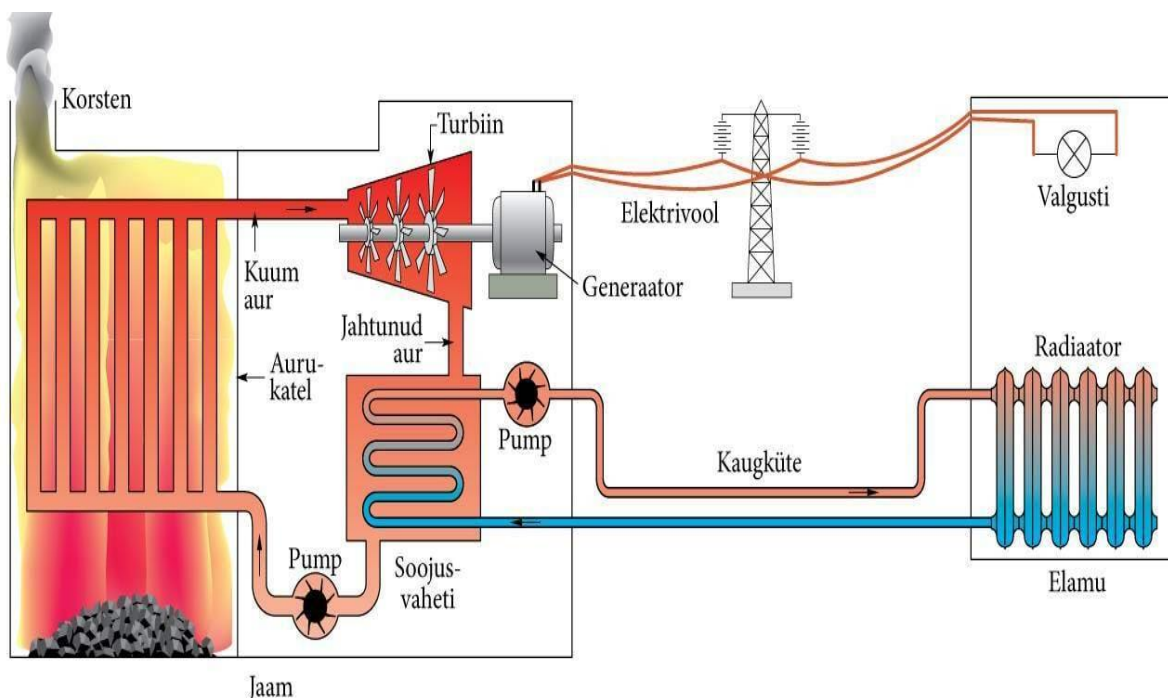
Joonis 1.1 Soojuselektrijaama põhimõtteline skeem [3]



Energiakandjast eraldatakse põletamise teel sisalduv energia, mis eraldub soojusena. Antud soojus juhitakse katlasse, kus soojeneb selles sisalduv soojuskandja, üldjuhul on soojuskandjaks töödeldud vesi. Antud soojuskandja aurustub ning aur juhitakse läbi turbiini, mis hakkab tänu auru läbikandele pöörlema. Turbiini ajamisega on ühendatud völli mis on omakorda ühendatud elektrigeneraatoriga. Nimetatud generaator hakkab pöörlemise mõjul tekitama elektrienergiat, mida saab juhtida elektrivõrku. Turbiinist väljuv aur tuleb juhtida kondensaatorisse, et muuta aur taas vedelasse faasi. Kondensaatorist juhitakse vesi edasi gradiiri või jahutisse, et see jahutada sobivale temperatuurile ning juhtida tagasi katlasse taas aurustamiseks. [3]

Koostoomise puhul on üldine tööpõhimõte vägagi sarnane. Peamine erinevus seisneb selles mida tehakse turbiinist väljunud arufaasis soojuskandjaga. Soojuskandja juhitakse gradiiri asemel soojusvahetisse kus antakse üle soojus kaugküttevõrgu soojuskandjale. Soojusvahetisesse võib juhtida nii auru kui ka kondenseeritud vett sõltuvalt jaamas valitud tehnoloogiast. Kondenseeritud vee puhul tuleb aur viia enne kondensaatorisse, kus aur läheb üle vedelale faasile. Tallinna ühtse kaugkütte piirkonna puhul on soojuskandjaks vesi. Kaugküttevõrgu abil juhitakse soojus tarbijateni elamispindade ja tarbevee kütmiseks. [1]

Joonis 1.2 Koostootmisjaama lihtsustatud skeem [4]



Eestis on elektritootmise lõikes koostootmise osakaal võrdlemisi madal, aastal 2020 oli see näitaja 27,7%. See on arvestatavalt vähem kui meie naaberriigid Läti, Leedu ja

Soome. Selle nähtuse põhjenduseks on mitmeid asjaolusid, kuid peamine neist on tõsiasi, et koostootmise juurutamine vajab piisavalt soojusenergia koormust. Tavaliselt pakub sellist koormust kaugküttevõrk. Kuna Eestis on kaugküttevõrke vähesel hulgal ning nende soojusenergia koormused on madalad siis on keerukas luua juurde uusi suuri koostootmisjaamu.[1]

## 1.2 KTJ eelised

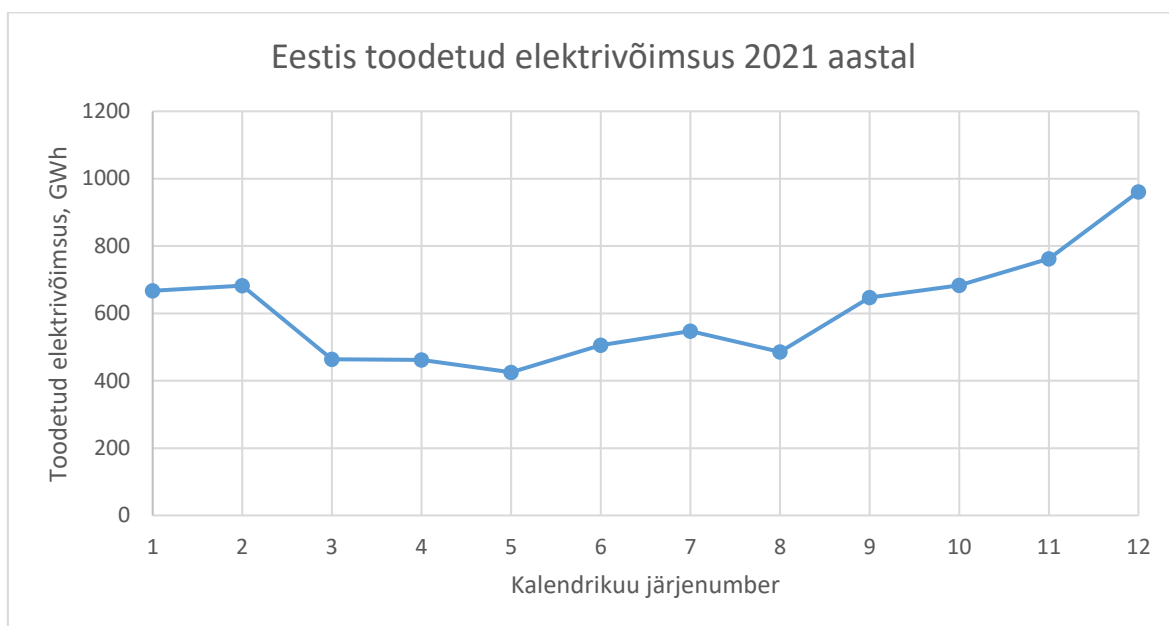
Kaasaegse koostootmisjaama kombineeritud kasutegur võib küündida 90-95%-ni. [2] Seevastu aga on Eestis toimivate SEJ ja ka KTJ elektriturbiinide soojuslikud kasutegurid vahemikus 38-43%. [5] Kasuteguri suurenemine KTJ puhul tuleneb katla ja turbiinijami soojuskandjas leiduva energia täis mahus tarbimisest. Soojust ei lasta gradiiri või jahuti abil atmosfääri. Sellele lisaks on võimekus kasutada KTJ puhul suuremal mahul nn. „ökonomaisereid“, mis eraldavad katla suitsugaasidest jääksoojuse ja juhivad selle kaugküttevõrku. Samuti saab jääksoojust tarbida kütuse eelsoojendamiseks. On leitud, et KTJ, mis toimib ca 4500 tundi aastas võib näha tootmiskulude langust 20 – 30% võrreldes traditsioonilise soojuselektrijaamaga [1],[2] Koostootmise peamisteks eelisteks võib lugeda väiksemat primaarenergia kulu, madalamad heitmed ja ka majandusliku tasuvust.[1]

## 1.3 Jahutid ja gradiirid

Kuna on teada, et Eestis on kütteperiood üldiselt ca 8 kalendrikuud võib järeldada, et kaugküttevõrgu tarbimiskoormused ei ole aastaringselt võrdsed. Küll aga püsib elektrienergia nõudlus eesti turul aastaringselt stabiilsem. Antud asjaolu tõendavad ka elektri- ja soojusenergia tootmise statistilised näitajad.

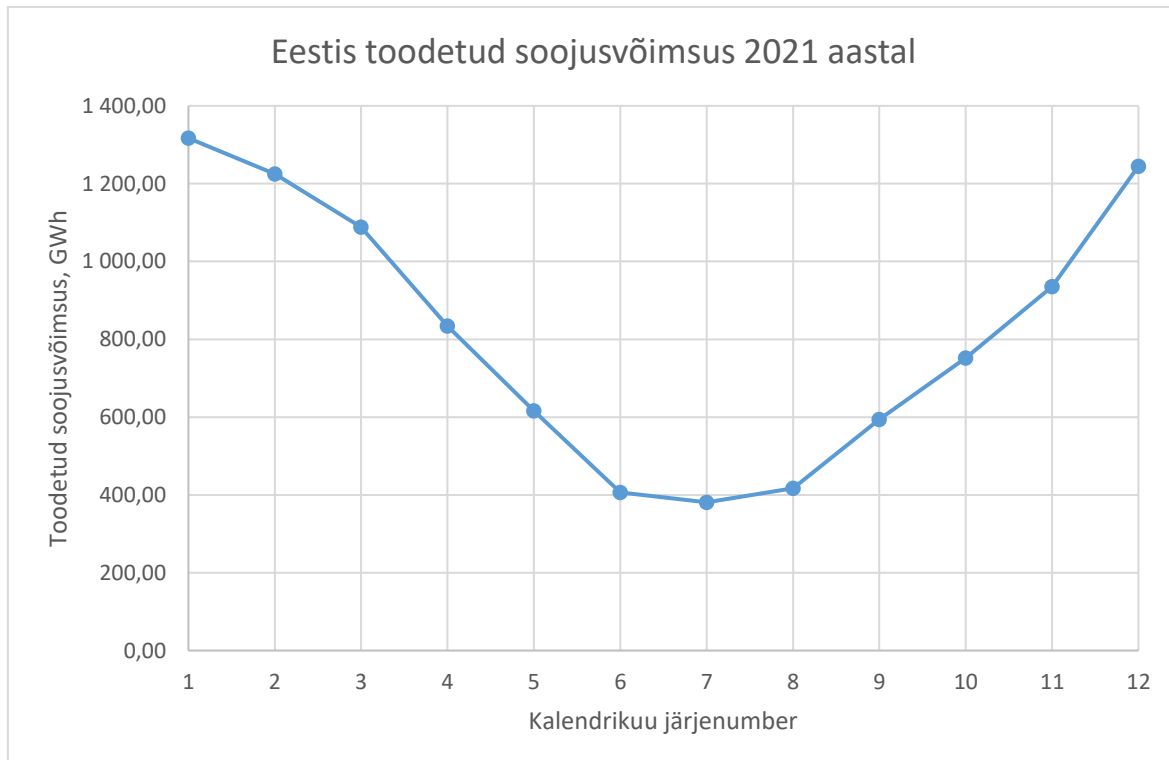
Graafikul 1.1 on toodud elektrienergia tootmine GWh kalendrikuude lõikes ja graafikul 2.2 on toodud soojusenergia tootmine GWh kalendrikuude lõikes 2021 aastal.

Graafik 1.1 Eestis toodetud elektrivõimsus 2021. aastal [6]



Graafikult 1.1 nähtub, et tulenevalt elektrikütte tarbimisest ja suuremast võimsuskoormusest teiste elektritarbijate, nt. elektriautode puhul, kasvab talvisel perioodil ka elektritarve, kuid mitte mastaapselt.

Graafik 1.2 Eestis toodetud soojusvõimsus 2021. aastal [6]



Graafikult 1.2 nähtub selgelt, et soojustootmine kahaneb selgelt suvekuudel ning tõuseb taas talvekuudel. Võib leida, et soojusenergia ja elektrienergia tarbevajadus ei ole otseses seoses.

Kuna tekib tihti olukordi kus oleks majanduslikult mõistlik toota koostoomisjaamas elektrienergiat aga soojusenergia jaoks puudub tarbimine, tuleb toodetud soojusenergia jaamast mingil moel väljutada. Soojusenergia väljutamise vajadus tuleneb asjaolust, et jaamas kasutatav soojuskandja tagastuse temperatuur mõjutab otseselt jaama kasutegurit. Mida soojem soojuskandja satub tagasi katlasse aurustamiseks seda vähem kasulikku soojust ta suudab mahutada. Eestis on varasemalt nimetatud probleemi lahendamiseks paigaldatud jahuteid. Jahuti näol on tegemist õhk-vesi soojusvahetiga, kuhu juhitakse KTJ jaama tagastuva vee soojus, et jaam saaks püsida aastaringelt täiskoormusel.

Joonis 1.3 jahutid [7]



Pärnu KTJ juurde on paigaldatud 36,5 MW õhk-vesi jahuteid. Jaamal tootmismahud aastas on keskmiselt 192 GWh elektrit ja 252 GWh soojust. Nähtub, et toodetava soojus- ja elektrienergia suhe on 1,31:1. Tootmisvõimsuse suhtes aga on jaama soojusnimivõimsus 45 MW ja elektrinimivõimsus 24 MW, see annab suhte 1,87:1. Nähtub, et tänu jahutile on võimalik juhtida jaama tootmist väga suures ulatuses.[7]

## 1.4 Toodetava elektri- ja soojusenergia tootmise toetamine

Eestis makstakse toetust koostootmiseseadmega toodetud elektri eesti vastavalt elektrituruseadusele, taastuvenergia toetuskeemi alusel. Soojusenergia tootmisele teadaolevalt toetusi ei ole. Toetust maksab Eesti põhivõrguettevõtte Elering. Kui toodetav elekter on toodetud taastuvast primaarenergia allikast, netovõimsusega kuni 100 MW, siis on võimalik saada toetust. Toetuse suurus on 53,7 eurot/MWh kohta. Toetust makstakse ka biomassist koostoomisel toodetud elektri eest, kui elektrit ei toodeta kondensatsioonirežiimil. Toetust makstakse 12 aastat alates kuupäevast mil tootmine on tunnistatud nõuetekohaseks ja tootja on kinnitanud oma liitumispunkti. Toetust saab taotleda vaid üks kord iga tootmiseseadme kohta. Alates 01.01.2021 rajatud tootmiseseadmetele toetust enam ei maksta. Samuti ei maksta toetust kui elektri hind on börsil negatiivne.[8]

Toetust saab ka nn. „tõhusa koostootmise“ režiimil järgnevatest mittetaastuvatest allikatest: jäätmetest, turbast, põlevkivi uttegaasist või seadmega mille võimsus on vähem kui 10 MW. Toetuse suurus on sel juhul 32 eurot/MWh kohta. Eestis loetakse koostootmine tõhusaks, kui protsessi kasutegur ületab 75-80%, sõltuvalt kasutatavast tehnoloogiast ning arvutuslik primaarenergia sääst ületab 10%. Kusjuures vasturõhuauruturbiini, gaasiturbiini koos utilisaatorkatlaga, sise põlemismootori, mikroturbiini, Stirling-mootori ja kütuseelemendiga koostootmise üldkasutegur peab ületama 75%. Kombineeritud tsükliga gaasiturbiini koos utilisaatorkatlaga ja vaheltvõttudega auruturbiini puhul peab üldkasutegur olema vähemalt 80%.[1], [8]

Primaarenergia sääst arvutatakse järgnevalt:

$$PES = \left[ 1 - \frac{1}{\frac{CHPH_{\eta}}{REFH_{\eta}} + \frac{CHPE_{\eta}}{REFE_{\eta}}} \right] \cdot 100\%, \quad (1.1)$$

Kus PES - primaarenergia sääst,

CHPH<sub>η</sub> - kasuliku soojuse kasutegur (viimase 12 kuu kasuliku soojuse toodang jagatud kütuseenergiaga, mis kulus kasuliku soojuse ja elektri koostootmiseks),

REFH<sub>η</sub> - soojuse eraldi tootmise viiteväärtus,

CHPE $\eta$  - koostoodetud elektrienergia kasutegur (koostoodetud elektrienergia viimase 12 kuu kogus jagatud kütuseenergiaga, mis kulus kasuliku soojuse ja elektri koostootmiseks),

REFE $\eta$  on elektrienergia eraldi tootmise viiteväärtus.[9]

02.03.2023 kuulutas Majandus- ja kommunikatsiooniministeerium välja uue toetusskeemi: taastuvelektri vähempakkumine. Vähempakkumise käigus pakuvad taastuvatest allikatest elektrienergia tootjad summa, mida vajatakse, et tagada elektritootmine. Nimetatud summa ei tohi ületada 45 eurot/MWh. Võidavad madalaimad pakkumised eurot/MWh kohta. Kui turuhind langeb alla võitva pakkumisega määratud hindluse kompenseerib riik elektrienergia tootmise kuni 20 eurot/MWh kohta. Nimetatud vähempakkumisi on korraldatud ka varem, kokku 555 GWh ulatuses. Käesoleva vähempakkumisega on riigil eesmärgiks tagada 650 GWh jagu taastuvelektrit. Kusjuures vähemalt pool taastuvelektritoodangust peab olema tagatud aasta esimesel või neljandal kvartalil. Samuti saab osaleda kas taastuvelektri tootmiseseadmega või olemasoleva tootmiseseadme juurde rajatud uue elektripaigaldisega, mis alustab tööd pärast vähempakkumise võitja väljaselgitamist. Lisaks peavad pakkumisel osalejad nõustuma tagatisega 12 eurot/MWh kohta, et tagada tootmiseseadme liitumine elektrivõrguga lubatud ajal.[10]

## **2.MUSTAMÄE KTJ ISELOOMUSTUS**

Eelnevates peatükkides mainitud toetuste ja Eesti energiamajanduse arengukava tingimuste koosmõjul innustati biomassil toimivate koostootmisjaamade ehitust. 2020. aastaks seati eesmärk toota 20% Eestis tarbitavast elektrienergiast koostootmise toel. Ka Mustamäe koostootmisjaama üksuse ehitust innustas nimetatud toetsuskeem. Mustamäe KTJ avati täismahul käitamiseks 05.11.2019.[11]

### **2.1 Tallinna ühtne kaugküttevõrk**

Tallinna ühtne kaugküttevõrgupiirkond rahuldab ligi 4000 tarbijat, enamus neist asub Tallinna linna läänepiirkonnas. Tallinna linna läänepiirkonda hõlmavad Kristiine, Mustamäe ja Õismäe linnaosad, kus asub ligi 1600 tarbijat, kelle aastane soojusenergia tarbimine on ligikaudu 676 GWh.[1]

Mustamäe koostootmisjaam varustab nimetatud võrgupiirkonda ligikaudu 47 MW soojusvõimsusega ja pakub elektrivõrku 10 MW elektrilist võimsust. Kusjuures ligikaudu 40 MW soojusenergia võimsusest tuleneb kateldest ja ca 9 MW suitsugaaside kondenseerimisest. Lisaks, on võimalik üheaegselt toota kas: 10 MW elektrit + 28,8MW soojusenergiat või ainult 38,8 MW soojusenergiat + 9 MW soojust suitsugaaside kondenseerimisest. Lisaks koostootmisüksusele on mustamäe KTJ territooriumil ka maagaasikatlad, ning põlevkiviõlil, kergel kütteõlil või diislil toimivad katlad, mille kombineeritud soojusvõimsus on ligikaudu 170 MW. Lisaks asub territooriumil ka mitte käitatav katel mille soojusvõimsus on 116 MW. Nimetatud katlad on paigaldatud baas ja tipukoormuste rahuldamiseks, ning jaama omatarbeks.[12]



Joonis 2.1 Mustamäe koostootmisjaama hoone [13]



## 2.2 Kasutatavad kütuseallikad

Mustamäe KTJ tarbib koostootmisüksustes biomassi, mille moodustab puiduhake. Teatavasti on biomass taastuenergia allikas, millel kokkuleppeliselt CO<sub>2</sub> heide puudub. Biomassi kasutamisel kütusena Samuti on võimalik koostootmiskateldes vajaduspõhiselt tarbida ka maagaasi. Territooriumile paigaldatud lisakatelde kütuseallikateks on maagaas, kerge kütteõli, põlevkiviõli või diislikütus. Kusjuures põlevkiviõli ja diislikütuse kasutamine on lubatud vaid erandkorras, kui teiste kütuseallikatega pole võimalik rahuldada soojusvõimsuse koormust.[12]

Maksimaalselt on kütuseallikate planeeritud tarbimised järgnevad: 150838,858 t puiduhaket, 53540,590 tuh Nm<sup>3</sup> maagaasi, 32265,265 t kergest kütteõli või diislikütust või 24535,938 t põlevkiviõli. Aasta vältel kõiki kütuseallikaid summaarselt ei tarbita. Vedelkütuseid hoitakse territooriumil varudena, tulenevalt kaugkütteseaduse kohustustest, ning nende kasutamist ei planeerita.[12]



moodustavad 252.808 MWth. Jäävad üle veel katel 1 ja 2, mis on mõeldud jaama omatarbeks, vastavate nimisoojusvõimsustega 4,194 MWth ja 5,778 MWth.[12]

Koostoomisjaama eelduslik aastane elektritoodang on 88 GWh ja soojuse eelduslik toodang 253 GWh. Lisaks sellele on territooriumil asuva katlamaja eelduslik soojuse toodang 250 GWh, kokku kogu käitisest 503 GWh. Nimetatud võimsus katab pea terve Tallinna linna ühtse kaugküttevõrgupiirkonna läänepiirkonna tarbijate soojusenergia nõudluse.[12]

## 3.SOOJUSE SALVESTAMINE

Energiat, kaasaarvatud ka soojusenergiat on võimalik erinevatel viisidel talletada. Soojuse puhul on talletamisel kaks peamist probleemi: soojusenergia loomulik liikumine hajumise suunas ja antud hajumise liikuma panev jõud, temperatuuride vahe.

Soojussalvesti on lihtsustatud tööpõhimõttelt vahemahuti toodetud soojusenergia jaoks, kus soojusenergia hajuvus on minimeeritud isolatsiooni abil. Soojussalvesti sees asub täitematerjal ehk soojuskandja. Soojussalvestisse on võimalik juhtida soojusenergiat, seda seal säilitada ja tarbida vajaduspõhiselt.

### 3.1 Soojussalvestite liike

Soojuse salvestamine jaotub peamiselt kolmeks alamtehnoloogiaks. Leidub ka mitmeid uudseid tehnoloogilisi lahendusi, mida käesolevas töös detailselt ei käsitleta. Analüüsitavate tehnoloogiate valimisse võeti lahendused, mis on rakendatavas arengustaadiumis. Soojuse salvestamise puhul on võimalik soojuskandja temperatuuri hoida stabiilselt kuni +550 °C juures, sõltuvalt tehnoloogiast.[14]

#### 3.1.1 Faasimuutuseta soojuse salvestamine

Tegemist on kõige levinuma ja ka kõige majanduslikumalt soodsama meetodiga. Soojust salvestatakse soojusisolatsiooniga varustatud reservuaaris või paagis. Nimetatud paak säilitab soojust reservuaaris sisalduva aine temperatuuri tõstmise arvelt. Suurendatakse säilituskeskkonna siseenergiat. Soojust on võimalik säilitada kas tahketes ainetes – kivimid, betoon, grafiit ja liiv, või vedelates ainetes – vesi, õhk, õli, madala sulamistemperatuuriga metallid ja sulatatud sool. Populaarseim soojuskandja on vesi, see on suure soojusmahutavusega, levinud, odav ja kergesti kättesaadav aine.[15], [14]

Faasimuutuseta tehnoloogial põhinevate süsteemide salvestatud soojuse hulk avaldub järgnevast valemist:

$$Q = m * C_p * \Delta T \quad (3.1)$$

Kus  $m$  - soojuskandja mass soojussalvestis (kg),

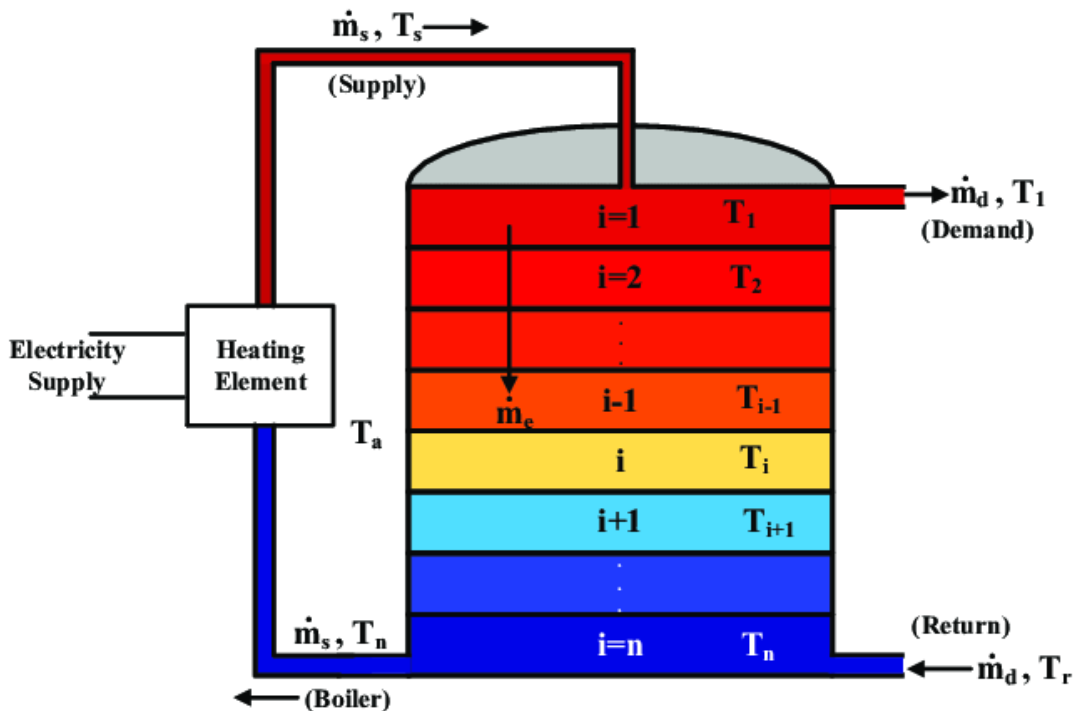
$C_p$  - soojuskandja erisoojusmahtuvus (kJ\*kg<sup>-1</sup>\*K<sup>-1</sup>),

$\Delta T$  - soojuskandja temperatuuri muut salvesti laadimisel (°K või °C),

$Q$  - salvestatud energia hulk (kJ).[14]

Faasimuutuseta soojuse salvestamisel kasutatavad materjalid on termiliselt stabiilsed ka kõrgetel temperatuuridel, mistõttu on võimalik antud süsteeme kasutada kõrgetemperatuurilistes lahendustes. Kõrged väljundtemperatuurid võivad olla vajalikud näiteks tööstuslikes protsessides. Antud tehnoloogia peamine puudus on temperatuuri püsivus salvesti tühjenemisel. Kui faasimuutuseta soojuse salvesti tühjeneb siis tema väljundtemperatuur alaneb. Samuti on faasimuutuseta süsteemide mahutavused väiksemad kui teistel tehnoloogiatel. Nimetatud mahutavuse väiksem suurus tuleneb asjaolust, et materjalide erisoojus on võrdlemisi väike, võrreldes näiteks ainete latentse ehk faasimuutuse soojusega.[14]

Joonis 3.1 Faasimuutuseta akumulaator-soojussalvesti [16]



Faasimuutuseta soojuse salvestamine jaotub pikaajalisteks ja lühiajalisteks lahendusteks. Lühiajalise soojuse salvestamise salvestustsükli pikkus on ligikaudu 1 päev kuni 1 nädal. Pikaajalise salvestamise puhul on tsükli pikkus 1 kuni 2 aastat. Lühiajalise salvestuse tehnoloogia on sobivam süsteemidele kus on suurem soojusenergia tarbimise kõikumine, näiteks kevadisel ja sügisel perioodil. Pikaajalisem salvestamine on sobilik juhtudeks kus soojusenergia tarbimise koormus on suure amplituudi ja perioodiga, näiteks süsteemides kus puudub pidev baaskoormus, kuid on suured tipukoormused.[1]

### 3.1.2 Faasimuutuse ehk latentse soojusega soojuse salvestamine

Ainetel on kolm erinevat faasi: tahke, vedel ja gaasiline. Aine faasi määrab aine temperatuur ja rõhk mille juures aine on. Faasimuutusega ehk latentse soojusega toimivad soojussalvestid kasutavad ära faasimuutuse nähtuseid. Kui aine faas on muutumas siis aine temperatuur püsib stabiilsena kuni aine on siirdunud täielikult ühelt faasilt teisele. Üldiselt on kasutusel tahke-vedelik faasimuutusega protsess. On võimalik kasutada ka tahke-tahke oleku süsteeme kuid antud süsteemide latentne erisoojus on väiksem. Küll aga on tahke-tahke oleku süsteemidel üks suur eelis, väike soojuskandja lekkimise tõenäosus. Vedelik-gaas süsteemidel on suurim latentne erisoojus, küll aga põhjustab antud faasimuutus väga suuri ruumala muutusi, mis muudab antud süsteemid ebapraktilisteks. Seetõttu on vedelik-gaas süsteemid vähe soositud.[14]

Faasimuutusega salvestatud soojuse maht avaldub järgnevalt:

$$Q = m * L \quad (3.2)$$

Kus  $m$  - soojuskandja mass soojussalvesits(kg),  
 $L$  - soojuskandja latentne soojus ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),  
 $Q$  - salvestatud energia hulk (kJ).[14]

Latentse soojusega soojuse salvestamise süsteemidel on peamiselt kahte liiki soojuskandjaid: orgaanilised ja anorgaanilised. Orgaaniliste ainte puhul: erinevad parafiini liigid ja segud, küllastunud ja küllastumata rasvhapped, estrid, alkoholid, glükoolid. Anorgaaniliste ainete puhul: soolad, sool-vesi segud, soola hüdriidid, metallid ja metallisulamid.[14]

Latentne erisoojus on erinevate ainete puhul ligi 50-100 korda suurem kui aine erisoojusmahtuvus. Selliste süsteemide soojusmahutavus on mahuühiku kohta arvestatavalt suurem kui faasimuutusega süsteemidel. Antud omadus võimaldab ehitada palju kompaktsemaid soojussalvesteid. Samuti on antud süsteemide väljundvoo temperatuur püsiv, kuna faasimuutuse protsess toimub konstantsel temperatuuril. Küll aga on faasimuutusega süsteemide puhul soojuskandjad halva soojusjuhtivusega, seega on piiratud väljundvoo soojusvõimsus ja salvesti laadimise ning tühjenemise kiirus. Faasimuutusega süsteemide soojuskandjad on üldiselt mittemürgised, kuid orgaanilised ained on tihtipeale tuleohtlikud ja ka lipofiilsed. Antud omadused seavad kitsendusi salvestite konstruktsioonile ning nõuavad enam ohutusseadmeid ja -süsteeme. Anorgaanilised soojuskandjad aga on tihtipeale söövitavate omadustega metallmahutite suhtes, piirates samuti salvestite konstruktsiooni valikuid. Faasimuutusega süsteemide puhul sõltub väljundvoo temperatuur valitud

soojuskandjast, see omadus samuti kitsendab antud tehnoloogia otstarbekust rakendamisel.[14]

Antud tehnoloogial on veel üks suur puudus, soojuskandja degradeerumine. Üle aja alaneb hetkel teatavate soojuskandjate latentne soojusmahtuvus. Antud süsteemid suudavad tagada soojuste säilimise mõne tunni kuni mitme kuu ulatuses.[17]

### **3.1.3 Termokeemiline soojuste salvestamine**

Keemiline reaktsioon on protsess, mille käigus ühest või mitmest keemilisest ainest tekib üks või mitu uut produkti. Nimetatud protsess toimub keemiliste sidemete katkemise ja/või moodustumise teel. Antud uurimuse mastaabis võime lihtsustatult vaadelda, et on kahte liiki reaktsiooni. Endotermilised ja eksotermilised. Endotermiliste reaktsioonide puhul reaktsiooni toimimise käigus neeldub soojusenergia ja eksotermiliste puhul eraldub soojusenergia. Termokeemilised süsteemid kasutavad keemilisi reaktsioone, mis salvesti tühjenemisel on eksotermilised ja kus soojusenergia eraldub. Salvesti laadimisel esineb aga pöördreaktsioon, mis on endotermiline, soojusenergia neeldub. Nimetatud reaktsioone juhitakse soojussalvesti sisese temperatuuri ja rõhu juhtimise kaudu. Termokeemiliste soojussalvestite puhul on opereerimistemperatuuride vahemik võrdlemisi piiratud: ca 200 °C - 400 °C.[14]

Termokeemilised süsteemid omavad mitmeid eeliseid faasimuutusega ja faasimuutuseta süsteemide üle. Termokeemilised soojussalvestid on suurima soojusmahtuvusega nii soojuskandja massi kui ka ruumala suhtes. Termokeemiliste soojussalvestite peamine eelis on see, et soojusenergiat salvestatakse keemilistes sidemetes. Tulenevalt asjaolust, et energia talletatakse keemilistes sidemetes võib öelda, et salvestusperioodil soojuskadod puuduvad. Peamised kadod tulenevad salvesti laadimisest ja tühjenemisest. Nimetatud omadus osutub suureks eeliseks pikaajalisel soojussalvestamisel. Paraku on termokeemiliste süsteemide puhul veel mitmeid võtmetähtsusega probleeme mida pole lahendatud. Peamiseks mureks on soojuskandja degradeerumine, mis pärsib soojussalvesti laadimist. On üldiselt leitud, et termokeemiline soojuste salvestamine on veel laboratoorses ja pilootprojekteerimise faasis.[14], [18]

### 3.1.4 Soojuse salvestamise rakendusi

Lisaks rakendustele tööstuses, soojusenergia tootmises ja kaugküttevõrkudes võib soojussalvestamist kasutada ka teistes valdkondades. Soojussalvesteid võib rakendada ka näiteks eramutes päikeseenergia salvestamiseks tarbevee soojendamiseks, antud juhtudel kasutatakse faasimuutuseta soojuse salvestamist. Samuti on püstitatud, et soojust võib salvestada ka põhjaveekihtides. Kui antud veekiht on sobivate omadustega ja puudub suur veetarve võib see olla sobiv soojuse salvestamiseks puuraukude abil. Nimetatud süsteemide juurutamine on tõenäoliselt tänapäevastest tehnoloogiatest odavam, kuna ei ole vaja välja ehitada mahuteid soojuse salvestamiseks. Samuti on võimalik luua ka passiivseid soojuse salvestamise süsteeme mille puhul suure soojusmahutavusega salvestusaine stabiliseerib mõne keskkonna temperatuuri salvestades soojust kui temperatuur tõuseb ja vabastades seda kui temperatuur langeb.[14]

On loodud pilootseadmeid ka mobiilseteks soojussalvestiteks mis toimivad sorptisooniprotsessil, termokeemiliselt. Antud süsteemid oleks väga optimaalsed tööstusliku jääksoojuse kogumiseks kuna püsivat salvestussüsteemi ei ole paljudel objektidel majanduslikult mõistlik juurutada. Samuti on toimunud arengud ka nn „külma“ salvestamises, kus eesmärgiks on võetud soojuskandja temperatuuri hoidmine madalal tasemel.[14]

Joonis 3.2 Mobiilne sorptisoon-soojussalvesti [14]





Mitmed allikad annavad väga suurte variatsioonidega soojussalvestite püstitamise maksumuse, tabelis 3.1 on iga tehnoloogia lõikes toodud eelduslikud hinnad ja iseloomustavad parameetrid.[1],[17]

Tabel 3.3 Soojussalvestite parameetreid tüübi alusel.

Nr	Soojussalvesti tehnoloogia	Salvestamise maksumus (euot/kWh)	Keskmine kasutegur (%)	Soojusmahutavus (kWh/m <sup>3</sup> )	Sobilik salvestamise periood
1	Faasimuutuseta	0,1-25	50-99	5-50	Päevad kuni kuud
2	Faasimuutusega	10-50	75-90	50-150	Tunnid kuni kuud
3	Termokeemiline	8-100	75-99	120-250	Tunnid kuni päevad

### 3.2 Soojuse salvestamise rakendamine kaugküttevõrgus ja koostootmises

Varasemad uuringud on näidanud, et on leitavad andmed 74 koostootmisjaama jaoks, kus töötab jaamaga koos soojuse akumulatsioonipaak. Kasutatavate paakide mahtuvus võib varieeruda alates 750 m<sup>3</sup> kuni 50 000 m<sup>3</sup>. KTJ jaamade soojusvõimsus varieerub 2,8 MW kuni 918 MW, ning elektriline võimsus 0.5 MW kuni 793 MW. Nähtub, et soojussalvestite kasutus jaotub kahte alamrühma. Ühe puhul säilitatakse energiat alla 5h, et rahuldada soojusvõrgu koormuste võnkumist. Teise meetoodika puhul säilitatakse soojust enam kui 5h kestel, antud paagid säilitavad soojuskandja temperatuuri madalamal tasemel ja on paigaldatud peamiselt KTJ majandusliku efektiivsuse suurendamiseks ja elektritootmise toetamiseks. Nähtub, et soojussalvesti kogumaht on otseses seoses KTJ soojusvõimsusega, mida suurema nimivõimsusega jaam seda suurema mahuga salvesti.[2]

Kaugküttevõrkudes esineb tihtipeale soojuste tootmise ja tarbimise mittekattuvus. Nimetatud mittekattuvust põhjustavad soojusenergia tootmise ja tarbimise ajaline vahe ning soojusenergia tootja ja tarbija vahekaugus. Kaugküttes raames kasutatakse tavaliselt nii majanduslikel kui ka tehnilistel põhjustel peamiselt lühiajalist faasimuutuseta soojuste salvestamist.[1]

Pikaajaline salvestamine pole Mustamäe KTJ puhul mõistlik kuna jaam on projekteeritud toimima aastaringelt, sh. ka madalama soojusenergia tarbimisega perioodidel. Ei esine suuremahulist soojusenergia ülejääki.

Teistes Eestis leiduvates kaugküttevõrkudes on varem kasutatud faasimuutuseta vett sisaldavate akumulaatorpaakidel põhinevat soojuste salvestamist. Näitena võib tuua Kuressaare soojuste koostootmisjaama, kuhu ehitati koos jaamaga ka 400 m<sup>3</sup> akumulaatorpaak, mis kompenseerib kütteperioodi jahedaimal ajal kaugküttevõrgu tipukoormust. Tipukoormuse kompenseerimise abil on antud juhul võimalik ennetada vajadust lülitada sisse nn „tipukatlad“, mille tõhusus on koostootmisjaamast märkimisväärselt madalam.[19]

Töö koostamise hetkel on autorile teada, et ka Tartu koostootmisjaama ja Väo I koostootmisjaama juurde on planeeritud soojussalvestite juurutamine.

### **3.3 Vaatlusaluse soojuste salvestamise tehnoloogia valiku põhjendus**

Vaatleme faasimuutuseta soojuste salvestamist vett sisaldavate akumulaatorpaakide näitel. Nimetatud tehnoloogia jaotub lühi- ja pikaajaliseks salvestamiseks. Pikaajalistele salvestite valik on sobivam üksustesse kus pidevat soojusenergia tarbimist pole. Lühiajalise salvestamise tehnoloogia jaotub omakorda kaheks. Kõrgerõhuliseks ja atmosfäärirõhuliseks salvestamiseks. Mõlemal lahendusel on omad eelised ja puudused. Koostootmise ja kaugküttes puhul on sellised lahendused tuntud ka kui akumulaatorpaagid.[20]

Kõrgerõhulised süsteemid nõuavad suuremat alginvesteeringut salvesti ehitamisel, kuid neid saab ühendada kaugküttes võrku otse, ilma soojusvahetitega. Alginvesteeringu hinda suurendab vajadus teha soojussalvesti rõhukindlaks. Soojussalvesti otsene ühendamine kaugküttes võrku alandab investeeringuid salvestussüsteemi ehitamisel, kuna puudub vajadus ehitada välja soojusvahetid soojusenergia edastamiseks

kaugküttevõrku. Samuti kahaneb paigaldatavate torustike ja automaatikasüsteemide maht. Ühendades soojussalvesti otse kaugküttevõrku on minimeeritud ka soojuskaod. Soojuskadude lang tuleneb asjaolust, et soojusvahetite olemasolul on vajadus soojussalvesti tühjendamisel edastada soojusvahetisse soojuskandjat suuremal temperatuuril kui on kaugküttevõrgu pealevoolu temperatuur. Soojusvahetita juhul saab juhtida soojuskandja otse kaugküttevõrku soovitud pealevoolu temperatuuril. Samuti suudab kõrgerõhuline süsteem talletada enam soojust ühe mahuühiku kohta kui atmosfäärirõhuline süsteem, see võimaldab ehitada väiksema ruumalaga salvesti sama soojusmahutavuse juures. Antud omadus on ruumilise piiranguga objektidel võtmetähtsusega.[20]

Madalarõhuliste süsteemide puhul on küll soojussalvesti enda ehitamine madalama hinnaga, kuid vajaminevad lisandseadmed tõstavad kogu salvestussüsteemi summaarse hinna kõrgemaks kui võrreldava kõrgerõhulise salvesti puhul. St. maksumus: eurot/salvestatud MWh kohta on suurem. Kuna atmosfäärilisel rõhul toimiv salvesti ei ole otseselt ühendatud kaugküttevõrku ei mõjuta see võrgu rõhurežiimi. Antud omadus võimaldab kergemini juhtida mitme erineva salvesti tööd ja teeb ka uute salvestite juurdeehituse kergemaks.[20]

Näib, et majanduslikust aspektist oleks mõistlikum valida kõrgerõhuline tehnoloogia. Küll aga tuleb kaaluda ka tehnoloogia laiendamise võimekust, mis on kõrgerõhulistel süsteemidel piiratud. Mida enam ehitada juurde kõrgerõhulisi süsteeme seda keerukam on nende töö sünkroniseerimine. Samuti leidub, et tänapäevaste tehniliste lahenduste juures on kõrgerõhuliste süsteemide mahutavus piiratud 850 MWh juurde, atmosfäärirõhulised soojussalvestid seevastu suudavad talletada kuni 2 GWh.[1], [20]

Kirjeldatud mahutite toimimine põhineb vee soojuskihistumisel. Vee soojuskihistumine on veemasiivi jaotumine erinevate temperatuuridega kihtideks. Kusjuures, soojemad kihid jäävad külmemate peale. Antud nähtus tuleneb vee tiheduse muutumisest temperatuuri suhtes. Mida soojem on vesi seda väiksem on tema tihedus. Soojussalvestite puhul on võimalik nähtuse mõju vaadelda lihtsustatult kahe kihina. Salvesti ülemises osas asub soojem kiht ja alumises külmem kiht, neid eraldavad termokliinid. Termokliin on piirkond mis asetseb kuuma ja külma kihi vahel kus temperatuurigradiendi muutumise kiirus on suur.[21]

Sellistel tehnoloogiatel põhinevatel soojussalvestitel on kaks primaarset operatsiooni, laadimine ja tühjenemine. Laadimisoperatsioonil juhitakse salvesti ülemisse kihti kõrge temperatuuriga vett läbi spetsiaalsete difuusorite, mis jaotavad siseneva vee ühtlaselt

salvesti ülemises kihis. Difuusorid alandavad veekihtide segunemist, mille abil pareneb salvesti mahutavus. Sooja vee sisse pumpamisega samaaegselt eemaldatakse paagist külmemat vett alumisest kihist. Laadimisprotsessi jooksul langeb termokliin piki mahutit kuni täitumiseni. Tühjenemine on laadimise pöördprotsess. Tühjenemise jooksul juhitakse paagi alumisest osast külma vett paaki ning ülemisest osast pumbatakse välja sooja vett, mida juhitakse edasi kas kaugküttevõrku või soojusvahetitesse, sõltuvalt tehnoloogiast. Ka tühjenemisel juhitakse paaki vett läbi difuusorite. Difuusorid on antud süsteemides võtmetähtsusega, kuna suurimad mahutavuse kaod tulenevad just veekihtide segunemisest.[21]

Sellistel soojussalvestitel on väga tähtsaks parameetriks ka paigalduse lahendus, kas vertikaalselt või horisontaalselt. Vertikaalsed paagid on suurema kasuteguriga, kuna termokliini pindala on väiksem, seetõttu on difusiooni ja konduktsiooniga veekihtide omavaheline soojusvahetus väiksem.[17]

Ka AS Utilitas Tallinn poolt tellitud eeluuring viitab lühiajalise madalarõhulise süsteemi valiku eelistatusele. Nimetatud eeluuringus dimensioneeriti kogu Tallinna kaugküttevõrgule sobiva mahuga soojussalvestamine. Sobivaks mahuks leiti 35 000 m<sup>3</sup>, millest 15 000 m<sup>3</sup> tuleks paigaldada Mustamäe tootmisüksuse territooriumile ja 20 000 m<sup>3</sup> Vao tootmisüksuse territooriumile. Faasimuutusega akumulatorpaagil põhineva lahendusega kaasneb veel üks eelis. Akumulaatorpaag juurde saab paigaldada elektriboileri, et madalate elektrihindade juures toota soodsalt soojusenergiat hilisemaks kasutamiseks.[20]

Eelnevast informatsioonist lähtuvalt võime leida, et sobivaks vaadeldavaks tehnoloogiaks peab olema lühiajaline soojuse salvestamine. Nimetatud salvestamine peab põhinema faasimuutusega soojuse salvestamise põhimõttel ning opereerima atmosfäärirõhul. Arfy Finland OY on ka koostanud asendiplaanilise skeemi mahuti paiknemiseks. Nähtub, et objektile on arvestatavad ruumilised piirangud. Lähtudes eeltoodust võib eeldada, et kõrgerõhulise süsteemi valik oleks eelistatav kuid nimetatud tehnoloogia pole veel suuremahuliseks rakendamiseks valmis.[20]



## 4.SOOJUSE SALVESTAMISE HINDAMISE METOODIKA JA TULEMUSED

### 4.1 Sisendandmete kirjeldus

Sisendandmed saadi Arfy Finland OY eeluuringust Tallinna kaugküttevõrgu lühiajalise soojuse salvestamise hindamiseks. Nimetatud uuring andis andmed salvesti planeeritava suuruse ja laadimis ning tühjenemisvõimsuste kohta. Mustamäe KTJ väljundvõimsuste info saadi statistikaameti kodulehelt ja jaama kohta esitatud keskkonnakompleksloa taotluselt. Sisendanmete alusel uuriti kui palju enam soojusvõimsust suudaks koostootmisjaam toota rakendades soojussalvestit. Arvutustes on võetud salvesti mahuks 12000 m<sup>3</sup> kuna paaki ei saa laadida ja tühjendada täies ulatuses, peab säilima termokliin. Arfy Finland OY arvutustel on nn. „tööruumala“ ligikaudu 20% väiksem kui salvesti koguruumala ehk 12000 m<sup>3</sup>. [12],[20]

### 4.2 Arvutuskäigu kirjeldus

Soojussalvesti kasumlikusse ja perspektiivikuse hindamiseks viidi läbi lihtsustatud arvutused illustreerimaks salvesti majanduslikke ja tehnilisi eeliseid.

#### 4.2.1 Inseneritehniline arvutus

Mustamäe KTJ tööaeg aastas on 8760 tundi. Eeldame, et optimaalseks töörežiimiks on koostootmistsükkel, kus toodetakse 10MW elektrienergiat ja 28,8 MW soojusenergiat. Seega aastane soojusenergia tootlikus avaldub järgnevalt:

$$E = t * P = 8760 \text{ h} * 28,8 \text{ MW} = 252288 \text{ MWh} = 252,3 \text{ GWh} \quad (4.1)$$

Kus E - soojusenergia tootlikus (MW),  
t - aeg tundides,  
P on seadme nimivõimsus (W).

Eelprojekteeritud soojussalvesti maht on 12000 m<sup>3</sup>, salvesti laadimistsükklil soojendatakse mahutis olev vesi kuni 115 °C, tühjenemistsükklil alaneb salvestis oleva vee temperatuur kuni 55 °C. Vee erisoojusmahtuvus 115 °C juures on 4,23kJ\*kg<sup>-1</sup>\*K<sup>-1</sup>. Vee tihedus 115 °C juures on 947,09 kg/m<sup>3</sup>.

Soojussalvesti soojusmahtuvus täis laetud olekus avaldub vastavalt valemile 3.1 järgnevalt:

$$Q = m * C_p * \Delta T$$

$$Q_{salvesti} = \rho_{vesi} * V_{vesi} * C_{p\ vesi} * (t_{l\oopp} - t_{alg}) =$$

$$= 947,09 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 12000 \text{ m}^3 * 4,23 \text{ kJ} * \text{kg}^{-1} * \text{K}^{-1} * (115 \text{ }^\circ\text{C} - 55 \text{ }^\circ\text{C}) = 2884457304 \text{ kJ}$$

Soojussalvestis akumulereeritud energia täis laetud olekus avaldub järgnevalt:

$$E_{akumuleeritud} = Q * \frac{1}{3600} = 2884457304 \text{ kJ} * \frac{1}{3600} = 801238 \text{ kWh} = 801,23814 \text{ MWh} \quad (4.2)$$

Kus  $E_{akumuleeritud}$  – soojussalvestis akumulereeritud energia (kWh),  
 $Q$  - Soojussalvesti soojusmahtuvus (kJ).

Eeldame, et kolme kuu ulatuses aastast esineb soojusvõimsuse puudujääk 5% koostootmisrežiimil toimides. Samuti eeldame, et kolme kuu ulatuses aastast tekib soojusvõimsuse ülejääk 5% kogu soojusvõimsusest koostootmisrežiimil toimides. Eeldame, et salvestusperioodil on soojuskaod vähetähtsad. Seega madala nõudlusega perioodil toodetud energiat saab salvestada ja säilitada kogu soojussalvesti mahu ulatuses ja tarbida perioodil mil on soojusenergia puudujääk. Samuti eeldame, et salvesti tühjenemisel ja laadimisel puuduvad soojuskaod.

Kolme kuu soojusvõimsuse tootlikus avaldub järgnevalt:

$$2190 \text{ h} * 28,8 \text{ MW} = 63072 \text{ MWh}$$

20% soojusenergia ülejääk ja puudujääk on seega:

$$Q_{puudujääk} = 63072 \text{ MWh} * 0,05 = 3153,6 \text{ MWh}$$

Leiame, et soojusenergia ülejäägist saaks salvestada kogu salvesti mahu ulatuses soojusenergiat - 800 MWh. Samuti saaks puudujäägi puhul samuti kasutada kogu mahuti ulatust 800 MWh. On ka leitud, et maagaasi CO<sub>2</sub> heitefaktor on ligikaudu 201,96 kgCO<sub>2</sub>/MWh.[22]

Soojussalvesti rakendamisel ennetatud CO<sub>2</sub> heide avaldub seega:

$$201,96 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{MWh}} * 800 \text{ MWh} = 161 \text{ tCO}_2$$

#### 4.2.2 Majanduslik arvutus

Koostootmise puhul kaetakse tootmise puudujääk nn. „tipukateldega“, need on katlad mille kütuseallikaks on maagaas. Vaatleme 35 MW võimsusega veekatelt Danstoker, nimetatud katlad on paigaldatud ka Mustamäe KTJ territooriumile. Elering AS andmetel oli 2022. aastal Eestis maagaasi börsihind keskmiselt 130,24 eurot/MWh. Tuleb ka mainida, et suurtootmise puhul sõlmitakse pikaajalised lepingud kus gaasi maksumus võib olla arvestatavalt madalam kui turuhind.[23]

Soojussalvestiga säästetud maagaasi hind aastas oleks seega:

$$800 \text{ MWh} * 130 \frac{\text{eurot}}{\text{MWh}} = 104000 \text{ eurot}$$

Küll aga peab nimetatud 800 MWh soojusvõimsust tootma koostootmisüksuses biomassist. Baltpool börsi andmetel oli puiduhakke keskmine hind 2022 aastal 26,9 eurot/MWh.[24]

Seega oleks koostoomisüksuses biomassist toodetud soojuse hind:

$$26,9 \frac{\text{eurot}}{\text{MWh}} * 800 \text{ MWh} = 21520 \text{ eurot}$$

Summaarne kütuse hinna sääst salvesti käitamisel ühe aasta jooksul oleks seega:

$$104000 - 21520 = 82480 \text{ eurot}$$

Peab ka arvestama asjaolu, et puiduhakke hinnad ei ole suurtootmises avatud börsiga võrdsed vaid on pigem madalamad tänu suuremahulistele hangetele.

Vaatleme ka olukorda kus koostootmisüksusel tekib eelmainitud 5% soojusenergia ülejääk kuid puudujääki ei teki ja vajadust tipukatelt käidelda ei ole. Ilmneks võimekus salvestada 800 MWh soojust, mida oleks vastasel juhul väljutatud atmosfääri ja seda müüa. Vaatleme kui palju on võimalik teenida 800 MWh soojusenergia müümisel.



Konkurentsiameti andmetel on 20.12.2022 seisuga Mustamäe KTJ soojuse müümise piirhind 64,74 eurot/MWh.[25]

Müüdava soojusenergia hind avalduks järgnevalt:

$$64,74 \frac{\text{eurot}}{\text{MWh}} * 800 \text{ MWh} = 51792 \text{ eurot}$$

Teenitud kasu müüdüd soojusenergia arvelt avalduks järgnevalt:

$$51792 \text{ eurot} - 21520 \text{ eurot} = 30272 \text{ eurot}$$

Võib ka leida, et terve 51792 eurot võib pidada puhaskasumiks, kuna jaama oleks käidatud olenemata sellest kas soojusenergia väljutatakse atmosfääri või edastatakse tarbijatele.

### 4.3 Tulemused

Uurimuse käigus koostatud arvutused ja uuritud kirjandus viitab sellele, et soojuse salvestamise tehnoloogiad on arenemas laialdase rakendatavuse faasi. Soojussalvestid võimaldavad vähendada koostootmises ja kaugküttes esinevaid kadusid ning heitmeid. Vähendatud kaod ja suurendatud efektiivsus on koostootmise jätkusuutlikuse vaatepunktist võtmetähtsusega.

Uurimuse tulemustest nähtub, et Mustamäe KTJ territooriumile on mõistlik paigaldada faasimuutuseta soojussalvesti, mahuga 15000 m<sup>3</sup>. Käesoleva uurimuse arvutuslik ja arutuslik osa leidis, et on mõistlik vaadelda lühiajalist salvestamist, kuna soojusenergia tarbimine on väga muutlik ka lühikeste perioodide lõikes. Mõistlik on valida tehnoloogia, mis toimib madalal rõhul kuna nimetatud süsteeme on kaugküttevõrku kergem liita. Samuti on madalarõhuliste süsteemide laiendamine tulevikus märkimisväärselt kergem.

Leiti, et valitud suuruse ja parameetritega soojussalvesti tasuvus aastas oleks ligikaudu 30000 kuni 80000 eurot, arvestamata alginvesteeringut. Antud uurimuse mastaapi ei kuulu salvesti ehitamise, hooldamise, käitamise ja utiliseerimise hinnastamine. Antud andmetega oleks võimalik arvutada ka salvesti tasuvusaeg. Kui soojussalvesti käitamisel ennetatakse gaasikatelde tarbimist on võimalik ennetada ka ligikaudu 161 tonni CO<sub>2</sub> heitmeid atmosfääri iga laadimistsükli ulatuses.

## KOKKUVÕTE

Töö eesmärgiks püstitati soojuse salvestamise tehnoloogiate tutvustamine ja Mustamäe koostootmisjaama kirjeldamine. Lisaks püstitati ülesanne anda ülevaade Mustamäe KTJ juurde paigaldatava soojussalvesti perspektiivikusest.

Töö käigus tutvustati soojuse salvestamise tehnoloogiaid ja nende arengut. Kirjeldati Mustamäe koostootmisjaama käitu ning tutvustati põgusalt Tallinna linnas asuvat kaugküttevõrku. Lisaks analüüsiti koostootmisjaama juurde projekteeritava soojussalvesti ning koostootmisjaama tööparameetreid ja teostati esmased majanduslikud arvutused.

Töö tulemusena leiti, et Mustamäe KTJ juures ja ka teistes koostootmisjaamades on mõistlik kasutada Eesti mastaabis lühiajalist faasimuutuseta soojuse salvestamist. Toodi välja akumulaatorpaakide, ehk vett kasutavate soojussalvestite perspektiivikus. Leiti, et akumulaatorpaak on sobivaim tehnoloogia antud käitise mastaabis. Leiti, et akumulaatorpaagi rakendamisel on võimalik saavutada majanduslik ja keskkonnatehniline kasu. Säätetakse primaarenergia kulus ja ka CO<sub>2</sub> heidetes. Üheks uurimuse suureks puuduseks on, et arvutuslik mudel ei arvesta salvesti elutsükli kulukust. Antud probleemi käsitlemine oleks asjakohane tulevastes uurimustes. Toetudes käesolevas töös leitule arvab autor, et tuleks edasi liikuda faasimuutuseta soojuse salvestamise tehnoloogiatega ning nende juurutamisega kuna need on nähtuvalt saavutamas laialdast rakendust.

## **SUMMARY**

The purpose of this study was to describe heat storage technologies and Mustamäe CHP. In addition, this study is intended to give a short overview of the perspective of heat storage integration at Mustamäe CHP.

This study gives an overview of heat storage technologies and their development. A short description of the Mustamäe CHP plant and Tallinn's district heating network was given. In addition, the operating parameters of a proposed heat storage unit and Mustamäe CHP were analyzed. Initial economic and environmental calculations were carried out.

This study found that within the limited scope of Estonian CHPs, including Mustamäe CHP, a short-term, sensible heat-based heat storage system is best suited for integration. Accumulator tank-based systems were found to be the most advantageous for integration into existing CHP plants. The study also found that the use of an accumulator tank was both economically and environmentally beneficial to a CHP's operation. One could see a decrease in fuel expenses and a reduction in CO<sub>2</sub> emissions. The main drawback of this study is that it did not consider the life-cycle costs associated with an accumulator tank and its installation. Further studies must be carried out. The author of this study finds that accumulator tank technologies must be studied further and integrated into CHPs as they are an emerging field in the energy production industry.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] A. Volkova, E. Latõšov, V. Mašatin, I. Krupenski, A. Siirde. Jätkusuutlik kaugküte, digitaalne õpik. Taltech 2022;25-37:102-114:120-128.
- [2] I. Tammsalu, H. Tammoja KOOSTOOTMISJAAMADE TALITLUSE OPTIMEERIMINE KAUGKÜTTEVÕRGUS, Tallinn 2021.
- [3]<https://www.shiksha.com/work-energy-and-power-preparation/thermal-power-plant-diagram-2943>
- [4] <https://opik.fyysika.ee/index.php/book/section/4018#/section/4018>
- [5] A. Siirde. TÕHUSA KOOSTOOTMISE VIITEVÄÄRTUSED JA TÕHUSA KOOSTOOTMISE POTENTIAAL EESTIS, aruanne, Tallinn 2005.
- [6] Statistikaameti andmebaas: KE20: ELEKTRIENERGIA JA SOOJUSE TOOTMINE NING TOODANGUINDEKS
- [7] <http://www.cogeneurope.eu/medialibrary/2012/11/27/1b4a090d/CODE%20Case%20studies%20Parnu%20CHP.pdf>
- [8] <https://elering.ee/taastuenergia-toetus#tab0>
- [9] Tõhusa koostootmise nõuded.<https://www.riigiteataja.ee/akt/12825847>
- [10]<https://www.mkm.ee/uudised/riik-korraldab-suurima-taastuvelektri-vahempakkumise>
- [11] A. Volkova, E. Latosov, A. Siirde. Heat Storage Combined with Biomass CHP under the National Support Policy. A Case Study of Estonia 2020.
- [12] [https://kotkas.envir.ee/permits/public\\_application\\_details?represented\\_id=&proceeding\\_id=10608&application\\_id=1011460](https://kotkas.envir.ee/permits/public_application_details?represented_id=&proceeding_id=10608&application_id=1011460)
- [13] <https://old.utilitas.ee/as-utilitas-tallinn/utilitas-mustamae-koostootmisjaam-5/>
- [14] G. Alva, Y- Lin, G. Fang. An overview of thermal energy storage systems 2017. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054421732056X>
- [15] A. Evans, V. Strezov, T. J. Evans. Energy storage technologies 2022

- [16] [https://www.researchgate.net/figure/Stratification-in-hot-water-storage-tank-b-energy-flow-in-stratified-layers-In-Figure\\_fig7\\_338140351](https://www.researchgate.net/figure/Stratification-in-hot-water-storage-tank-b-energy-flow-in-stratified-layers-In-Figure_fig7_338140351)
- [17] M. Andrjaškin, A. Volkova. Biomassil töötava koostootmisjaama soojuse akumulatsioonipaakide paigaldamise efektiivsuse hindamine 2018.
- [18] <https://blog.sintef.com/sintefenergy/thermochemical-energy-storage-the-next-generation-thermal-batteries/>
- [19] [https://energiatalgud.ee/sites/default/files/images\\_sala/b/b4/Leemet%2C\\_P.\\_Koostootmine\\_Kuressaares\\_10.04.2014.pdf](https://energiatalgud.ee/sites/default/files/images_sala/b/b4/Leemet%2C_P._Koostootmine_Kuressaares_10.04.2014.pdf)
- [20] Arfy Finland OY. Pre-Engineering Study for short term heat storage 2021.
- [21] <https://www.araner.com/blog/stratified-thermal-energy-storage-tanks>
- [22] <https://ourworldindata.org/grapher/carbon-dioxide-emissions-factor>
- [23] <https://dashboard.elering.ee/et/gas-transmission/gcv?interval=minute&period=years&start=2023-01-01T05:00:00.000Z&end=2024-01-01T04:59:59.999Z&show=graph>
- [24] <https://www.baltpool.eu/ee/biokutuse-bors/>
- [25] [https://www.konkurentsiamet.ee/sites/default/files/kooskolastatud\\_tootmishinna\\_d\\_23.05.2023.pdf](https://www.konkurentsiamet.ee/sites/default/files/kooskolastatud_tootmishinna_d_23.05.2023.pdf)