



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**PAIDE KOOSTOOTMISJAAMA ELEKTRI JA
SOOJUSE TOOTMISE TÕHUSUSE TÕSTMISE
UURING**

**COST-EFFECTIVENESS ANALYSIS OF INCREASING
PAIDE COMBINED HEAT AND POWER PLANT
EFFICIENCY**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Ado Viisut

Üliõpilaskood: 193538EAAB

Juhendaja: Reeli Kuhi-Thalfeldt, vanemlektor

Tallinn 2022

(Tiitellehe pöördel)

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.

"....." 20.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 20.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."20.....

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Ado Viisut

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Paide koostootmisjaama elektri ja soojuste tootmise tõhususe tõstmise uuring, mille juhendaja on Reeli Kuhi-Thalfeldt,

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.

18.05.2022

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: Ado Viisut

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Paide koostootmisjaama elektri ja soojuste tõhususe tõstmise uuring

Kuupäev: 18.05.2022

54 lk

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): vanemlektor Reeli Kuhi-Thalfeldt

Sisu kirjeldus:

Lõputöö raames tutvustati ja uuriti AS Enefit Greenile kuuluvad Paide Koostootmisjaama võimalusi kasutada täiendavat jääksoojust suurendamiseks elektritoodangut. Eesmärgiks oli anda ülevaade võimalikest tehnoloogiatest ning välja selgitada nende mõju koostootmisjaama toodangule, koostootmise efektiivsusele ning anda ülevaade tehnoloogiate kasumlikkusest. EnergyPRO tarkvara abil modelleeriti hetkeolukorda iseloomustav mudel ning kaks alternatiivset mudelit. Esimeses alternatiivis lisati hetkeolukorrale soojussalvesti ning teises alternatiivis soojussalvesti, jahutustorn, absorptsioonjahuti jahutusenergia nõudlus.

Tulemustest selgus, et 2021 aasta andmete põhjal ei tasu ära sundjahutuse kasutamine, kuna elektrienergia toodangu kasvust saadav tulu on väiksem kui lisanduv kütusekulu selle tootmiseks. Hetkeolukorrale soojussalvesti lisamine olulisel määral koostootmise efektiivsust ega primaarenergia säästu ei parandanud. Alternatiiv 2 puhul paranes koostootmise efektiivsus, kuid primaarenergia sääst vähenes oluliselt, seda peamiselt kasuliku soojusenergia osakaalu vähenemisest kogutoodangust.

Tasuvusanalüüs koostati 19 aastase perioodi tulude ja kulude hindamiseks kõigi kolme mudeli kohta, mille tulemusel selgus, et kõige kasumlikum on hetkeolukorrale lisada soojussalvesti.

Märksõnad: koostootmisjaam, koostootmine, energyPRO, jääksoojuse vähendamine, tasuvusanalüüs, bakalaureuse töö.

ABSTRACT

<i>Author:</i> Ado Viisut	<i>Type of the work:</i> Bachelor Thesis
<i>Title:</i> Cost-effectiveness analysis of increasing Paide combined heat and power plant efficiency	
<i>Date:</i> 18.05.2022	54 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> Senior Lecturer Reeli Kuhi-Thalfeldt	
<p><i>Abstract:</i></p> <p>In this thesis the possibilities of Paide Cogeneration Plant owned by AS Enefit Green to use additional waste heat to increase electricity production were researched and introduced. The aim of this thesis was to provide an overview of possible technologies and to find out their impact on the production of cogeneration plant, the efficiency of cogeneration and to provide an overview of the profitability of these technologies. EnergyPRO software was used to model the current situation and two alternative models. In first alternative model, a thermal storage was added to the current situation and in the second alternative a heat storage, cooling tower, absorption chiller and cooling demand were added.</p> <p>The results showed that based on provided data of 2021 the use of cooling tower is not worthwhile, because the income from the growth of electricity production is smaller than the cost of additional fuel consumption for its production. The addition of a thermal storage to current situation did not significantly improve the efficiency of cogeneration or primary energy savings. In the case of Alternative 2, the efficiency of cogeneration improved, but the primary energy savings decreased significantly, mainly due to the decrease in the share of useful heat energy in total production.</p> <p>A cost-benefit analysis was carried out to assess the benefits and costs over a 19-year period for all three models, which showed that it is most profitable to add a heat storage device to the current situation.</p>	
<i>Keywords:</i> cogeneration plant, cogeneration, energyPRO, waste heat reduction, cost-benefit analysis, bachelor's thesis.	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema: **Paide koostootmisjaama elektri ja soojuse tootmise tõhususe tõstmise tasuvusuuring**

Lõputöö teema inglise keeles: **Cost-effectiveness analysis of increasing Paide Combined heat and power plant efficiency**

Üliõpilane: **Ado Viisut, 193538**

Eriala: **Elektroenergeetika**

Lõputöö liik: **Bakalaureusetöö**

Lõputöö juhendaja: **Reeli Kuhi-Thalfeldt**

Lõputöö kaasjuhendaja:
(ettevõtte, amet ja kontakt)

Lõputöö ülesande
kehtivusaeg: **2021/2022 Kevad**

Lõputöö esitamise tähtaeg: **18.05.2022**

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Paide koostootmisjaam (edaspidi KTJ) on keevkihttehnoloogial põhinev koostootmisjaam, mis rajati 2015. aastal. Jaama soojuslik võimsus on 8 MW ja elektriline võimsus 2 MW, kütuseks kasutakse hakkepuitu. Paide KTJ toodab aastas kuni 7,5 GWh elektrit ja 42 GWh soojust. Koostootmisjaama rajamise hetkel kehtis taastuvenergia toetuskeem, kus võrku müüdud elektrienergia eest makstakse toetust hinnaga 53,7 €/MWh ning seda 12 aasta jooksul tööle hakkamisest. Toetuskeemist tulenevalt on Paide KTJ-l otstarbekas maksimeerida elektrivõrku müüdud elektrienergia kogust. Suvel tekib aga olukord, kus soojuskoormus langeb vähenenud nõudluse tõttu, mis omakorda tähendab, et väheneb ka elektrienergia toodang. Olukorra parandamiseks oleks vaja jääsoojusele leida mingisugune väljund, mis lubaks tõsta KTJ koormust. Samas tuleb kinni pidada töhusa koostootmise nõudest, mis on toetuse saamise eelduseks. Teema on muutunud eriti aktuaalseks, kuna käesoleval aastal on

elektri hinnad olnud väga kõrged. Koostootmisjaama elektrienergia toodangu suurenedes suureneks ka taastuvatest energiaallikatest toodetud elektrienergia kogus. Antud lõputöö uurib võimalusi Enefit Green AS Paide KTJ jääksoojuse kasutamiseks ning toob välja erinevate lahenduste tasuvusvõrdluse. Lõputöö tulemused võiksid huvi pakkuda ka teistele sarnase tehnoloogiaga koostootmisjaamade omanikele

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on uurida, mil määral on võimalik Paide KTJ elektri ja soojuse koostootmist muuta tõhusamaks ja kasumlikumaks realiseerides jääksoojust erinevate tehniliste lahenduste abil.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- Milline oleks üleliigse jääksoojuse jahutamise mõju elektrienergia toodangule ja tõhusa koostootmise nõude täitmisele?
- Milline oleks soojussalvesti mõju elektrienergia toodangule ja tõhusa koostootmise nõude täitmisele?
- Milline oleks kaugjahutuse pakkumise mõju elektrienergia toodangule ja tõhusa koostootmise nõude täitmisele?
- Milline tehniline lahendus oleks Paide KTJ jaoks kasumlikum?

4. Lähteandmed

Töös kasutatava energyPRO tarkvara sisendandmeteks elektri- ja soojusenergia ning jahutuse tarbimise ja tootmise modelleerimiseks vajalikud tehnilised andmed nagu näiteks välistemperatuuri ja soojuskoormuse tunnipõhised mõõteandmed, elektrituru hinnad, tootmisvõimsused, kasutegurid, investeringute maksumused, kütusekulu ja maksumus, jooksvad kulud. Vajalikud andmed saadakse suures osas Enefit Green AS'lt, osad andmed nagu näiteks välistemperatuuri andmed energyPRO tarkvarast ning elektrituru hinnad Elering AS kodulehelt.

5. Uurimismeetodid

Töö teoreetilise osa koostamiseks kasutatakse kirjanduse analüüsi. Püstitatud ülesannete lahendamiseks kasutatakse energyPRO tarkvara, mille abil koostatakse erinevaid mudelid elektri- ja soojusenergia ning jahutuse tarbimise ja tootmise kohta ning teostatakse tasuvusanalüüs.

6. Graafiline osa

Peamisteks joonisteks on tulemused energyPRO erinevatest mudelitest soojus- ja elektrienergia tootmise, jahuti, soojussalvesti ning kaugjahutuse kasutamise kohta, rahavoogude aruanded ja tasuvuse graafikud, võrdlevad tabelid tulemuste kohta.

7. Töö struktuur

Sisukord

Lõputöö ülesanne

Eessõna

Sissejuhatus Paide KTJ hetke olukord

Erinevate jääksoojuse kasutamise tehnoloogiate tutvustus

EnergyPRO mudeli tööpõhimõte

Tulemused

- Jääksoojuse jahutamise kasutamise otstarbekus
- Soojussalvesti kasutamise otstarbekus
- Kaugjahutuse pakkumise otstarbekus
- Erinevate lahenduste tasuvuse võrdlev analüüs
- Järeldused

Kokkuvõte

Kasutatud kirjandus

Lisad

8. Kasutatud kirjanduse allikad

T. Toomla, „Keskmise suurusega biokütusel töötava koostootmisjaama käivitamise ja eksploatatsiooni kogemus Paide Koostootmisjaama näitel“ [Magistritöö], Mehaanikateaduskond, TalTech, Tallinn, Eesti, 2014 E. – J. Petrov, „Kaugjahutuse sidumine koostootmisega Mustamäe koostootmisjaama näitel“ [Bakalaureusetöö], Inseneriteaduskond, TalTech, Tallinn, Eesti, 2014 Elektrituruseadus <https://www.riigiteataja.ee/akt/116122016010?dbNotReadOnly=true>

9. Lõputöö konsultandid

Konsultandid puuduvad.

10. Töö etapid ja ajakava

01.12.2021	Kirjanduse läbitöötamine
01.01.2022	Sissejuhatus ja teoreetiline osa
01.02.2022	Modelleerimise teostamine
01.03.2022	Tasuvusanalüüs
14.03.2022	Tulemuste analüüsimine
28.03.2022	Järeldused ja kokkuvõte
11.04.2022	Esimene versioon juhendajale lugemiseks
02.05.2022	Parandatud versioon juhendajale lugemiseks

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

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
EESSÕNA	11
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	12
SISSEJUHATUS	13
1. Paide Koostootmisjaama hetke olukord.....	14
2. Erinevate jääsoojuse kasutamine tehnoloogiate tutvustus	18
2.1 Soojussalvesti	18
2.2 Sundjahutus	21
2.2.1 Märgjahuti.....	21
2.2.2 Kuivjahuti.....	22
2.2.3 Hübriidjahuti.....	23
2.3 Kaugjahutus.....	24
2.3.1 Absorptsioonjahuti.....	25
3. EnergyPRO mudeli tööpõhimõte.....	28
3.1 Paide KTJ hetkeolukorra modelleeriline	28
3.2 Alternatiiv 1: Paide KTJ mudel soojussalvestiga	33
3.3 Alternatiiv 2: Paide KTJ koos soojussalvesti, sundjahutus ja absorptsioonjahutiga	35
4. Tulemused.....	38
KOKKUVÕTE	46
KASUTATUD KIRJANDUS	48
LISA 1. Paide koostootmisjaama toomisandmed.	50
LISA 2. Viiteväärtused erinevatele kütustele elektrienergia eraldi tootmisel.....	51
LISA 3. Viiteväärtused erinevatele kütustele soojusenergia eraldi tootmisel	52
LISA 4. Modelleritud mudelite 2021. aasta kulud.	53

EESSÕNA

Bakalaureuse töö valik on seotud isikliku huvi koostootmise vastu, millega sai algust tehtud 2021 aasta suvel praktika käigus Paide koostootmisjaamas. Teema on aktuaalne, kuna üha rohkem rõhku pannakse energeetika sektoris efektiivsusele. Suvine koostootmise efektiivsus on väga madal ning jääksoojusele väljundi leidmine on kasuteguri suurendamisel võtmetähtsusega. Lisaks eeltoodule on elektrienergia hind viimase 2 aasta jooksul oluliselt kasvanud ning elektrienergia toodangu suurendamine on koostootmisjaama rahavoogude suurendamisel tähtsal kohal. Lõputöö idee valikule andis kindlust juurde õpingute käigus Reeli Kuhi-Thalfeldti poolt juhendatud haja- ja taastuvenergeetika aine raames saadud kogemus, mis kaasnes energyPRO tarkvara abil erinevate energiasüsteemide modelleerimisega.

Töös kasutatud andmed pärinevad Paide Koostootmisjaamast. Lõputöö idee ja ülesehitusel olid suureks abiks Paide Koostootmisjaama tootmisjuht Tõnis Vajakas ning AS Enefit Greeni koostootmise käidu- ja tehnikajuht Igor Spakov.

Soovin tänada oma juhendajat Reeli Kuhi-Thalfeldti panustatud aja ning positiivse ja sisuka koostöö eest.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

KTJ - Koostootmisjaam

PES – primaarenergia sääst

CHP_{Hη} – kasuliku soojuse kasutegur

REF_{Hη} – soojuse eraldi tootmise viiteväärtus

CHP_{Eη} – koostoodetud elektrienergia kasutegur

REF_{Eη} – elektrienergia eraldi tootmise viiteväärtus

SISSEJUHATUS

Taastuenergiast elektri ja soojuse tootmine on päevakorda tõusnud viimastel aastakümnetel, kus kogu maailm võtab järjest ette samme, et muutuda kliimasõbralikumaks ning efektiivsemaks. Kui Eestis on viimastel aastatel väga suures koguses rajatud tuule- ja päikeseelektrijaamasid, siis koostootmisjaamade rajamine ei ole olnud nii populaarne. See võib-olla tingitud mitmetest asjaoludest. Kindlasti on koostootmistehnoloogia suurimaks puuduseks soojusenergiale väljundi leidmine. Koostootmisjaamasid rajatakse tarbijate vahetusse lähedusse.

2020. aasta teisel poolel ja 2021. aastal on elektri hind Eestis teinud märkimisväärse tõusu, mis on päevakorda tõstatanud küsimuse, kuidas saaksid koostootmisjaamad suurendada oma elektritoodangut, kuna soojusenergia vajadus on aastate lõikes suhteliselt stabiilne, siis on koostootmisjaamadel üsna raske suurendada oma elektrienergia tootmist. Elektrienergia toodangu suurendamine on tähtis ka kasumlikkuse seisukohalt, kuna taastuenergiast allikatest toodetud elektrienergia eest makstakse ka taastuenergiast toetust. Suurendamiseks elektrienergia toodangut on koostootmisjaamadel vaja leida väljundeid jääsoojusele. Jääsoojusele väljundeid otsides tuleb aga kinni pidada kõikidest seadustest ja regulatsioonidest.

Antud bakalaureuse töös on vaatluse alla võetud AS Enefit Green koostootmisjaam Paides. Töö käigus vaadeldakse Paide koostootmisjaama võimalusi rakendamaks erinevaid jääsoojuse kasutamise tehnoloogiaid ning analüüsitud nende mõju tootmisandmetele ning teostatud tasuvusanalüüs. Bakalaureuse töö käigus otsitakse vastuseid järgmistele probleemidele:

- Milline oleks soojussalvesti mõju elektrienergia toodangule ja tõhusa koostootmise nõude täitmisele?
- Milline oleks kaugjahutuse pakkumise mõju elektrienergia toodangule ja tõhusa koostootmise nõude täitmisele?
- Milline tehniline lahendus oleks Paide KTJ jaoks kasumlikum?

Esitatud küsimustele saadakse vastused läbi hetkeolukorra ja kahe alternatiivse mudeli modelleerimise energyPRO tarkvara abil. Tarkvara abil modelleeritakse tehnoloogiapõhised tootmisgraafikud ning antakse ülevaade rahavoogudest. Töö eesmärgiks on välja selgitada, kas ja mil määral on koostootmisjaama võimalik kasumlikumaks muuta jääsoojuse rakendamise abil maksimeerimaks elektritoodangut.

1. Paide Koostootmisjaama hetke olukord

Paide koostootmisjaam (edaspidi KTJ) on keevkihttehnoloogial põhinev koostootmisjaam, mis rajati 2015. aastal. Jaama maksumus oli umbes üheksa miljonit eurot, millest 3,2 mln kattis Keskkonnainvesteeringute keskuse toetus [1]. Paide KTJ soojuslik võimsus on 8 MW ja elektriline võimsus 2 MW. Paide koostootmisjaam sai ehitatud katma Paide linna baassoojuskoormust asendamaks vanu DKVR tüüpi aurukatlaid, mis töötasid põlevkiviõlil. Tipukoormust katab olemasolev 1992. aastal Wärtsila poolt ehitatud hakkepuidul töötav pöörleva restkoldega katlamaja, mille soojuslikuks võimsuseks on 8 MW ning LNG-tipukatel 8 MW. Paide koostootmisjaamas kasutatakse kütuseks peamiselt hakkepuitu, kuid kuni 10% ulatuses on võimalik põletada ka turvast, tipukatel töötab vedeldatud maagaasil. [2]

Joonis 1.1 on kujutatud Paide koostootmisjaama alla kuuluvad erinevad tootmishooned ning kaks vana kütusemahutit, mis on võimalik ümber ehitada soojussalvestiteks.



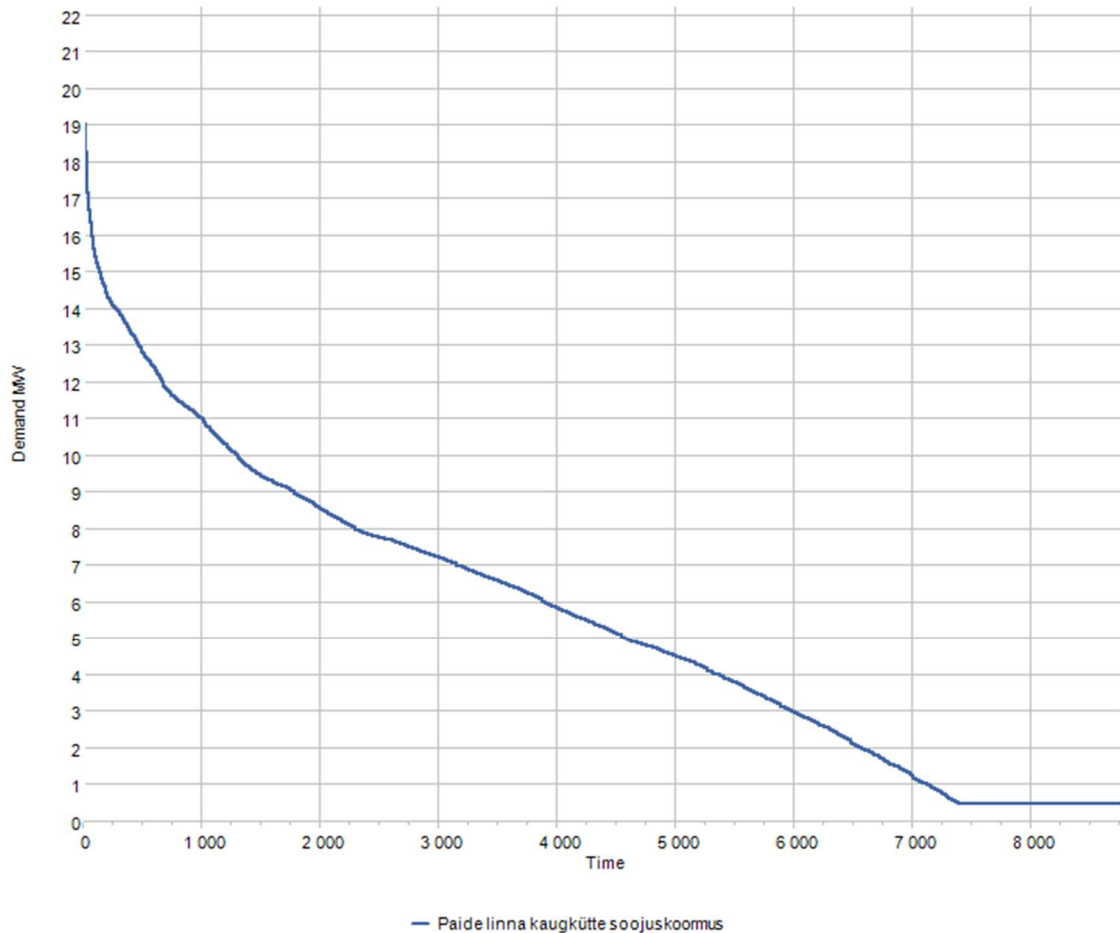
Joonis 1.1. Paide koostootmisjaama hooned. 1 - Wärtsilä katlamaja, 2 - Paide KTJ hoone, 3 - Vanad kütusemahutid, 4 - LNG tipukatel

Aastal 2021 oli Paide koostootmisjaamas aastane soojusenergia toodang kokku 36 216 MWh ning elektrienergia toodang 8 889 MWh. Aastane koostootmise efektiivsus 61%. Paide KTJ suvine koostootmise ja elektritootmise efektiivsus suvel on oluliselt madalam kui kütteperioodil. Vahe on peaaegu kahekordne. Tabel 1.1 on välja toodud Paide koostootmisjaama 2021. aasta tootmisandmed kuude lõikes. Suvisel ajal elektritoodangu suurendamiseks on vaja leida aga väljund ka soojusenergiale. Suvel soojuskoormust tõstes kasvaks ka koostootmisjaama üldine kasutegu, mis on tingitud asjaolust, et generaator töötab suuremal koormusel suurema kasuteguriga. Toodetud elektritoodang iseloomustab elektrivõrku müüdnud elektrienergiat ning soojusenergia hulk Paide soojusvõrku müüdnud soojusenergiat. Koostootmise ja elektritootmise efektiivsusel ei ole arvestatud Paide KTJ omatarvet.

Tabel 1.1. Paide KTJ 2021 kuupõhised tootmisandmed

PAIDE KTJ TOOTMISANDMED 2021	jaan	veebr	märts	aprill	mai	juuni	juuli	aug	sept	okt	nov	dets	Kokku
Elektritoodang (müük) (MWh)	1315	1072	1215	804	240	237	200	270	610	839	847	1239	8889
Soojusetoodang (müük) (MWh)	5073	4632	5436	3283	1151	918	686	1098	2335	3075	3645	4885	36216
Tarbitud kütus (t)	2888	2939	3892	2536	773	809	829	1153	1445	2324	2296	3211	25095
Primaarenergia (MWh)	8043	8388	10268	6803	2213	2401	2784	3866	4417	6353	6125	8038	69698
Koostootmise efektiivsus (%)	79,4%	68,0%	64,8%	60,1%	62,9%	48,1%	31,8%	35,4%	66,7%	61,6%	73,3%	76,2%	60,7%
Elektritootmise efektiivsus (%)	16,3%	12,8%	11,8%	11,8%	10,9%	9,9%	7,2%	7,0%	13,8%	13,2%	13,8%	15,4%	12,0%

Joonis 1.2 on kujutatud Paide linna kaugkütte soojuskoormusgraafikut, mis on modelleeritud vastavalt AS Enefit Greeni poolt Paide linnale müüdnud soojusenergiale. Soojusgraafik miinimum määr on võetud võrdeliseks 0,5 MW, kuna see on minimaalne soojuskoormus, mis suvel kulub sooja vee tarbimise ja soojuskadude katmiseks. 2021. aastal oli Paide linna maksimaalne soojuskoormus 19 MW. Suurem osa aastast jääb soojuskoormus vahemikku 4-10 MW.



Joonis 1.2. Paide linna kaugkütte aastane soojuskoormusgraafik

Lisas 1 välja toodud tabelist selgub, et Enefit Green tootis 2021. aastal 49 329 MWh soojusenergiat, millest KTJ toodang oli 36 216 MWh, mis moodustas kogutoodangust 73%, Wärtsilä katlamaja soojustoodang 11935 MWh ning gaasikatel 1 178 MWh, lisaks soojusele tootis KTJ võrku 8 889 MWh elektrienergiat. Enim soojusenergiat müüdi detsembris ja elektrienergiat toodeti enim jaanuari kuus. 2021. aasta jooksul muutus KTJ koostootmise efektiivsus vahemikus 79,4% – 31,8%, suurim efektiivsus saavutati jaanuaris ning vähim juulis. Wärtsilä katlamaja efektiivsus muutus vahemikus 73-87%. Juuni algusest kuni septembri lõpuni oli Wärtsilä katlamaja suletud. Gaasikatelt ei kasutatud juunist kuni novembrini. Aasta jooksul kulus 29 643 tonni hakkepuitu, 1 483 tonni puukoort ning 124 658 nm³ maagaasi.

Paide KTJ rajamise hetkel kehtis taastuvenergia teotusskeem, mille kohaselt võrku müüdüd elektrienergia eest makstakse toetust 53,7 €/MWh ning seda 12 aasta jooksul tööle hakkamisest. Toetusskeemist tulenevalt on Paide koostootmisjaamal otstarbekas maksimeerida elektrivõrku müüdüd elektrienergia kogust. Suvel tekib aga olukord, kus vähenenud nõudluse tõttu langeb soojuskoormus, mis omakorda tähendab, et väheneb

elektrienergia toodang ning tootmise kasutegur. Olukorra parandamiseks tuleks leida jääksoojusele väljund, mis lubaks tõsta koostootmisjaama koormust. Samas tuleb kinni pidada tõhusa koostootmise nõudest, mida jälgib Konkurentsiamet. Koostootmist loetakse tõhusaks, kui aruandlus perioodi üldkasutegur on vähemalt 75% ning valemiga 1 arvutatud primaarenergia sääst on vähemalt 10%.

$$PES = \left\{ 1 - \frac{1}{\frac{CHP_{H\eta}}{REF_{H\eta}} + \frac{CHP_{E\eta}}{REF_{E\eta}}} \right\} \cdot 100\% \quad (1)$$

kus

PES – primaarenergia sääst

$CHP_{H\eta}$ – kasuliku soojuse tegur – viimase 12 kuu kasuliku soojust toodang jagatud kütuseenergiaga, mis kulus kasuliku soojuse ja elektri koostootmiseks

$REF_{H\eta}$ – soojuse eraldi tootmise viiteväärtus;

$CHP_{E\eta}$ – koostoodetud elektrienergia kasutegur – koostoodetud elektrienergia viimase 12 kuu kogus jagatud kütuseenergiaga, mis kulus kasuliku soojuse ja elektri koostootmiseks;

$REF_{E\eta}$ – elektrienergia eraldi tootmise viiteväärtus. [3]

2. Erinevate jääksoojuse kasutamine tehnoloogiate tutvustus

Käesolevas peatüki eesmärk on tutvustada ning anda ülevaade seadmetest ja tehnoloogiatest, mille abil oleks võimalik jääksoojust kasutada ning selle realiseerimise tulemusel suurendada elektrienergia toodangut koostootmise teel. Lisaks tehnoloogiate tutvustamisele antakse ülevaade tehnoloogia integreerimisel süsteemiga kaasnevate kulude ülevaade ja võimalik suurus.

2.1 Soojussalvesti

Soojussalvesti kujutab endast seadet, kus salvestamisel juhitakse soojust salvestavale ainele ning soojuse kasutamisel eemaldatakse salvestatud soojusenergia salvestist. Soojussalvestite integreerimine energiasüsteemidesse võimaldab soojusenergia toodangut juhtida vastavalt vajadusele, mis omakorda võimaldab süsteemi muuta efektiivsemaks.

Soojussalvestid võib jagada salvestusmehhanismi järgi kolmeks erinevaks tehnoloogiaks:

- faasimuutuseta salvestid;
- faastimuutusega salvestid;
- keemilised salvestid.

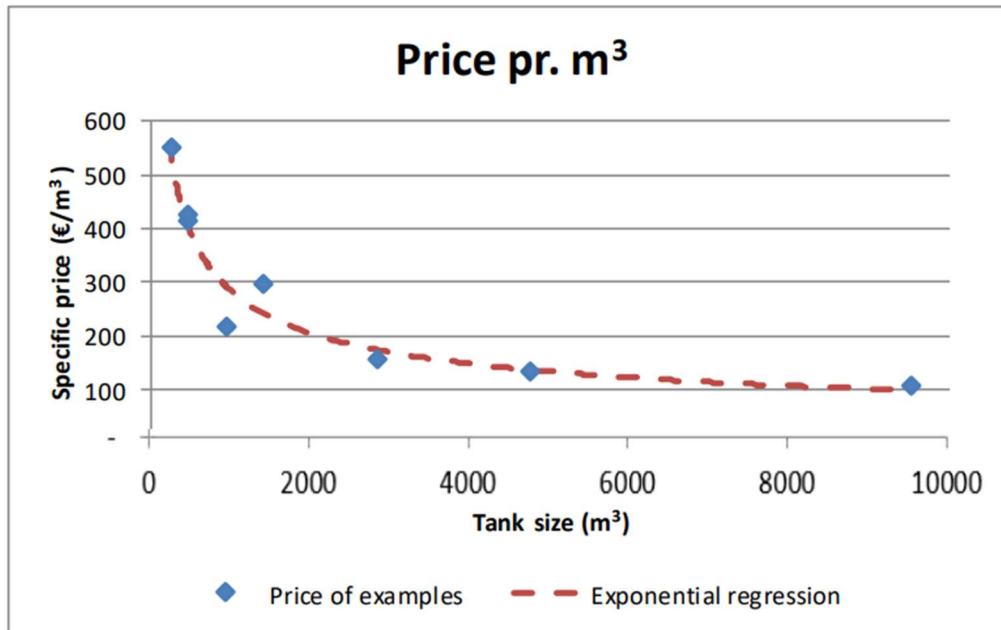
Faasimuutuseta salvestid tuginevad salvestusmaterjali soojusmahtuvusele. Peamiseks salvestusmaterjaliks on vesi oma suure soojusmahtuvuse, odavuse ja keskkonnasõbralikkuse tõttu.

Faasimuutusega salvestite põhimõte seisneb ainete agrekaatoleku muutusel. Selle tehnoloogia omapäraks on võimalus soojust salvestada ligikaudu konstantsel temperatuuril, mis vastab materjali faasimuutuse temperatuurile. Peamiseks puuduseks faasimuutusega salvestamise puhul on materjalide madal soojusjuhtivustegur, mille tulemusel soojuse salvestamine ja salvestatud soojuse tarbimise protsess on aeglane.

Keemilise salvestite puhul on tähtis, et keemilised reaktsioonid oleksid täielikult pöörduvad. Soojust salvestisse juhtides toimub endotermiline reaktsioon ning kui reaktsioon on täielikult pöörduv, siis soojus vabaneb eksotermilise reaktsiooni käigus. Üldjuhul kasutatakse katalüsaatorit eelnimetatud protsesside läbiviimiseks ja juhtimiseks. [4]

Taani turul domineerivad faasimuutuseta veel põhinevad soojussalvestid peamiselt oma hinna, lihtsuse ja vee kui salvestusmaterjali mitmekülgsuse tõttu. Faasimuutuseta soojussalvestite mahutid võivad olla ehitatud terasest, betoonist või klaas-fibriiga tugevdatud plastikust. Salvestussüsteemide energiatõhususe suurendamiseks täidetakse suuremahulised veepaagid tihti kaugküttevõega, mille pH on 9,8 juures vältimaks rooste teket. Alternatiivse lahendusena täidetakse mahutid pH-neutraalse veega, mis nõuab aga täiendavad soojusvahetit ja surve tõstmise süsteemi korrosiooni vältimiseks. Täiendavate soojuskadude vältimiseks soojustatakse soojussalvestite mahuteid lühiajalise salvestamise puhul umbes 300 mm ja pikaajalise salvestamise puhul 450 mm paksuse isolatsiooniga. [5]

Viimasel kümnendil on hakatud Taanis kasutatama terasest faasimuutuseta soojussalvesteid lühiajaliseks soojuse salvestamiseks enamikes biomassil töötavates koostootmisjaamades, et juhtida nende tööd ja vähendada emissioone. Faasimuutuseta soojussalvestite populaarsus on tingitud nende teada-tuntud tehnoloogiast, kaugküttesüsteemide töötamise paindlikkuse tõstmisest, teatud juhtudel rõhu hoidmisest kaugküttesüsteemides, soojuse kulutõhusast salvestamisest ning madalast investeringukulust. Veel põhineva faasimuutuseta soojussalvestite investeringukulu iseloomustab Joonis 2.1, millelt on näha, et salvesti investeringu suurus väheneb salvesti mahu suurenedes eksponentsiaalselt. [5]



Joonis 2.1. Veel põhineva faasimuutuseta soojussalvesti investeeringu suuruse sõltuvus salvesti mahust [5]

Kaugküte on efektiivne lahendus pakkumaks soojusenergiat tarbijatele. Kaugkütte võrk soojust toodetakse tihti koostootmisjaamade kaudu, mis katavad üldjuhul soojusvajaduse baaskoormust. Tipukoormus kaetakse üldjuhul kateldegaga. Soojussalvesti integreerimisega koostootmisjaamadega on võimalik suurendada koostootmisjaama aastaseid töötunde. Soojust on võimalik toota rohkem kui tarbimine on madal ning salvestada seda soojussalvestisse. Soojussalvestistesse talletatud soojusenergiat on võimalik kasutada kui tootmine on kõrgem, mis omakorda vähendab tipukatelde töökoormust. Soojussalvestite integreerimine koostootmisjaama süsteemi silub koostootmisjaama tootmiskõverat, näiteks katmaks hommikuseid koormustippe öösel salvestatud energiaga või õhtuseid koormustippe päeval salvestatud energiaga. Soojuse salvestamise periood sõltub soojusnõudlusest ja varieerub mõnest tunnist kuni paari nädalani. Suurendades koostootmisjaama soojusenergia toodangut suureneb ka elektrienergia toodang, mis omakorda parandab koostootmisjaama üldist kasutegurit.

Lisaks eeltoodud eelistele aitab soojussalvesti integreerimine koostootmisjaama süsteemi soojus- ja elektrienergia toodangut juhtida. Toodangu juhtimine on üks võimalus parandamiseks koostootmisjaama kasumlikkust. Madala elektrihinna juures on võimalik soojust salvestada ning seda müüa kui elektrihind on kallis. Ž. Bogdani ja D. Kapjari poolt Zagrebi koostootmisjaamas 2006 aastal läbi viidud uuringu käigus selgus,

et soojussalvesti integreerimise tagajärjel elektrienergia toodang langes, kuid kasumlikkuse tõusis [6].

2011. aastal viidi läbi uuring Itaalia linnas Turinis, kus uuriti soojussalvestite mõju koostootmisjaama primaarenergia tarbimisele ja rahavoogudele. Selgus, et soojussalvestite kasutamine antud uuringus vähendas primaarenergia tarbimist kuni 12% ning kogukulused umbes kuni 5%. [7]

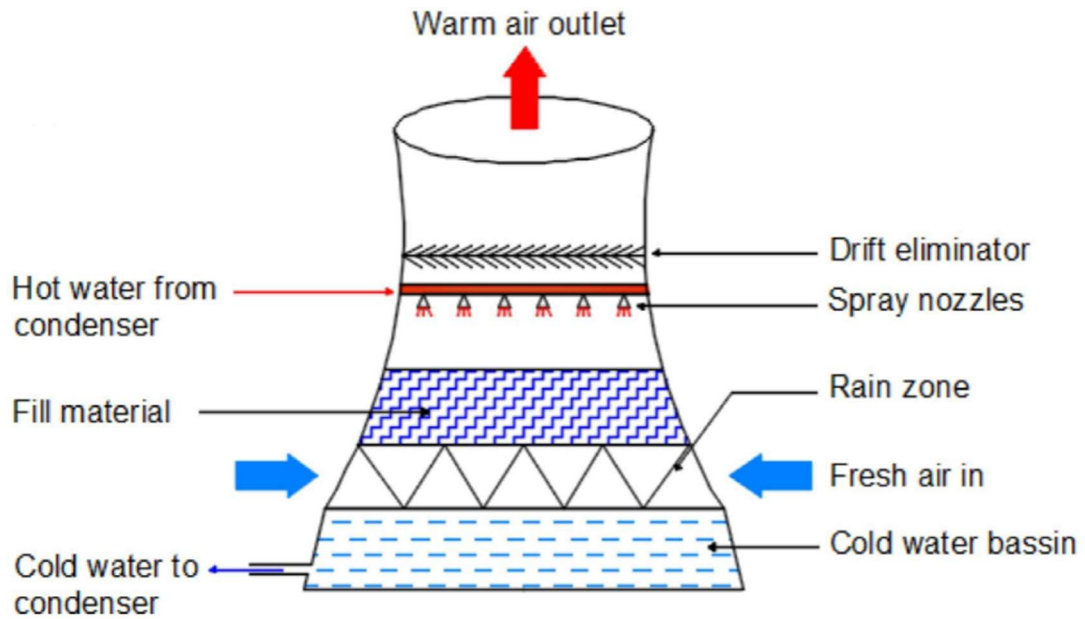
2.2 Sundjahutus

Suurendamaks elektrienergia toodangut koostootmisjaamas madala soojusnõudluse ajal on üheks võimaluseks jääksoojus keskkonda juhtida. Jahutustornid on asendamatud komponendid energiasüsteemide juhtimaks töövedeliku jääksoojust ümberkaudsesse keskkonda. Eristatakse peamist kolme tüüpi jahutustorne, milleks on märgjahutus-, kuivjahutus- ja hübriidjahutustornid, mis on märg- ja kuivjahutustornide kombinatsioon [8].

2.2.1 Märgjahuti

Märgjahutustornid ehk gradiirid töötavad põhimõttel, et aurustumisel neeldub energia, mis on nende üheks eeliseks võrdluses kuivjahutustornidega. Märgjahutustornides on jahutusvedelik vahetus kontaktis õhuga, mistõttu soojuseülekanne toimub nii otse ülekandena soojenenud jahutusvedelikult õhku, kui ka töövedeliku aurustumisel energia ülekandumisega. [8]

Kondensaatorist pumbatakse kuum vesi jahutustorni ülemisse ossa läbi jaotustorustiku. Jaotustorustikust pihustatakse kuum vesi jahutustorni, mille tõttu tekib otsekontakt sooja vee ja jahedama õhuvoolu vahel, mille tulemusel soojus eemaldub aurustumisprotsessi käigus. Torni ülaosas asuvad triivimisfiltrid, mis püüavad veeauru õhust, et takistada liigset veekadu protsessi käigus. Torni keskosa täidab täitematerjal. Kuum vesi pihustitest ja kondenseerunud vesi triivimisfiltritest langeb täitematerjalile. Jahutatud vesi kogutakse seejärel kokku torni põhjas asuvasse basseini, kust see pumbatakse tagasi kondensaatorisse, et seda uuesti kasutada. Märgjahutustorni ehitust ja tööprotsesse iseloomustab Joonis 2.2. [8]



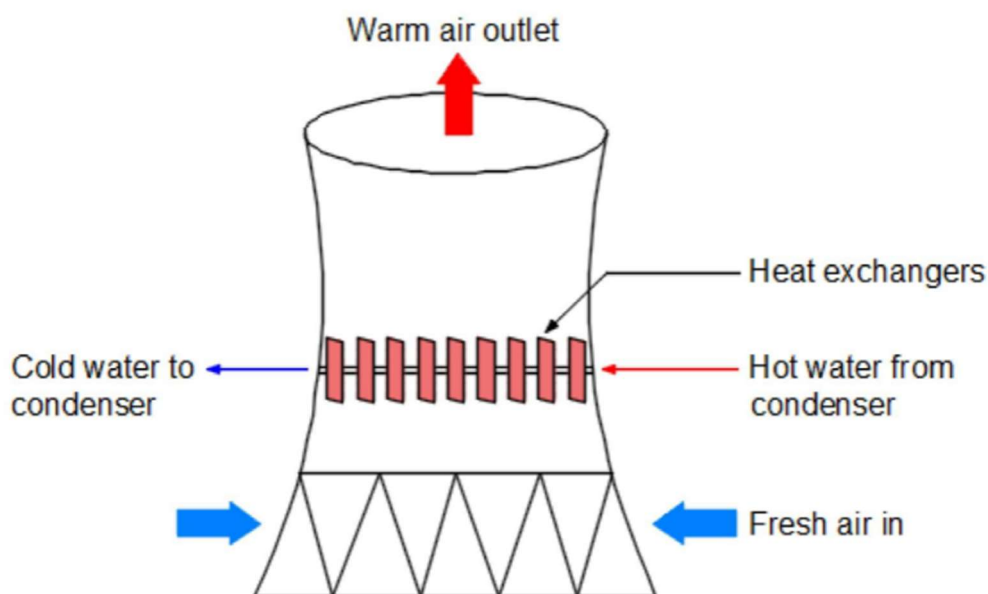
Joonis 2.2. Märgjahutustorni ehitus [8]

Märgjahutustorni efektiivsus sõltub peamiselt täitematerjali võimest maksimeerida kontaktpinda ja kokkupuuteaega vee ja õhu vahel. Märgjahutustornide üheks suurimaks eeliseks on nende suhteliselt suur jahutusvõimsus. Peamiseks puuduseks on seevastu suur veekadu aurumisel, mis muudab veevarustuse olemasolu väga tähtsaks nende töö tagamisel. Kuna vesi sisaldab looduslikult lahustunud mineraale, siis pideva aurustumisprotsessi käigus vesi kontsentreerub. Jahutustorni töö tagamiseks on vajalik pidev vee töötlus, jahutustornide keemilist töötlemine ning hooldamine. [8]

2.2.2 Kuivjahuti

Kuivjahutustorn on jahuti, kus välisõhk ei puutu otseselt kokku töövedelikuga. Soojusülekanne toimub vaid kompaktsete soojusvahetite kaudu, mille torudes voolab vesi ja õhk liigub läbi soojusvahetite rivide. Õhk kuivjahutis pannakse liikuma mehaaniliste tõmbeventilaatorite abil või teeb seda looduslik tõmme. Üldjuhul eelistatakse loomuliku tõmbega kuivjahutustorne mehaaniliste tõmbetornidele, kuna ventilaatorite käitamisega kaasneb suurem omatarve, veetarve ja oht keskkonna reostuseks. Loodusliku tõmbega kuivjahutustorne iseloomustab väike veekulu, madal müratase, lihtne hooldus ja pikk kasutusiga. Loodusliku tõmbega kuivjahutustornide puudusteks on jahutusvõime sõltumine peamiselt loodusliku tõmbeefekti tekitatud konvektiivsest soojusülekandest, mis ei ole nii efektiivne kui seda on märgjahutustornide puhul. Loodusliku tõmbega kuivjahutustornide jahutusvõime

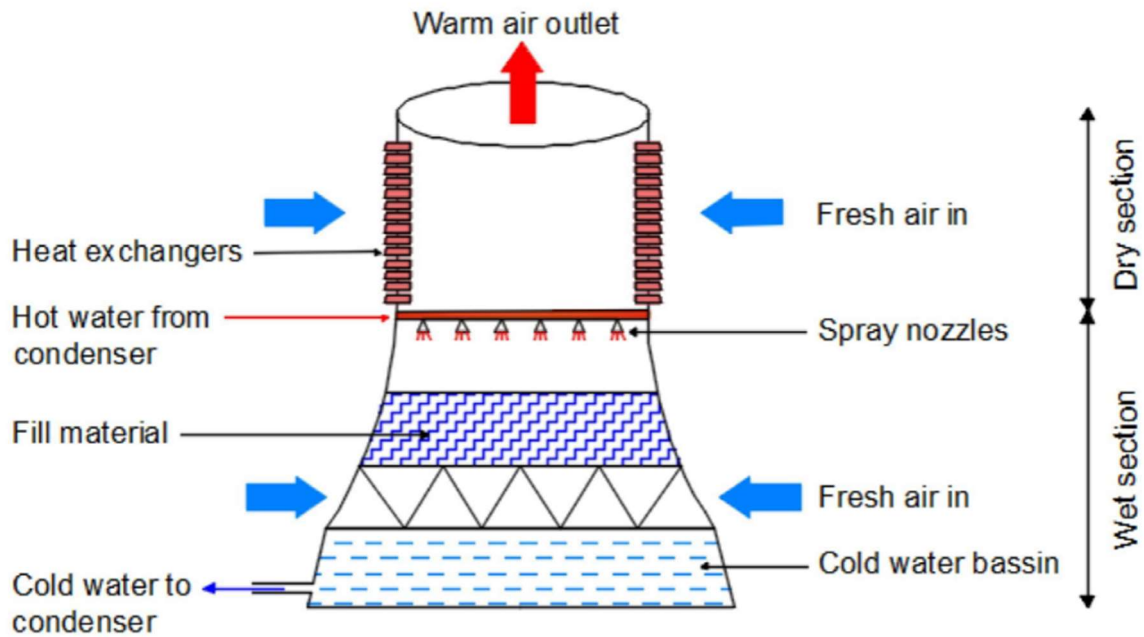
väheneb kõrge õhutemperatuuriga perioodide ja tugevate külgtuuletingimuste korral. Kuivjahutustornide ehitust ja tööd iseloomustab Joonis 2.3. [8]



Joonis 2.3. Kuivjahutustornide ehitus [8]

2.2.3 Hübriidjahuti

Hübriidjahutustorn kujutab endast märgjahuti ja kuivjahuti kombinatsiooni. Hübriidjahutustorni üheks suurimaks eeliseks on selle töö paindlikus. Juhul kui kuivjahuti sektsioon ei tööta, töötab märgjahuti sektsioon autonoomselt. Võrreldes märgjahutustorniga on hübriidjahutustornil väiksem veetarbe vajadus, kuid on suurema jahutusvõime ja efektiivsusega kui kuivjahutustornid. Hübriidjahutustornides kombineeritakse kuiv- ja märgjahutussektsioonide tööd järjestikku, paralleelselt või mõlema kombinatsioonina. Jadamisi ühenduse puhul läbib soe vesi esmalt kuivsektsiooni, kus osa soojusest eemaldatakse välisõhku. Pärast kuivsektsiooni pumbatakse vesi märgjahutussektsiooni, mille väljundist jahtunud vesi pumbatakse tagasi kondensaatorisse. Paralleelse konfiguratsiooni puhul on sooja vee pealevool jagatud kuivjahutus- ja märgjahutussektsiooni vahel. Kuivjahutussektsioonist tulev jahtunud vesi juhitakse edasi märgjahutuse segistitesse, kus see seguneb märgjahutussektsiooni suunatud veega. Hübriidjahutustorni ehitust ja tööpõhimõtet iseloomustab Joonis 2.4.



Joonis 2.4. Hübridjahutustorni ehitus [8]

2.3 Kaugjahutus

Kaugkütte süsteemides kasutatakse suurel määral tööstuses üle jäävat jääksoojust, millele ei leita väljundit madala soojuse tarbimisega perioodidel. Kuna soojusnõudlus on oluliselt määral seotud välisõhu temperatuuriga, siis sügiseti ja kevadeti, kui välisõhu temperatuur on hüplik, on suured ka koormuslikud kõikumised. Ebaühtlane koormusgraafik põhjustab ressursside ebaefektiivset kasutamist, mis omakorda pärsib kaugkütte investeeringute tasuvust. Kaugkütte soojuskoormust on võimalik ebaühtlastel perioodidel võimalik tõsta kaugjahutust pakkumisega kasutades soojusega käitatavaid absorptsioonjahuteid. Kaugjahutuse integreerimine kaugkütte süsteemiga aitab tõsta soojustarbimist, muuta ressursside kasutamise efektiivsemaks ning vähendada CO₂ emissioone. [9]

Nõudlus jahutusenergia järgi on püsivalt kasvanud mitte ainult Lõuna-Euroopas, vaid ka Põhjamaades. Jahutusenergia kasvu põhjusteks on peamiselt kliimatingimuste muutumine, kuid ka elanikkonna kasv, kõrgemad elustandardid ning elektriseadmete arvukuse kasv majapidamistes. Eestis on suurimaks kaugjahutuse pakkujaks Gren Eesti, kandes eelnevalt nime Fortum AS [10].

Kaugjahutust pakutakse peamiselt kahte eri tüüpi seadmetega, milleks on:

- kompressioonjahutusseadmed;
- absorptsioonjahutid.

Kompressioonjahutusseadmed on kõige levinumad elektrienergiat töötavad jahutuseadmed, mis on osaliselt süüdi suviti tekkivatest suurtest võimsustippudest.

Absorptsioonjahutid on seadmed, mis jääksoojuse toimet toodavad jahutusenergiat. Nende kasutamine kompressioonjahutite asemel aitab utiliseerida suurt jääksoojuse ressursi ning vähendada energia kulu jahutamiseks. Eriti suurt efektiivsust on võimalik saavutada integreerides absorptsioonjahutiteid koostootmise süsteemidega. [11]

Tabel 2.1. Jahutussüsteemide investeeringu ja hooldukulud [11]

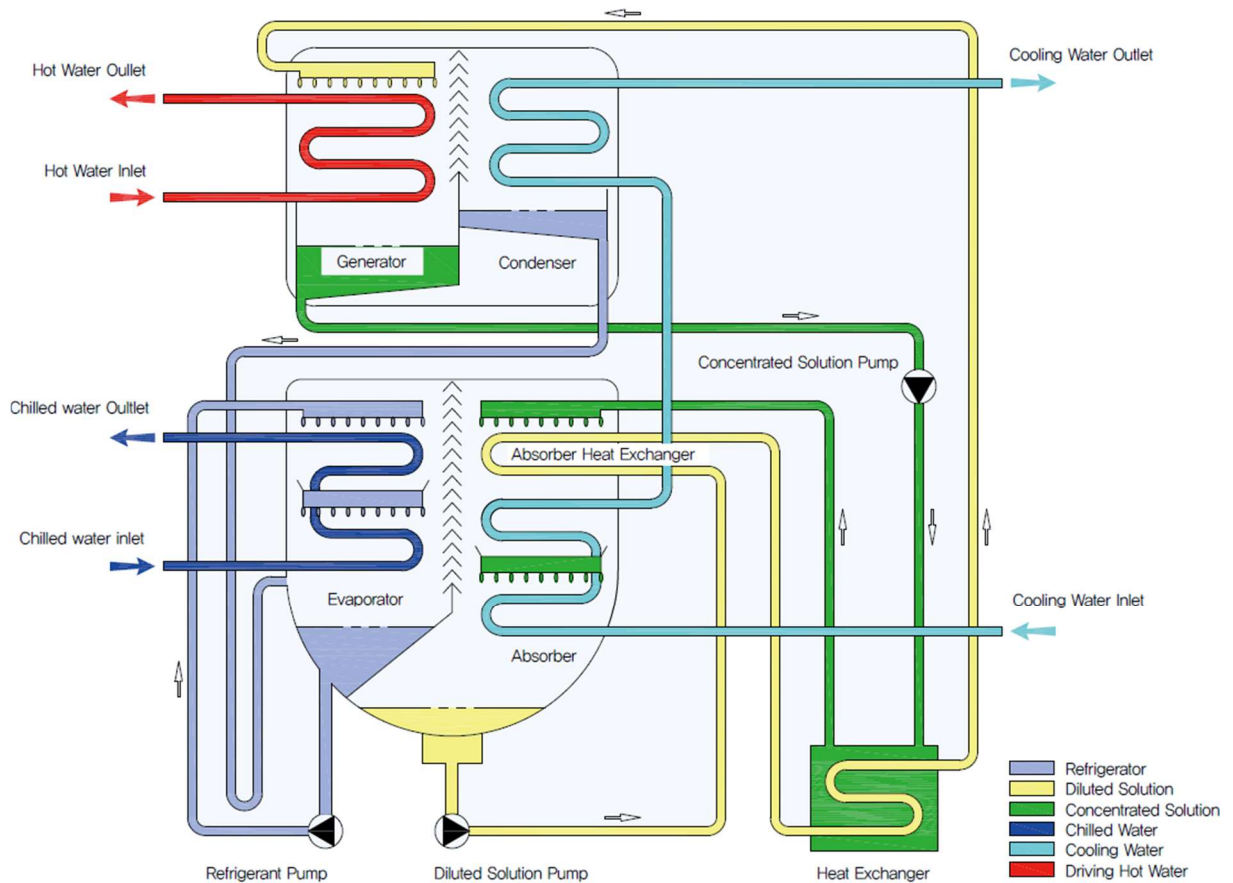
Jahuti tüüp	Investeeringu maksuvus (EUR/kW)	Aastase hoolduse maksuvus (EUR/kW)
Absorptsioonjahuti	120	3,6
Kompressioonjahuti	60	3
Jahutustorn	30	4,5

Mõningate uuringute tulemustel on leitud, et kütuse kasutamisel on absorptsioonjahutid 10% efektiivsemad kui kompressioonjahutid. Kui neid aga kasutada elektri, soojuse ning jahutuse koostootmisel ülejäävast soojusest, siis kuluefektiivsuse seiskohalt on nende kasutamine üks parimaid viise CO₂ emissioonide vähendamiseks. Võrreldes kompressioonjahutitega on absorptsioonjahutid kallim oma hooldus- ja paigalduskulude poolest (Tabel 2.1). Göteborgis läbi viidud uuringus leiti, et absorptsioonjahutid on kasumlikud juhul, kui neid kasutada jääksoojusel, jäätmetel või biomassil põhineva koostootmise soojusel. Suvekuudel kasvas soojuse tarve umbes 30% absorptsioonjahutite kasutuse tõttu. [11]

2.3.1 Absorptsioonjahuti

Absorptsioonjahutus on mitte-mehaaniline viis kasutamaks jääksoojust (kuum õhk, kuum vesi, aur, kuumad heitgaasid) jahutusenergia tootmiseks erinevate seadmetega. Absorptsioonjahutusseadmeid üldjuhul kasutatakse kaugkütte või koostootmise soojuse

toimel. Absorptsioonjahutite kasutegurid on üldjuhul madalad võrreldes teiste tehase like jahutusseadmetega, kuid nende eelis on just selles, et nad on võimelised oma tööks kasutama jääsoojust, mis vastasel juhul jääks lihtsalt kasutamata. Enamik absorptsioonjahutid süsteeme vajavad sisemise pumplahenduse jaoks mõningal määral elektrienergiat, kuid selle tarve on väga väike võrreldes elektrimootoril töötava kompressioonjahutiga. [9]



Joonis 2.5. Absorptsioonjahuti tööd iseloomustav skeem [12]

Tüüpiline absorptsioonjahuti koosneb generaatorist, absorberist, aurustist ja kondensaatorist. Vältimaks mehaanilist tööd peab soojusenergia sisend ümbruskonnast jahutussegu ja absorbendi lahustis tekitama kompressioon. Jahutussegul ja absorbendil on erinevad keemistemperatuurid. Soojusenergiat toimel aurustub jahutussegu lahustist samal ajal kui absorbent jääb vedelasse olekusse. Aurustunud jahutussegu liigub kondensaatorisse, kus see jahutusvee toimel kondenseerub taas vedelasse olekusse. Vedel absorbent aga läbib lahusti soojusvahetit ning suundub absorberisse. Peale kondensaatori läbimist jahutusvedelik liigub edasi läbi paisuseadme aurustisse, kus jahutusvedelik jahutab väliskeskonda ja muutub tagasi auruks. Seejärel liigub jahutusvedeliku aur absorberisse, kus see kondenseerub vedelikuks ja lahjendab

absorbenti. See lahusti pumbatakse tagasi generaatorisse. Absorptsioonijahuti töötsükli iseloomustab Joonis 2.5. Absorptsioonjahuti konstruktsioon, efektiivsus ja kulud sõltuvad suuresti absorptsioonjahutis kasutatava töövedeliku lahusest. Populaarseimad töövedeliku paarid on vesi-liitium bromiid ja vesi-amoniaak. [9]

3. EnergyPRO mudeli tööpõhimõte

EnergyPRO on Windowsi operatsioonisüsteemil töötav energeetika modelleerimise tarkvarapakett, mis on mõeldud erinevate kombineeritud tehno-majanduslike analüüside ja keeruliste soojus- ja elektrienergia süsteemide optimeerimise analüüsimiseks. EnergyPRO tarkvara võimaldab analüüsida laias valikus tehnilisi ja majanduslikke aruandeid, sealhulgas esitada simulatsiooni tulemusi graafiliselt, mis annab põhjaliku ülevaate keerukatest energiasüsteemide dünaamikast. [13]

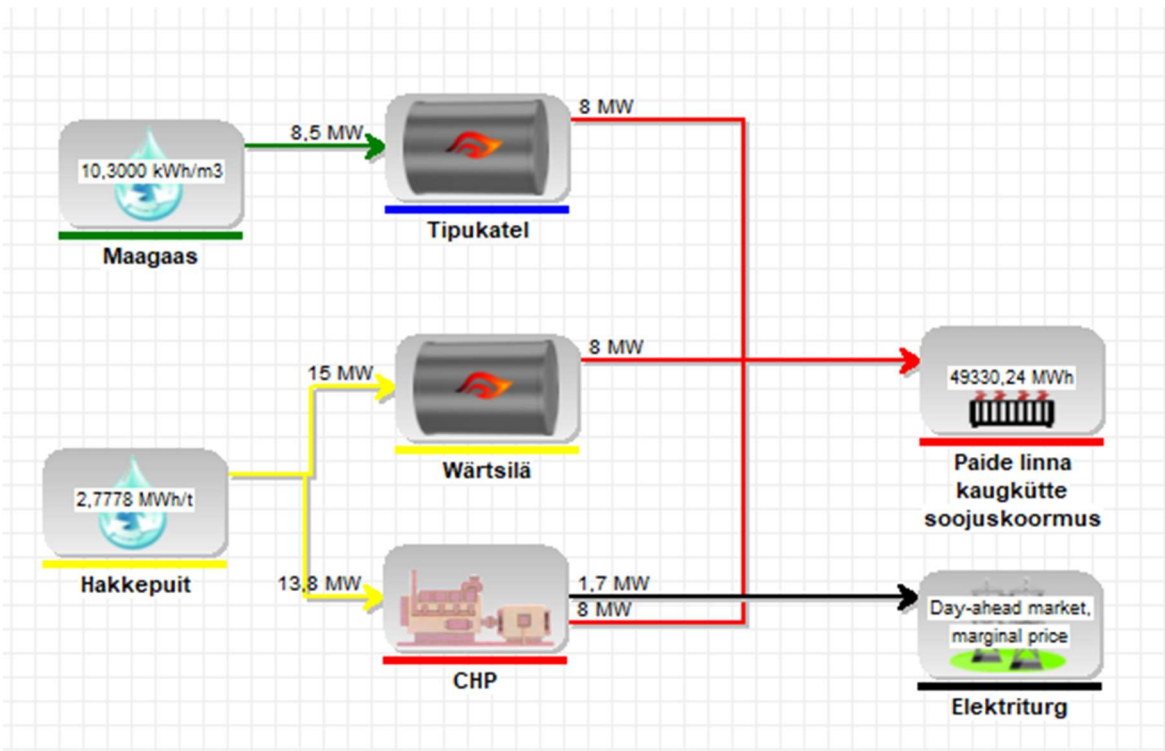
Paide koostootmisjaama energiatõhususe parandamise analüüsimiseks on vaja esmalt modelleerida hetkel töötav süsteem kasutamaks 2020. ja 2021. aasta soojus- ja elektritoodangut ning rahavooge. Seejärel tuleks modelleerida süsteem Paide koostootmisjaamast, kuhu on integreeritud erinevaid eelpool nimetatud tehnoloogiad, suurendamaks koostootmisjaama elektrienergiatoodangut ning võrrelda nende süsteemide rahavooge. Arvutuste ja tulemuste saamiseks kasutatakse energyPRO tarkvara, kuna see on ülesande jaoks väga sobilik ning seda kasutatakse Tallinna Tehnikaülikoolis elektroenergeetika erialal õppetöös.

Töös vaadeldav periood on 2021. aasta algusest kuni 2039. aasta lõpuni, kuna koostootmisjaama elueaks peetakse 25 aastat. Koostootmisjaama hoone loodi 2015 aastal. Antud töös uuritakse ja modelleeritakse 3 mudelit, kus Paide koostootmisjaama süsteemi on integreeritud kolm eelpool nimetatud jääksoojuse kasutamise tehnoloogiat:

- soojussalvesti;
- sundjahutus;
- absorptsioonjahti.

3.1 Paide KTJ hetkeolukorra modelleeriline

Mudeli moodustamiseks vajalikud seadmete tehnilised andmed, kasutegurid ja tootmisüksuste toodangu mahud on saadud AS Enefit Greeni Paide Koostootmise üksuselt. Paide koostootmisjaama hetkeolukorda iseloomustab mudel, mis on välja toodud joonisel 3.1.



Joonis 3.1. Paide koostootmisjaama hetkeolukorda iseloomustav mudel

Mudel koosneb kahest kütuseploki, milleks on maagaas ja hakkepuut. Hakkepuuduga hoitakse töös koostootmisjaama hoonet ja Wärtsilä katlamaja ning maagaasiga köetakse LNG-tipukatelt. Kütuste toimet hoitakse töös kolme erinevat energia muundamise üksust, milleks on koostootmisjaama, Wärtsilä katlamaja ning LNG-tipukatel, mille elektritoodang müüakse elektriturule ja soojustoodang katab Paide linna kaugkütte soojuskoormusvajadust.

Lisas 1 on välja toodud Paide koostootmise tootmisandmed. Tabelis on välja toodud hakkepuudu kütteväärtus, mida mõõdetakse kohapeal igalt saabuvalt hakkepuudu koormalt. Lihtsustamise mõttes on võetud hakkepuudu kütteväärtuseks 10 MJ/kg, mis on teisendatud MWh/t. Maagaasi kütteväärtuseks on antud tootmisandmete tabelis 37,3 MJ/nm³, mis on teisendatud kWh/nm³. Hakkepuutu loetakse taastuvenergia allikaks ning selle põletamisega ei kaasne CO₂ emissiooni.

Koostootmisjaama sisend mudelis on moodustatud vastamaks võimalikult täpselt tootmisandmete tabelis olevale informatsioonile. Koostootmisjaama poolt kasutavaks kütuseks on hakkepuut. Koostootmisjaama võimsusköver on koostatud tuginedes tööpunktile, mis on välja toodud Taavi Toomla magistritöös. [2] Võimsuskövera koostamisel on arvestatud ka generaatori kasutegurit. Auruturbiin M+M KT480-6 maksimaalne võimsus klemmidel on 2 MW, kuid võrku antav maksimaalne võimsus on

1,73 MW, mis teeb generaatori kasuteguriks 86,5%. Mudelis kasutatud võimsuskõvera koostamisel kasutatud tööpunktide tabel on välja toodud tabelis 3.1. CHP moodulis on välja toodud ka iga-aastane hooldusaeg, mis on vajalik küttekolde hoolduseks. Hooldusaeg on määratud hiliskevadesse ning sel hetkel kui koostoomis jaama hoone ei osale tootmisel, katab soojuskoormuse Wärtsilä katlamaja.

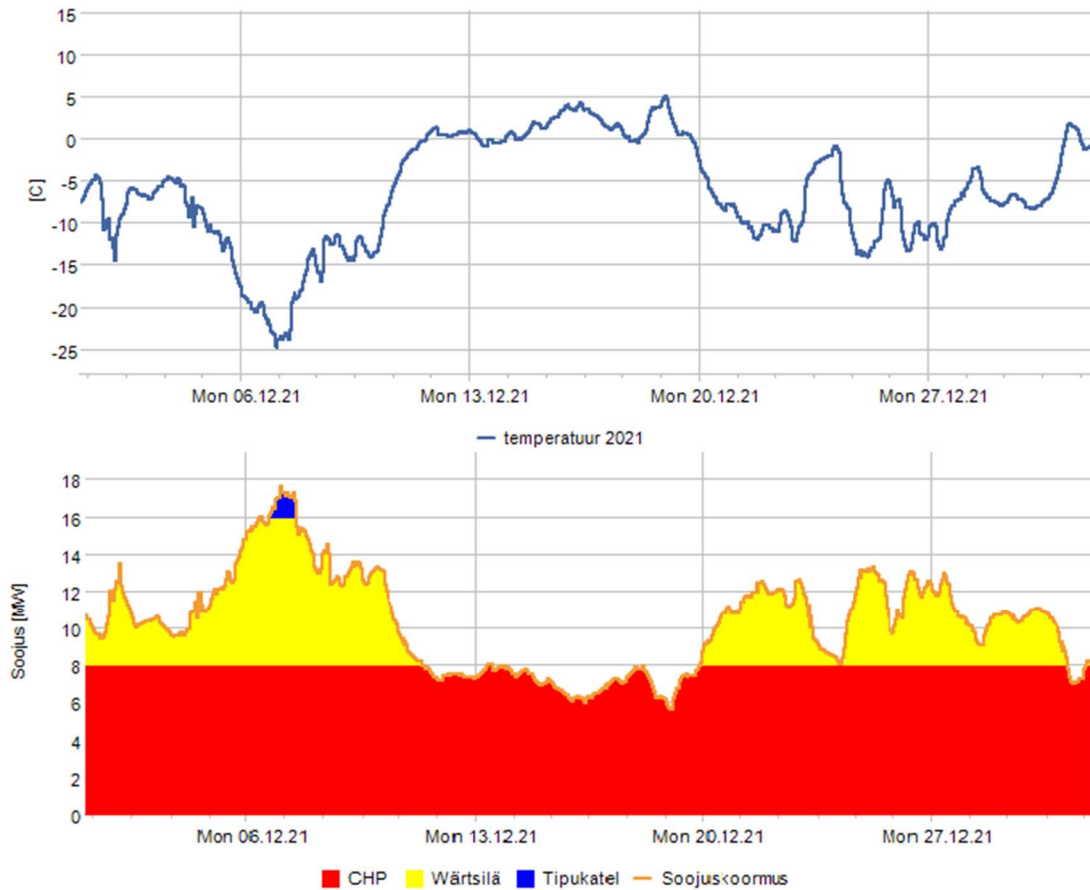
Tabel 3.1. Paide koostootmisjaama tööpunktid [2]

Tööpunkt	Kütusekulu (MW)	Soojuslik võimsus (MW)	Elektriline võimsus (MW)
100% (max)	13,8	8,0	1,7
60%	7,4	4,8	1,0
20% (min)	2,8	1,0	0,2

Wärtsilä katlamajas kasutatakse energia tootmiseks puukoort ja hakkepuitu. Puukoorel on mõnevõrra väiksem kütteväärtus kui hakkepuidul, kuid antud mudelis on lihtsustamise eesmärgil arvestatud kütteks ainult hakkepuitu, mille kütteväärtus on 2,78 MWh/t. Wärtsilä katlamaja on suletud suvekuudel ja septembris, kuna Paide linna soojusnõudlus on piisavalt madal, et selle suudab katta koostootmisjaama hoone. Suvekuudel teostatakse katlamajale ka hooldust. Wärtsilä katlamaja võimsuskõver on lihtsustuse mõttes jäetud jäätud lineaarseks ning kasutegurit on muudetud, et mudeli tulemused oleks ligilähedased reaalsete näitajatega.

Kolmandaks energiamuundamise üksuseks on vedeldatud maagaasil töötav tipukatel. Tipukatelt on võimalik kütta ka biogaasiga, kuid 2021. aastal kasutati kütuseks ainult vedeldatud maagaasi. Tipukatelt kasutatakse tipukoormuste katmiseks, kui koostootmishoone ja Wärtsilä katlamaja võimsused, ei suuda neid katta. Lisaks on tipukatla olemasolu tähtis töökindluse kohapealt. Vedeldatud maagaasil töötav tipukatel on võimeline asendama teisi tootmishooneid juhul, kui nende töös peaks esinema tõrkeid. Tipukatla käivitusajag on suhteliselt kiire võrreldes teiste tootmisüksuste käivitusajaga.

Elektrituru modelleerimisel on kasutatud Nord Pool Spotis olevaid 2021. aasta elektrihindasid, mille põhjal on kaastatud elektrituru hinna tunnipõhine aegrida. [14] Elektrituru hinna põhjal määratakse võrku müüdud elektritoodangu hind.



Joonis 3.2. Soojuskoormuse sõltuvus temperatuurist detsember 2021

Joonis 3.2 on kujutatud soojuskoormus, mis on koostatud AS Enefit Green'lt saadud 2021. tootmisandmete põhjal. 2021. aasta tervikliku soojustoodangu põhjal on energyPRO tarkvaral lastud arvutada tunnipõhine soojusnõudlus, mis on sõltuvuses välisõhu temperatuurist [15]. Jooniselt on selgelt näha, et temperatuuri langedes alla 20°C, mis on 2021 aasta detsembri kuu kõige madalam temperatuur, on ka Paide linna soojuskoormus kõige suurem. Paide linna kaugkütte baassoojuskoormuseks on määratud 1 MW, mis katab ära sooja tarbeveevajaduse. Baaskoormusest üle jääv soojuskoormus on sõltuvuses temperatuurist. Paide linnas paiknevad soojussõlmed on reguleeritud hakkama tarbijatele soojusenergiat tarnima kui temperatuur langeb alla 17 °C.

Mudelis on tähtsal kohal ka operatsiooni strateegia määramine. Selles tarkvara funktsioonis saab määrata energiamuundamise üksuste prioriteete. Antud uuringus on esmane prioriteet seatud KTJ hoonele, et maksimeerida selle soojus- ja elektritoodangut. Järgnevalt on prioritseeritud Wärtsilä katlamaja toodangut ning kolmandaks LNG tipukatla toodangut. Operatsiooni strateegia funktsioonis on võimalik lubada ka tootmisüksuste osalist koormust.

Rahavoogude arvestamise jaoks tuleb sisestada mudelisse erinevad tulud ja kulud. Peamised tulud laekuvad elektri- ja soojusenergia müügist, kuid oma osa on ka taastuvenergiatoetusel. Alates 21.01.2022 müüb AS Enefit Green Paides soojusenergiat hinnaga 62,59 €/MWh, mille on määranud Konkurentsiamet, eelnev hind soojusenergia müügiks oli 39,83 €/MWh [16] Elektri hinna määrab ära Nord Pooli elektribörs. Taastuvenergia toetust on võimalik Paide KTJ võimalik saada kuni 2027. aasta juuli lõpuni, kuna siis saab koostootmisjaama hoone 12 aasta vanuseks ning lõppeb toetuse maksmine. Taastuvenergia toetus sõltub võrgu müüdavast elektritoodangust ning toetuse suurus on 53,7 €/MWh. [17]

Investeeringute maksumust esialgses mudelis ei ole arvestatud, küll aga tuleb arvestada jooksvate püsikulude ja muutuvkuludega, mis on välja toodud tTabel 3.2. Püsikulud on kujutavad endast administratiivseid kulusid, tööjõu kulusid, plaaniliste ja mitteplaaniliste hoolduste kulusid, lepingulisi kohustusi, kinnisvara makse, kindlustust ja teisi kulusid. Jooksvate kulude all mõeldakse kulumaterjalide (vesi, õlid, määrded, kemikaalid, lisandid jne), elektrikulu (va valgustus), ajutised tööjõukulud jne. Koostootmisjaama hooneks vajalikud püsikulud määratakse elektrilise võimsuse järgi. Ühe MW installeeritud võimsuse kohta kulub umbes 270 000 eurot aastas, mis teeb aastaseks püsikuluks 540 000 €. Koostootmis jaama muutuvkulud on 9,3 € MWh toodetud elektrienergia kohta. Ühe MW installeeritud võimsuse kohta kulub umbes 32 500 €, mis teeb aastaseks püsikuluks kokku 260 000 €. Wärtsilä katlamaja muutuvkulud on 2,7 € toodetud MWh soojusenergia kohta. Tipukatla püsikulud on 1 950 € MW kohta aastas ning muutuvkuludeks 1,1 € toodetud MWh soojusenergia kohta. [18]

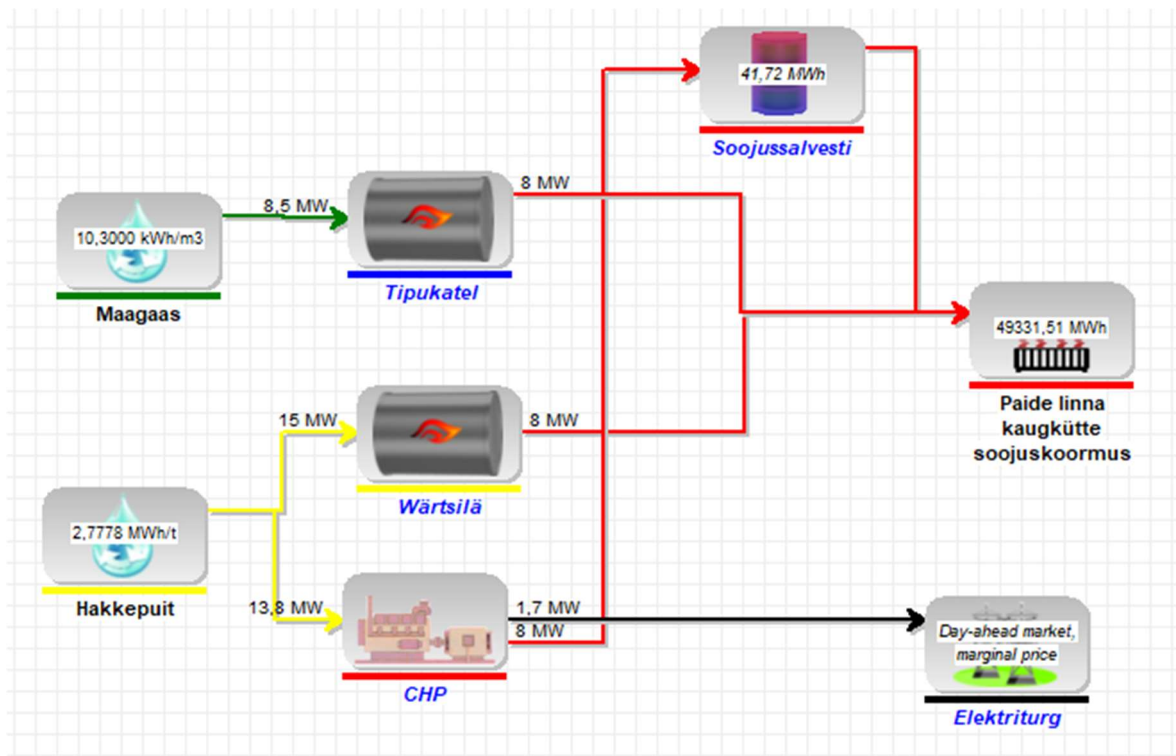
Tabel 3.2. Paide KTJ, Wärtsilä katlamaja ja LNG-tipukatla iga-aastased kulud

	KTJ	Wärtsilä katlamaja	LNG-tipukatel
Püsikulud	270 000 €/MW _{el} /a	32 500 €/MW/a	1 950 €/MW/a
Muutuvkulud	9,3 €/MWh _{el} /a	2,7 €/MWh/a	1,1 €/MWh/a

AS Enefit Green'ilt saadud andmete põhjal on hakkepuidu hinnaks 15,33 €/MWh, millest tulenevalt on ühe tonni hakkepuidu hinnaks 42,62 € arvestades, et hakkepuidu kütteväärtus 2,78 MWh/t.

3.2 Alternatiiv 1: Paide KTJ mudel soojussalvestiga

Alternatiiv 1 puhul on lisatud hetkeolukorra mudelisse täiendavalt üks soojussalvesti, mis on võimalik välja ehitada vanast kütusemahutist. Paide KTJ hetkeolukorra ja integreeritud soojussalvesti modelleeritud mudel on välja toodud Joonis 3.3.



Joonis 3.3. Paide KTJ hetkeolukord + soojussalvesti

Mudelisse on lisatud 1000 m³ suurune soojussalvesti, mille kõrguseks on 9 meetrit ja raadiuseks 5,95 meetrit. Soojussalvesti on isoleeritud 300 mm paksuse isolatsioonikihiga. Soojussalvesti soojusjuhtivus on 0,037 W/(m*K). Ülemise pinnakihi vee temperatuur salvestis on 90 °C ja alumise pinnakihi temperatuur 50 °C. Maksimaalseks tühjenemiseks on määratud 90%. Antud parameetrite järgi on soojussalvesti mahutavus 41,72 MWh. EnergyPROs soojussalvesti modelleerimise aken on välja toodud Joonis 3.4.

Soojussalvesti

Name: Soojussalvesti

User defined storage Non availability periods

Volume [V]
1000,0 m³

Temperature in the top [Tt]
90,00 °C

Temperature in the bottom [Tb]
50,00 °C

Utilization
90,0 %

Storage capacity :
41,72 MWh as of 01.01.2021

Minimum storage content in % of storage capacity
0,0 % 0,00 MWh

Storage content at start and end of calculation
MinContent(_) MWh

Storage Loss

Storage Height [h] 9,00 m Storage radius [Radius] 5,95 m Insulation Thickness [s] 300,00 mm Thermal Conductivity [Lambda] 0,0370 W/(m*K)

Ambient Temperature [Ta]
temperatuur 2021

Formula for loss at full store User Defined

$$\frac{\lambda \cdot 1000 / s \cdot \pi \cdot (h \cdot r + r^2) \cdot (T_t - T_a)}{10^6}$$
 MW

Formula for loss at empty store

$$\frac{\lambda \cdot 1000 / s \cdot \pi \cdot (h \cdot r + r^2) \cdot (T_b - T_a)}{10^6}$$

Operation restricted to period

Comments:

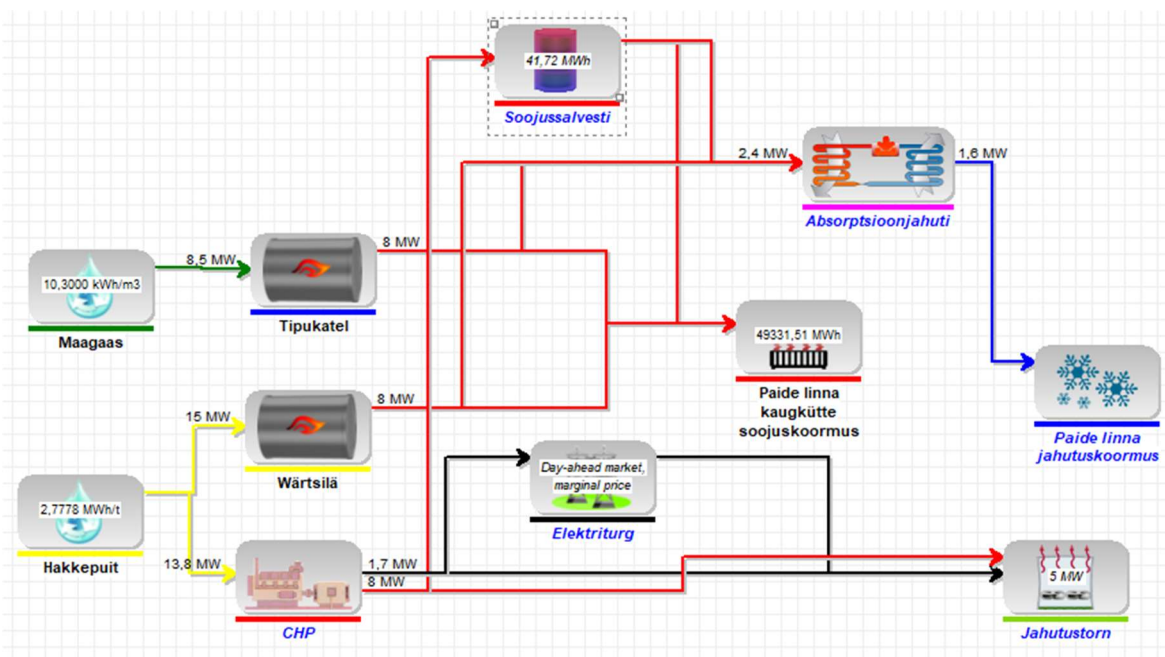
OK Cancel

Joonis 3.4. Soojussalvesti modelleerimine energyPROs

Joonis 2.1, kus on välja toodud veel põhineva faasimuutusega soojussalvesti investeringu suuruse sõltuvus salvesti mahust, selgub, et 1000 m³ salvesti puhul on investeringu maksumuseks 300 €/m³, mis teeb soojussalvesti investeringu kogumaksumuseks 300 000 €. Lisaks investeringu maksumusele lisanduvad jooksvad ja püsikulud. Soojussalvesti püsikuludeks võib arvestada 1500 € salvesti kohta, mis sisaldab endast soojussalvesti paagi puhastust, mida tehakse korra aastas. Jooksvad kulud hõlmavad endast tsirkulatsioonipumpade elektritarvet ja N₂ toodangud, mille suuruseks on vähem kui 1% salvestatud energiast [5]. Lihtsustamise mõttes ei ole antud mudeli modelleerimisel arvestatud jooksvate kuludega.

3.3 Alternatiiv 2: Paide KTJ koos soojussalvesti, sundjahutus ja absorptsioonjahutiga

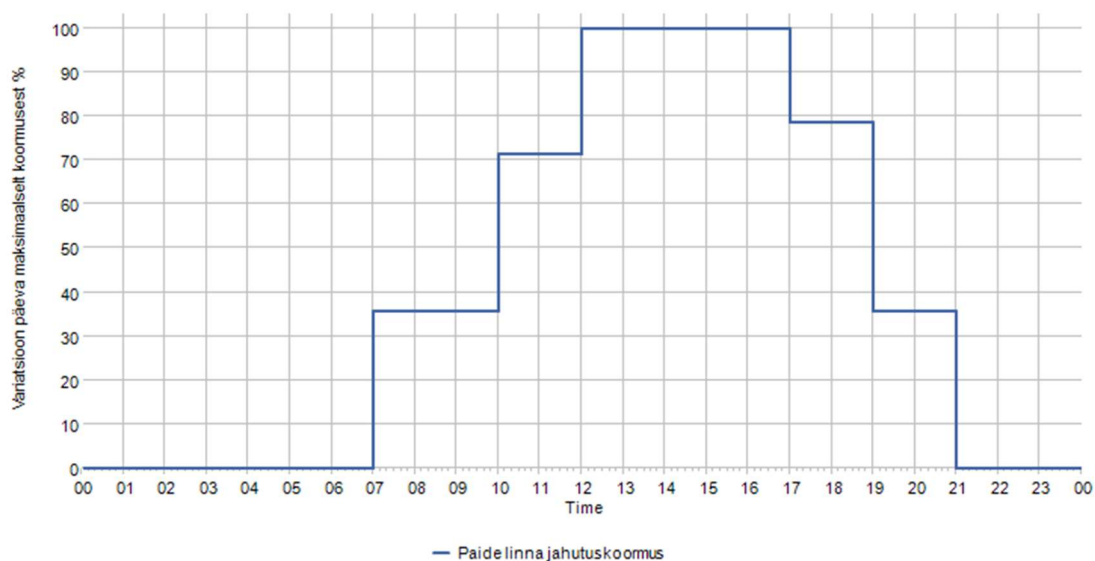
Paide KTJ hetkeolukorrale on lisatud 1000 m³ soojussalvesti, jahutustorn võimsusega 5 MW, 1,6 MW võimsusega absorptsioonjahuti pakkumaks jahutusenergiat ning jahutuskoormus. Alternatiiv 2 puhul koostatud mudel on nähtav Joonis 3.5.



Joonis 3.5. Koostootmisjaama hetkeolukord koos soojussalvesti, sundjahutuse ja absorptsioonjahutiga

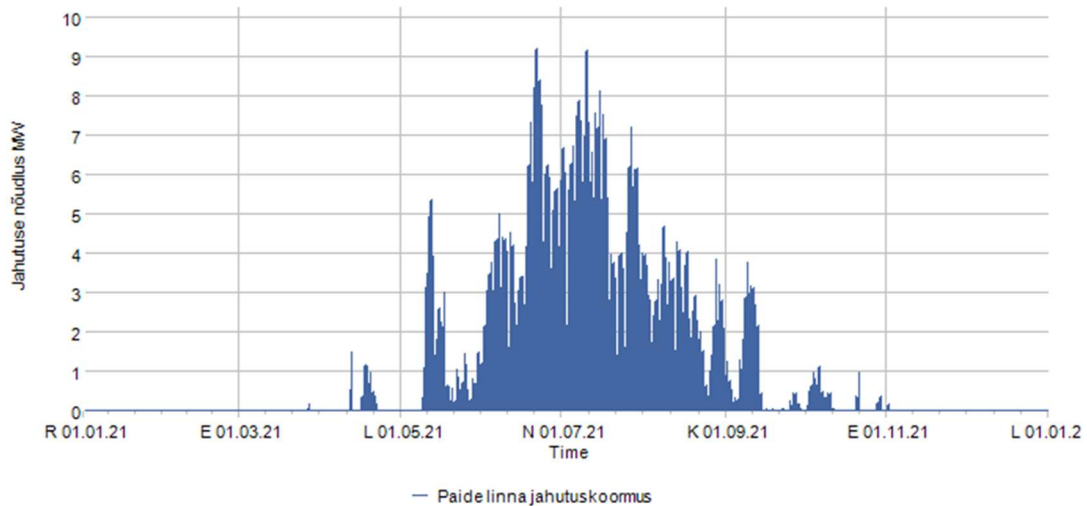
Jahutustorn kasutatakse märtsi algusest kuni oktoobri lõpuni, kuna sellel perioodil on Paide linna soojuskoormus madal ning koostootmisjaama hoone võimsust kasutatakse ära ainult osaliselt. Jahutustornis jahutatud energia arvelt suureneb jaama koormustegur, mis omakorda suurendab koostootmise efektiivsust ning suurendab elektritoodangut. Jahutustorni elektriline omatarve on määratud võrduma 5% jahutatavast soojuse hulgast. Jahutustorni investeeringu suurus ja hoolduskulud on määratud tabeli 2.1 alusel, mis määratleb jahutustorni investeeringu suuruseks 30 eurot ühe kW võimsuse kohta ning hoolduskuludes 4,5 eurot ühe kW võimsuse kohta aastas. Jahutustorni investeeringu suuruseks on kokku 150 000 eurot ja aastaseks hoolduskuluks 22 500 eurot.

Lisaks jahutustornile on antud mudelis lisatud ka absorptsioonjahtu jääsoojusest jahutusenergia tootmiseks. Paide koostootmisjaamal on olemas kasutamata YORK absorptsioonjahuti, mille kasutegur on 67%. Absorptsioonjahti jahutusvõimsus on 1,6 MW. Arvestades kasuteguriga selgub, et seadme nimivõimsus on 2,4 MW. Tabel 2.1 on välja toodud, et absorptsioonjahti investeringu suuruseks on 120 eurot kW kohta ning hooldusele kulub 3,6 eurot kW kohta aastas, mis teeb investeringu kogumaksumuseks 280 000 eurot ja hoolduskuludeks 8 640 eurot aastas.



Joonis 3.6. Paide jahutusenergia nõudluse profiil ööpäevas

Lisaks eelnimetatud moodulitele on selles mudelis lisatud ka jahutusenergia nõudlus. Jahutuskooormuse suuruseks on 5 000 MWh aastas ning on täielikult sõltuv välisõhu temperatuurist. Paide linna jahutusenergia vajadus algab 10°C juures. Jahutusenergia nõudlust iseloomustamiseks on modelleeritud profiil, mis iseloomustab jahutuskooormuse suuremat nõudlust päevasel ajal, kuna sellel ajal on jahutusenergia suurem potentsiaal ruumi jahutamiseks. Modelleeritud jahutusenergia ööpäevane profiil on välja toodud Joonis 3.6. Jahutusenergia hind ei ole määratud Konkurentsiameti poolt ning antud bakalaureuse töös on jahutusenergia hinnaks määratud 25 €/MWh.



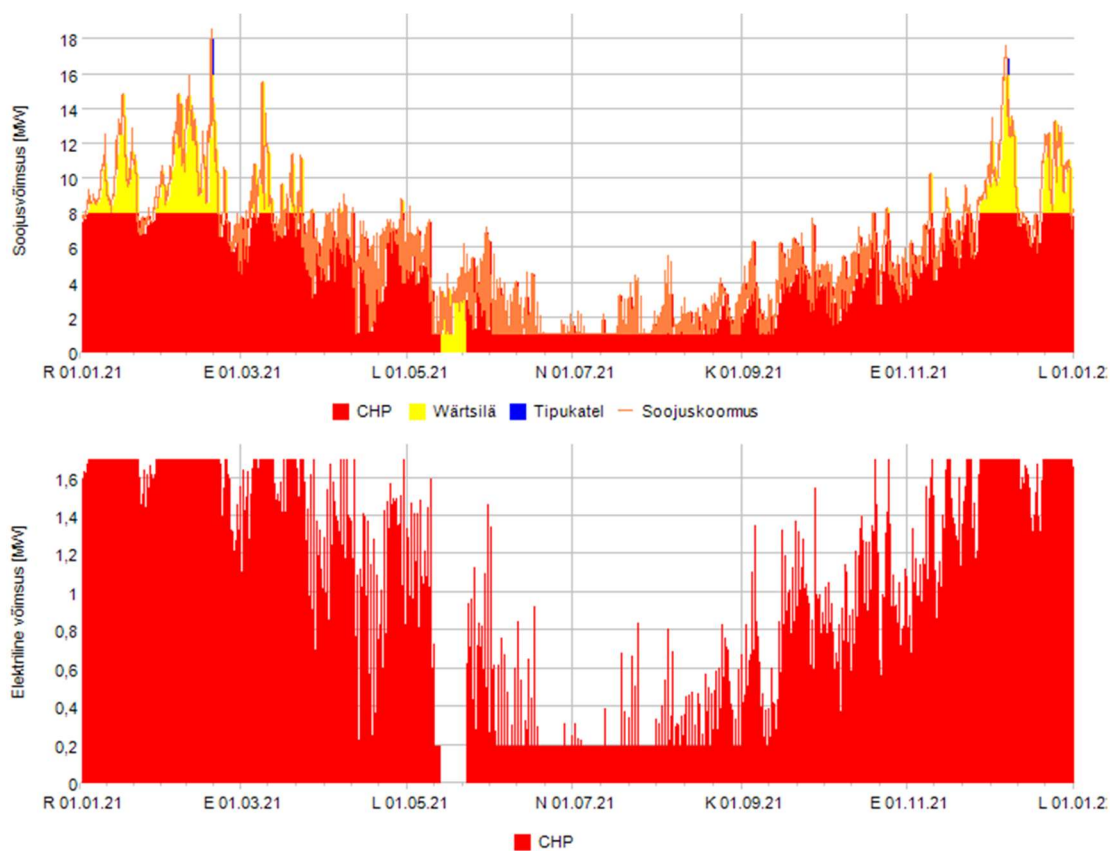
Joonis 3.7. EnergyPROs modelleeritud Paide linna jahutuskoormus 2021 aastal

Joonis 3.7 on välja toodud Paide linna 2021. aasta jahutusenergia koormusgraafik. Koormusgraafikust selgub, et maksimaalne jahutusnõudlus Paide linnal on umbes 9 MW ning jahutusenergia järgi on nõudlus valdaval suve kuudel ja septembris, vähesel määral ka mais, oktoobris ja novembris.

4. Tulemused

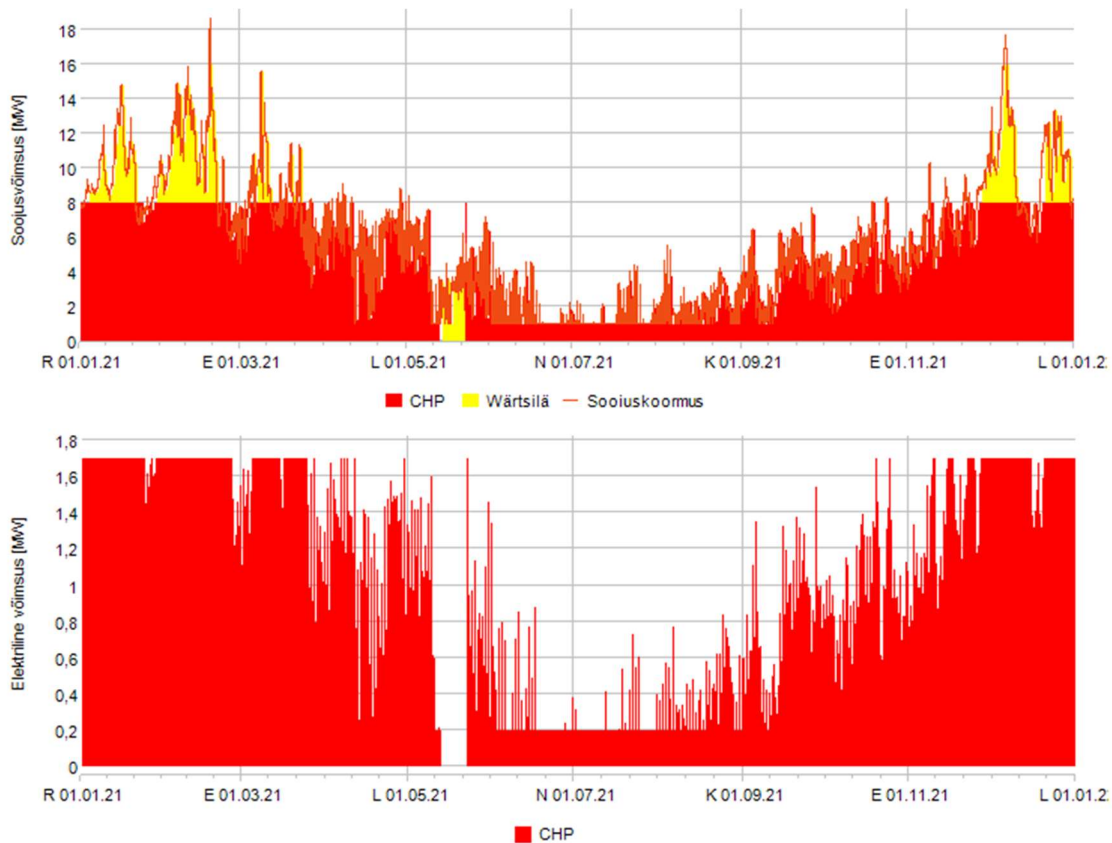
Antud peatükis analüüsitakse eelmises peatükis tutvustatud mudelite tulemusel saadud tootmisandmete ja tasuvuse erinevust. Hetkeolukorra ja kahe alternatiivse lahenduse läbitöötamisel tekib võrdlusmoment, kus on võimalik võrrelda, kui palju suureneb elektri- ja soojustoodangu maht uute seadmete integreerimisel olemasolevasse süsteemi ning mil määral muutuvad rahavood. Lisaks toodangule ja rahavoogudele on võimalik võrrelda koostootmise efektiivsust ning primaarenergia säästu võrreldes hetkeolukorraga.

Hetkeolukorda kujutavast mudelist selgub, et AS Enefit Green müüb 2021. aastal Paide linna kaugküttevõrku 49 331 MWh soojusenergiat ning elektrivõrku 9 070 MWh elektrienergiat. Aastase soojus- ja elektritoodangu toomiseks kulub 31 086 tonni hakkepuitu ning 3865 m³ maagaasi. Hetkeolukorra aastast soojus- ja elektritoodangut iseloomustab Joonis 4.1.



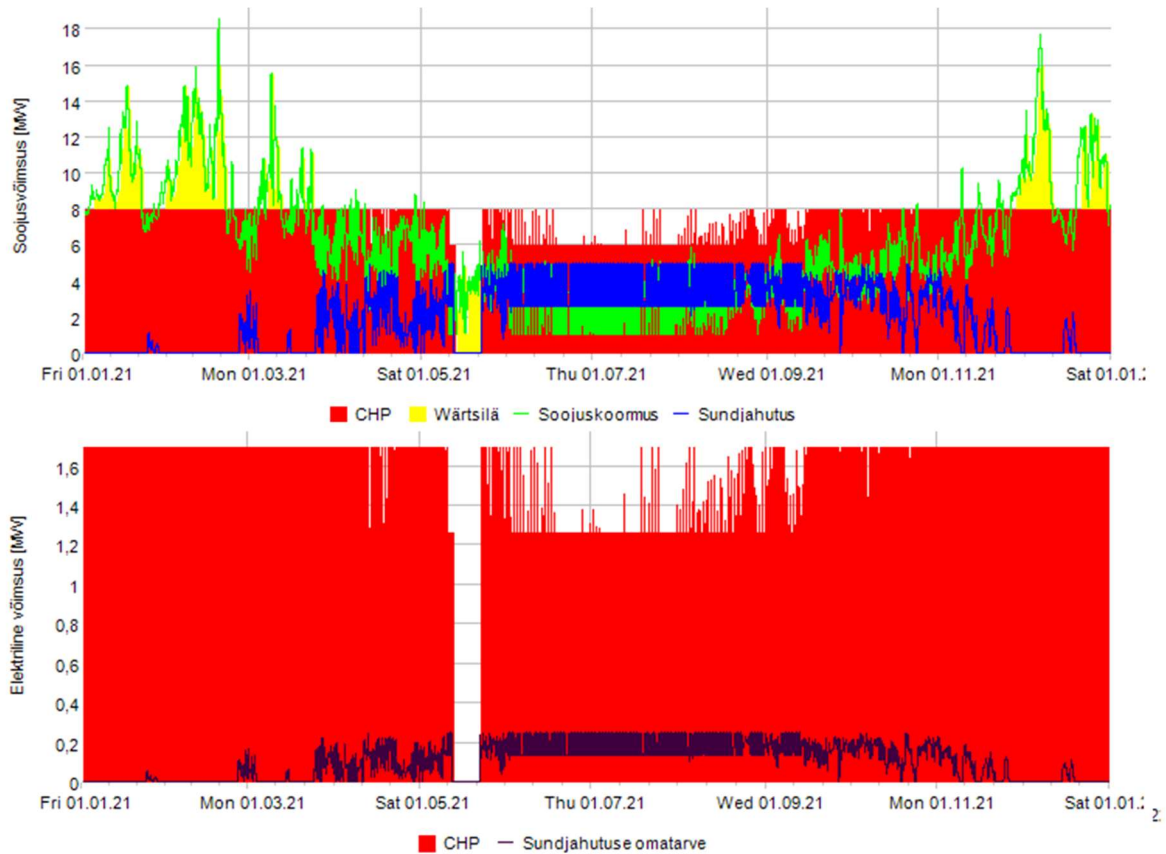
Joonis 4.1. Hetkeolukorda iseloomustav soojus- ja elektrienergia koormusgraafik

Alternatiiv 1 puhul, kus lisati hetkeolukorrale sojussalvesti selgub, et koostootmise teel toodetav soojusenergia on kokku 43 507 MWh ning Wärtsilä katlamajas toodetav soojusenergia toodang on kokku 5 869 MWh. Paide linnale müüdavast soojusenergiast 88,2% toodetakse koostootmise tulemusel ning 11,8% Wärtsilä katlamajas. Aastase soojus- ja elektrienergia tootmiseks kulub kokku 31 145 t hakkepuitu. Alternatiiv 1 aastast soojus- ja elektritoodangut iseloomustab Joonis 4.2.



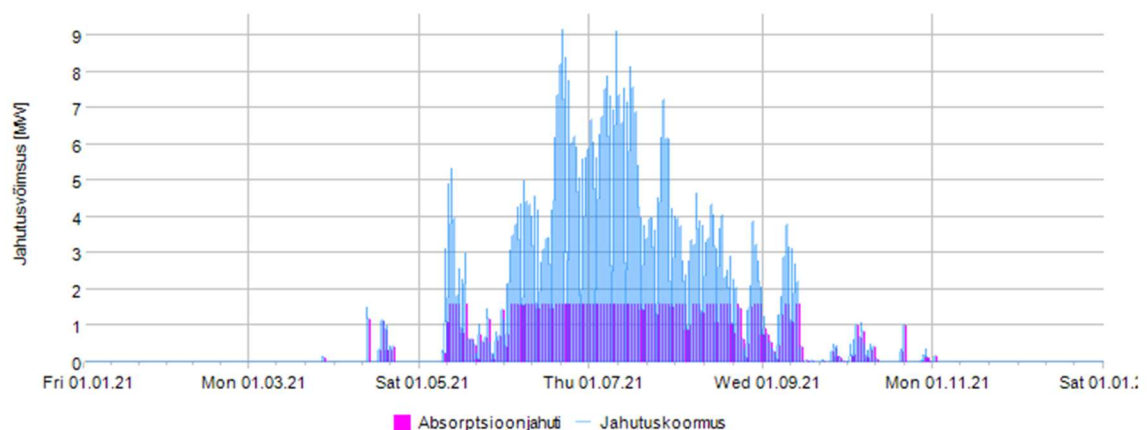
Joonis 4.2. Alternatiiv 1 iseloomustav soojus- ja elektrienergia koormusgraafik

Alternatiiv 2 puhul, kus on lisatud hetkeolukorrale sojussalvesti, absorptsioonjahuti ja jahutustorn selgub, et koostootmise teel toodetav soojusenergia on kokku 64 576 MWh ning Wärtsilä katlamajas toodetav soojusenergia on 6 024 MWh. Toodetavast soojusenergiast 17 421 MWh jahutatakse maha jahutustornis, milleks kulub 810 MWh elektrienergiat. 45 MWh energiat kulub sojussalvesti kulude katmiseks. Wärtsilä katlamaja poolt toodetud soojusenergia kogus on 6 024 MWh. Alternatiiv 2 puhul on elektrienergia tootmine suurenenud 13 699 MWh-ni. Elektri-, soojus- ja jahutusenergia tootmiseks kulub kokku 43 794 t hakkepuitu. Alternatiiv 2 aastast jahutus-, soojus- ja elektritoodangut iseloomustab Joonis 4.3.



Joonis 4.3. Alternatiiv 2 iseloomustav soojus- ja elektrienergia koormusgraafik

Alternatiiv 2 puhul toodeti ka 2 530 MWh jahutusenergiat Paide linnale, mille käigus kasutati 3 796 MWh jääsoojust. Paide linnale jahutuskoormus ning toodetud jahutusenergiatoodang on välja toodud Joonis 4.4.



Joonis 4.4. Alternatiiv 2 iseloomustav jahutusenergia koormusgraafik

Tabel 4.1 selgub, hetkeolukorra puhul Paide linnale müüdavast soojusenergiast 87,3% toodetakse koostootmise tulemusel, 12,6% Wärtsilä katlamajas ning 0,1% tipukatla kaudu. Alternatiiv 1 tulemusel suurenes koostootmise osakaal kogu soojustoodangust 88,2%-ni ning Wärtsilä katlamaja osakaal vähenes 11,8%ni. Alternatiiv 2 tulemusel koostootmise osakaal Paide linnale müüdavast soojusenergiast vähenes 87,9%ni ning Wärtsilä katlamaja osakaal suurenes 12,1%ni. Soojussalvesti kasutuselevõtmise tulemusel kaob 2021 aastal tipukatla vajadus.

Tabel 4.1. Tootmisüksuse toodangu osakaal Paide linna soojuskoormusest

Osakaal soojustoodangust (%)	Hetkeolukord	Alternatiiv 1	Alternatiiv 2
KTJ	87,3	88,2	87,9
Wärtsilä katlamaja	12,6	11,8	12,1
Tipukatel	0,1	0	0

Hetkeolukorda modelleerides on saadud 2021 aasta keskmiseks koostootmise efektiivsuseks 69,8% ja valemite 1 kasutades arvutatud primaarenergia säästuks 13,6%. Alternatiiv 1 puhul on saadud vastavad arvud 69,8% ja 13,5% ning alternatiiv 2 puhul on koostootmise efektiivsuseks saadud 70,1% ning arvutatud primaarenergia sääst 0%. Alternatiiv 2 puhul on tingitud suurem koostootmise efektiivsus suuremast koormusest. Väiksem primaarenergia sääst on tingitud aga kasuliku soojusenergia vähenemisest, kuna 17 421 MWh toodetust soojusenergiast jahutati maha jahutustornis. Hetkeolukorra puhul toodeti elektrienergiat võrku 9070 MWh, alternatiiv 1 puhul 9166 MWh ning alternatiiv 2 puhul 12 828. Alternatiiv 2 puhul on tingitud suurem elektrienergia toodang faktist, et osa jääsoojusest on süsteemist väljunud sundjahutuse tõttu, kuid toodetud elektrienergia aga võrku müüdnud. Tootmisefektiivsus ja elektritoodang on välja toodud Tabel 4.2

Tabel 4.2. Tootmisefektiivsus ja elektritoodang

	Hetkeolukord	Alternatiiv 1	Alternatiiv 2
Koostootmise primaarenergia sääst (%)	13,6	13,5	0
Koostootmise efektiivsus (%)	69,8	69,8	70,1
Elektritoodang võrku (MWh)	9070	9166	12 828

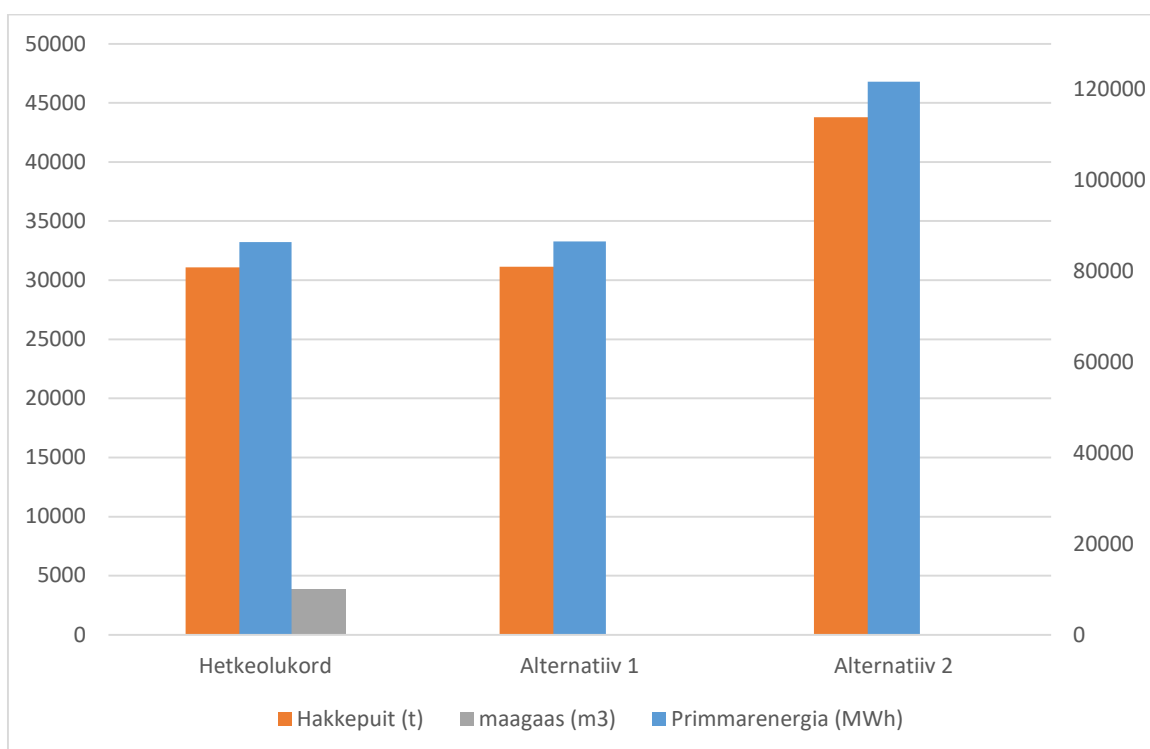
Alternatiiv 2 puhul on märgatavalt suurenenud koostootmise koormus. Hetkeolukorra mudelist selgub, et aasta keskmine koostootmisjaama koormus on 92%, kuid alternatiiv 1 puhul on aasta keskmine koostootmisjaama koormus 62%. Täiskoormusel töötamise töötunnid aastas on suurenenud 5 391 tunnilt 8 058 tunnini. Alternatiiv 1 puhul on vastavad arvud väga sarnased hetkeolukorrale, kus keskmine koormus on 61% ning maksimaalseid töötunde on aastas 5 335.

Modelleeritud hetkeolukorra mudelis on Wärtsilä katlamaja poolt 2021 aastal Paide linnale müüdud soojusenergia kokku 6 226 MWh, milleks kulus kokku 4 202 tonni hakkepuitu. Wärtsilä katlamaja töötas aastal 2021 kokku 2 380 tundi, millest 778 tunnil töötas katlamaja maksimaalvõimsusel. Alternatiiv 1 puhul on Wärtsilä katlamaja poolt linnale müüdav soojusenergia 5 869 MWh, mille tootmiseks kulus kokku 3 961 tonni hakkepuitu. Võrreldes hetkeolukorraga on Wärtsilä katlamaja soojuskoormus vähenenud. See on tingitud soojussalvesti lisamisest süsteemi, mille tulemusel koostootmise osakaal on kogutootmises suurenenud ning osa koostootmise soojusenergiast on salvestatud soojussalvestisse. Salvestatud energia ulatuses on aga vähenenud Wärtsilä katlamaja soojuskoormus. Vähenenud on ka Wärtsilä katlamaja töötunnid ning maksimum võimsuselt töötamise tunnid, mis on vastavalt 1 924 ja 734 tundi. Alternatiiv 2 puhul on Wärtsilä katlamaja 2021 aasta kütusekulu 4 066 tonni hakkepuitu, mille tulemusel toodeti ning müüdi Paide linna keskkütte võrku kokku 6024 MWh soojusenergiat. Võrreldes hetkeolukorraga vähenenud katlamaja töötunnid 2 380 tunnilt 1 933 tunnini ning maksimaalsete töötundide arv on samuti vähenenud 778 tunnilt 753 tunnini.

Alternatiiv 1 ja 2 puhul on soojussalvesti olemasolu tõttu võimalik 2021 aasta Paide linna soojuskoormust katta ilma tipukatlamajata. 1000 m³ salvesti oma mahutavuse poolest on piisavalt suur, et katta ära 2021 tipukoormust. Tipukatlal on kindlasti tähtis roll varustuskindluse kohapealt. Rikke puhul võib tekkida olukord, kus ei suudeta katta Paide linna soojuskoormust.

Alternatiiv 2 on määratletud Paide jahutusenergia vajaduseks 5000 MWh, kuid olemasolev absorptsioonjahuti on 2021 aasta andmete põhjal liiga väikese võimsusega, et katta ära kogu jahutusvajadus. Absorptsioonjahuti tootis 2021 aastal kokku 2 530 MWh jahutusenergiat, mille tootmiseks kulus omakorda 3 796 MWh soojusenergiat. Absorptsioonjahuti töötundide arv 2021 aastal oleks olnud kokku 2 380, millest 1 581 tunnil töötaks absorptsioonjahuti maksimaalvõimsusel. 2021 aastal oli suurim jahutusvõimsuse vajadus 21.06, mil õhutemperatuur küündis 31°C juurde. Paide linna jahutusvõimsuse katmiseks oleks olnud vaja 9,18 MW toomiseadet.

Joonis 4.5 on näha, et hetkeolukorda kujutavas mudelis jaama tööks vajalik kütusekogus on 31 076 tonni hakkepuitu ja 3 866 m³ maagaasi, mille primaarenergia on vastavalt 86 322 MWh ning 40 MWh. Alternatiiv 1 puhul on kogu kütusekulu mõõdetav ainult hakkepuidus, kuna soojussalvesti tõttu, ei ole 2021. aastal tipukatlamaja kasutamine vajalik. Koostootmise ja Wärtsilä katlamaja kombineerimisel soojussalvestiga on jaama tööks vajalik sisse osta 31 145 tonni hakkepuitu, mille primaarenergia on 86 514 MWh. Alternatiiv 2 kulub jaama tegevuse jaoks 43 794 tonni biomassi, mille primaarenergia on kokku 121 651 MWh. Nagu ka alternatiiv 1 puhul ei ole tipukatla kaitamine vajalik.



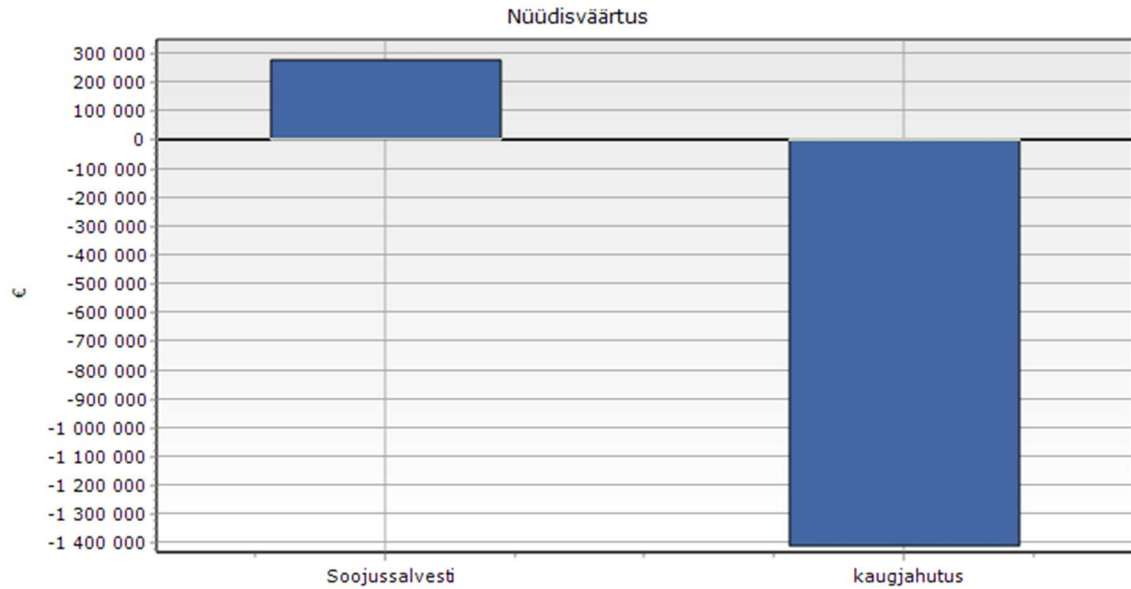
Joonis 4.5. Modelleeritud mudelite kütusekogus ja primaarenergia

Tabel 4.3 on välja toodud 2021. aasta positiivsed rahavood mudelipõhiselt. 2021. aasta hetkeolukorra mudelist selgub, et AS Enefit Green Paide üksusele laekuvad tulud aastas on 3 284 997 eurot, millest elektrimüügi eest laekub 833 061 eurot, soojuse müügi eest 1 964 874 eurot ning taastuenergia toetustest 487 062 eurot. Alternatiiv 1 puhul laekuks ettevõttele tulused kokku 3 297 566 euro eest, millest elektrimüük oleks 840 461 eurot, soojuse müük sama mis hetkeolukorra puhul ning natukene suurenenud elektrienergia tootmise eest laekuks 5168 euro võrra rohkem taastuenergia toetust. Alternatiiv 2 puhul laekuks ettevõttele tulused 3 843 952 eurot, millest 1 138 040 eurot moodustaks elektrimüük, 1 964 874 eurot soojuse müük, 63 258 eurot jahutusenergia müük ning 677 780 eurot taastuenergia toetus.

Tabel 4.3. Modelleeritud mudelite tulud eurodes 2021

	Hetkeolukord	Alternatiiv 1	Alternatiiv 2
Tulu elektrienergia müügist	833 061	840 461	1 157 468
Tulu soojusenergia müügist	1 964 874	1 964 874	1 964 874
Tulu jahutusenergia müügist	-	-	63 258
Taastuenergia toetus	487 062	492 230	688 853
Tulud kokku	3 284 997	3 297 566	3 874 453

Hetkeolukorra kulud kokku on 2 476 804 eurot, millest üle poole 1 324 459 eurot moodustab hakkepuidu kütusekulu, lisaks veel LNG kütusekulu 47 700 eurot. Koostootmisjaama püsikulud on 540 000 eurot ning muutuvkulud 84 351 eurot, Wärtsilä katlamaja muutuvkulud 133 195 eurot ning Wärtsilä püsikulud 260 000 eurot, tipukatla jooksvad kulud 15 600 eurot ning muutuvkulud 54 265 eurot. 17 233 eurot kulus müügitasumiseks. Alternatiiv 1 puhul on kulud suuresti sarnased, erinevad on koostoomise muutuvkulud 85 247 eurot, hakkepuidu kütusekulud 1 327 397 eurot, müügitasumiseks 17 416 eurot, soojussalvesti püsikulud 1 500 eurot. Soojussalvesti jaoks lisandub investeering 300 000 eurot. Alternatiiv 2 puhul on kogukuludeks 3 006 326 eurot, millest moodustasid koostootmise püsikulu 540 000 eurot ja muutuvkulud 117 381 eurot, Wärtsilä katlamaja püsikulud 260 000 eurot ja jooksvad kulud 133 195 eurot, tipukatla jooksvad kulud 15 600 eurot ning muutuvkulud 54 265 eurot, elektri müügitasumiseks 23 981 eurot, soojussalvesti püsikulud 1 500 eurot, jahutustorni hoolduskulud 22 500 ning absorptsioonjahuti hoolduskulud 8 640 eurot. Alternatiiv 2 investeeringud kokku on 730 000 eurot, mis sisaldab soojussalvesti, jahutustorni ja absorptsioonjahuti investeeringuid. Lisas 4 on välja toodud iga mudeli 2021 aasta kulud.



Joonis 4.6. Soojussalvesti ja kaugjahutus mudelite nüüdisväärtuse kasv võrreldes hetkeolukorraga

Rahavoogude kokkuvõtvalt jooniselt selgub, et kõige tulusam on alternatiiv 1. 2039 aasta lõpuks teeniks hetkel toimiv süsteem 23 684 167 eurot kasumit, samal ajal kui alternatiiv 1 teenitud kasum oleks 24 241 811 eurot ning alternatiiv 2 teenitud kasum oleks 21 515 578 eurot. Kasumlikust iseloomustab mudelite nüüdisväärtus, mis on välja toodud Joonis 4.6.

KOKKUVÕTE

Bakalaureuse töö raames uuriti AS Enefit Greeni Paide koostootmisjaama hetkeolukorda ja võimalusi rakendamaks erinevaid jääksoojuse tehnoloogiaid ning analüüsiti nende mõju soojus- ja elektritoodangule, anti ülevaade erinevate tehnoloogiatest ja nende rakendamisega kaasnevatest kuludest. Modelleeriti energyPRO tarkvara abil hetkeolukorra mudel vastavalt AS Enefit Greenilt saadud algandmetele ning teostati erinevate mudelite vahel tasuvusanalüüs.

Antud lõputöö raames modelleeriti AS Enefit Greeni hetkeolukord Paides, mille tulemusel selgus, et Paide linna soojuskoormus on 2021 andmete põhjal 49 331 MWh, mis toodetakse 87,3% ulatuses koostootmise teel, 12,6% soojusenergiast toodeti Wärtsilä katlamajas ning 0,1% tipukatla kaudu. Koostootmise aastane kasutegur on 69,8% ning koostootmisel on primaarenergia sääst 13,6%. Lisaks soojusenergiale müüakse võrku 9070 MWh elektrienergiat. Hetkeolukorra modelleerimisel selgus, et 2021. teenitud tuluks on 3 284 997 eurot.

Töö käigus modelleeritud mudelite läbitöötamisel selgus, et Paide koostootmisjaama territooriumil asuvast vanast 1000 m³ kütusemahuti ümberehitamisel soojussalvestiks saadaks soojussalvesti, mille mahtuvus on 44,72 MWh. Soojussalvesti integreerimisega süsteemi suureneks koostootmise osakaal 87,3%lt 88,2%ni ning kaoks otsene vajadus tipukatla järgi. Soojussalvesti tulemusel muutuks soojuskoormus ühtlasemaks, kuid kogu süsteemi arvestades, siis üsna vähesel määral. Soojussalvesti integreerimise tulemusel oleks koostootmise primaarenergia sääst 13,5% ning koostootmise kasutegur 69,8%. Elektritoodang võrreldes hetkeolukorruga suurenes peaaegu 100 MWh võrra. 2021 aasta andmete põhjal oleks AS Enefit Greeni poolt teenitav tulu soojussalvestiga lahenduse puhul 3 297 566 eurot.

Alternatiiv 2 puhul on tegu mudeliga, kus on alternatiiv 1 võrreldes on süsteemile lisatud 5 MW võimsusega jahutustorn ning 1,6 MW jahutusvõimsusega absorptsioonjahuti. Selgus, et olulisel määral suurenes koostootmisjaama maksimaalsete töötundide arv. Mudeli läbitöötamisel selgus, et koostootmisel teel põletatakse 39 727 tonni hakkepuitu, mille tulemusel saadakse 64 576 MWh soojusenergiat 13 699 MWh elektrienergiat, millest omakorda kulus 871 MWh sundjahutuse omatarbeks. Koostootmise tulemusel saadud soojusenergiast 3 796 MWh kulus absorptsioonjahuti käitamiseks, mille tulemusel toodeti kokku 2530 MWh jahutusenergiat, kuid ei suudetud katta kogu Paide linna jahutuskoormust. Jahutustornis jahutati maha 17 421 MWh soojusenergiat ning

soojussalvesti kadudeks kulus 45 MWh. Koostootmise efektiivsus kasvas 70,1%ni, kuid primaarenergia sääst kahanes 0%ni. Primaarenergia säästu vähenemine on tingitud kasuliku soojusenergia vähenemisest koostootmise teel toodetud soojusenergia hulgast, kuna suur osa soojusenergiat jahutati maha jahutustornis. Vaatamata suuremale toodangule koostootmise režiimil vähenes koostootmisjaama soojusenergia toodangu osakaal kogutoodangust 87,9%ni. Ülejäänud soojusenergia toodang toodeti Wärtsilä katlamaja kaudu, tipukatelt 2021 andmate põhjal ei käitatud. Võrku müüakse 12 828 MWh elektrienergiat. Alternatiiv 2 puhul 2021 aasta tuludeks kokku 3 874 423 eurot.

Modelleeritud mudelitest on kasumlikumaks osutus alternatiiv 1, mille nüüdisväärtus on 278 390 eurot, samal ajal kui alternatiiv 2 nüüdisväärtus on -1 409 449 eurot. Alternatiiv 2 puhul olid küll tootmismahud suuremad, kui 2021 aasta elektrihindade ja hakkepuidu hindade puhul ei ole kasulik maksimeerida elektritoodangut. Jahutamise teel kaduma läinud soojusenergia tootmiseks kulub ressurss on suurem kui elektrienergia toodangu kasvult saadav tulu. Kindlasti avaldab siin mõju ka asjaolu, et taastuvenergia toetus lõppeb 2027 aasta juuli kuus. Teostatud uuringu põhjal selgus, et AS Enefit Greenil oleks mõistlik investeerida soojussalvesti väljaehitamiseks kunagistest kütusemahutitest. Tulevikus oleks mõistlik uurida ka Paide linna võimalikku jahutusnõudlust ning selle hinda, kas Paide linnas oleks kaugjahutuse pakkumine koostootmise jääksoojuse toimetel konkurentsivõimeline.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] „Keskkonnainvesteeringute Keskus,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://kik.ee/et/projekt/ou-pogi-chp-combined-heat-and-power-jaama-ehitus>. [Kasutatud 22 03 2022].
- [2] T. Toomla, „Keskmise suurusega biokütusel töötava koostootmisjaama käivitamise ja eksploatatsiooni kogemus Paide koostootmisjaama näitel,” Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2014.
- [3] Riigiteataja, „Soojus- ja elektrienergia tõhusa koostootmise nõuded,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.riigiteataja.ee/akt/116122016010>. [Kasutatud 31 03 2022].
- [4] E. Arengufond, „Energiatalgud,” Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumi energeetika osakond, [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.energiatalgud.ee/Soojuse_salvestamine. [Kasutatud 16.04.2022].
- [5] T. D. E. Agency, „<https://ens.dk/en>,” Danish Ministry of Climate, Energy and Utilities, [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Analyser/technology_data_catalogue_for_energystorage.pdf. [Kasutatud 16.04.2022].
- [6] Ž. Bogdan ja D. Kopjar, „Improvement of the cogeneration plant economy by using heat accumulator,” *Energy*, kd. 31, nr 13, pp. 2285-2292, 2006.
- [7] V. Verda ja F. Colella, „Primary energy savings through thermal storage in district heating networks,” *Energy*, kd. 36, nr 7, pp. 4278-4286, 2011.
- [8] S. EL Marazgioui ja A. El Fadar, „Impact of cooling tower technology on performance and cost-effectiveness of CSP plants,” *Energy Conversion and Management*, kd. 258, 2022.
- [9] H. Saastamoinen ja S. Paiho, „Prospects for absorption chillers in Finnish energy systems,” *Energy Procedia*, kd. 149, pp. 307-316, 2018.
- [10] E. Arengufond, „Energiatalgud,” Majandus- ka Kommunikatsiooniministeeriumi energeetika osakond, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://energiatalgud.ee/Jahutustehnoloogia>. [Kasutatud 15.05.2022].
- [11] E. Fahlen ja L. E. O. Trygg, „Assessment of absorption cooling as a district heating system strategy – A case study,” *Energy Conversion and Management*, kd. 60, pp. 115-124, 2012.
- [12] „World Energy Co., LTD.,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://worldenergy.co.kr/en/portfolio-item/hwar-l-2/>. [Kasutatud 04.04.2022].
- [13] „EnergyPRO tarkvara ülevaade,” EMD International, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.emd-international.com/energypro/>. [Kasutatud 06.04.2022].
- [14] E. AS, „Börsihinnad,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://dashboard.elering.ee/et/nps/price?interval=minute&period=search&start=2020-12-31T22:00:00.000Z&end=2021-12-31T21:59:59.000Z&fbclid=IwAR3ms8PUDyW1EEGUuJ6Ug6bd_C3RoOjbTxWcriCHMhGgUzFBiMQtQ-wHCX8&show=table. [Kasutatud 24.04.2022].
- [15] E. I. A/S, „User's Guide energyPRO,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.emd-international.com/energyPRO/Tutorials%20and%20How%20To%20Guides/energyPROHlpEng-4.8%20Dec%202021.pdf>. [Kasutatud 24.04.2022].
- [16] Konkurentsiamet, „Kooskõlastatud soojuse piirhinnad,” Justiitsministeerium, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.konkurentsiamet.ee/et/vesi-soojus/soojus/kooskolastatud-soojuse-piirhinnad>. [Kasutatud 24.04.2022].

- [17] A. Elering, „Taastuenergia toetus,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://elering.ee/taastuenergia-toetus#tab0>. [Kasutatud 24.04.2022].
- [18] T. D. E. Agency, „Technology Data for Generation of Electricity and District Heating,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Analyser/technology_data_catalogue_for_el_and_dh.pdf. [Kasutatud 24.04.2022].

LISA 3. Viiteväärtused erinevatele kütustele soojusenergia eraldi tootmisel

Viiteväärtused erinevatele kütustele soojusenergia eraldi tootmisel

Kütus		Aur/soe vesi	Põlemisgaaside otsekasutamine
Tahke kütus	Kivisüsi/koks	88%	80%
	Ligniit/ligniitbrikett	86%	78%
	Turvas/turbakütus	86%	78%
	Puitkütus	86%	78%
	Tahked biolagunevad jäätmed ja põllumajanduslik biomass	80%	72%
	Põlevkivi	86%	86%
Vedelkütus	Nafta baasil toodetud vedelkütus	89%	81%
	Vedel biokütus	89%	81%
	Vedelad biolagunevad jäätmed	80%	72%
Gaasiline kütus	Maagaas	90%	50,40%
	Rafineerimisgaas/vesinik	89%	40,50%
	Biogaas	70%	37,50%
	Koksiahjugaas, kõrgahjugaas ja muu heitgaas	80%	72%

Alternatiiv 2 kulud:

OperatingExpenditures													
KTJ Püsikulud	540 000	45 000	45 000	45 000	45 000	45 000	45 000	45 000	45 000	45 000	45 000	45 000	45 000
KTJ Muutuvkulud	119 299	11 744	10 567	11 530	10 638	7 308	7 916	7 835	8 714	9 772	10 622	10 944	11 709
Hakkepuidu Kütusekulud	1 866 500	188 870	195 676	169 184	150 926	127 786	118 058	117 042	131 019	145 428	156 551	155 610	210 349
Müügmarginal	24 373	2 399	2 159	2 356	2 173	1 493	1 617	1 601	1 780	1 996	2 170	2 236	2 392
Wärtsilä püsikulud	260 000	21 667	21 667	21 667	21 667	21 667	21 667	21 667	21 667	21 667	21 667	21 667	21 667
Wärtsilä muutuvkulud	133 195	18 848	19 120	15 795	11 425	7 695	2 990	2 502	3 871	7 459	9 412	13 336	20 743
LNG kütusekulu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Soojussalvesti püsikulud	1 500	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125
Tipukatla jooksevkulu	15 600	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300
Tipukatla muutuvkulud	54 265	7 679	7 790	6 435	4 654	3 135	1 218	1 019	1 577	3 039	3 835	5 433	8 451
Jahutustorni hoolduskulud	22 500	1 875	1 875	1 875	1 875	1 875	1 875	1 875	1 875	1 875	1 875	1 875	1 875
Absorptsioonjahti hoolduskulud	8 640	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720
Total OperatingExpenditures	3 045 871	300 227	305 999	275 985	250 504	218 105	202 485	200 686	217 647	238 381	253 277	258 245	324 331
Net Cash from Operation	828 582	113 137	104 425	77 450	30 358	-16 995	-32 895	-27 387	-13 745	62 608	70 367	150 344	310 915
Investments													
Soojussalvesti investeering	300 000	300 000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Jahutustorn	150 000	150 000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Absorptsioonjahuti	280 000	280 000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total Investments	730 000	730 000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0