

Energiatehnoloogia instituut

**GAASIMOOTORIGA KOLMIKTOOTMISE
SÜSTEEMI ANALÜÜS**

ANALYSIS OF GAS ENGINE TRIGENERATION SYSTEM

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Aleksandra Amelina

Üliõpilaskood: 206022EACB

Juhendaja: Igor Krupenski, vanemlektor

Tallinn 2023

(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.

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

Autor:

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

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

Juhendaja:

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ allkirjastatud digitaalselt /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina *Aleksandra Amelina* (sünnikuupäev: 09.03.2001)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Gaasimootoriga kolmiktootmise süsteemi analüüs

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.

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

/ allkirjastatud digitaalselt /

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Aleksandra Amelina, 206022EACB

Õppekava, peeriala: EACB17/20 Keskkonna-, energia- ja keemiatehnoloogia, energiatehnoloogia peeriala

Juhendaja: vanemlektor Igor Krupenski, +372 58003989

Konsultant: Oleksii Kokosha, energialahenduste müügiinsener

Filter Solutions OÜ, +372 58057626, oleksii.kokosha@filter.eu

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Gaasimootoriga kolmiktootmise süsteemi analüüs

(inglise keeles) Analysis of Gas Engine Trigenation System

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Anda ülevaade olemasolevatest kolmiktootmise tehnoloogiatest.
2. Anda ülevaade kolmiktootmise süsteemis kasutatavatest seadmetest.
3. Välja arvutada kolmiktootmise süsteemi tasuvusaeg erinevate olukordade jaoks.
4. Hinnata gaasimootoriga kolmiktootmise süsteemi eeliseid ja puuduseid.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Tutvuda töö teoreetilise osaga.	01.03.2023
2.	Teha kolmiktootmise süsteemi tasuvusarvutusi erinevate olukordade jaoks.	01.04.2023
3.	Analüüsida ja esitada töö tulemusi.	01.05.2023

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: "30" mai 2023 a

Üliõpilane: Aleksandra Amelina "30" mai 2023. a

/ allkirjastatud digitaalselt /

Juhendaja: Igor Krupenski "30" mai 2023. a

/ allkirjastatud digitaalselt /

Konsultant: Oleksii Kokosha "30" mai 2023. a

/ allkirjastatud digitaalselt /

Programmijuht: Oliver Järvik "30" mai 2023. a

/ allkirjastatud digitaalselt /

SISUKORD

EESSÕNA	7
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	8
SISSEJUHATUS	9
1. SOOJUS- JA ELEKTRIENERGIA TOOTMINE	11
1.1 Soojus- ja elektrienergia eraldi tootmine	11
1.1.1 Elektrienergia tootmine	12
1.1.2 Soojusenergia tootmine	14
1.2 Soojus- ja elektrienergia koostootmine	16
1.2.1 Vasturõhuga auruturbiiniga koostootmine	18
1.2.2 Vaheltvõtuga auruturbiiniga koostootmine	19
1.2.3 Gaasiturbiniiga koostootmine	19
1.2.4 Kolbisepõlemismootoriga koostootmine	20
1.3 Jahutus-, soojus- ja elektrienergia kolmiktootmine	22
1.3.1 Tehnoloogia kirjeldus	22
1.3.2 Tehnoloogia rakendamine	22
1.3.3 Olukord Eestis	23
2. KOLMIKTOOTMISE SÜSTEEMI SEADMED	25
2.1 Gaasimootor	25
2.2 Gaasirong	28
2.3 Suitsugaaside soojusvaheti	28
2.4 Summuti	29
2.5 Oksüdatsioonikatalüsaator	29
2.6 Plaatsoojusvaheti	30
2.7 Jahutussüsteem	31
2.8 Absorptsioonijahuti	32
3. KOLMIKTOOTMISE SÜSTEEMI ANALÜÜS	34
3.1 Lähteandmed	34
3.1.1 Tehnilised andmed	35
3.1.2 Majanduslikud andmed	36
3.2 Tasuvusarvutused Eesti erinevate piirkondade jaoks	38
3.2.1 Tasuvusarvutused Narva võrgupiirkonna näitel	39
3.2.2 Tasuvusarvutused Tallinna võrgupiirkonna näitel	40
3.2.3 Tasuvusarvutused Vändra võrgupiirkonna näitel	40
3.3 Tasuvusarvutused 2020. – 2022. aastate andmete põhjal	41
3.3.1 Tasuvusarvutused 2020. aasta andmete põhjal	42

3.3.2 Tasuvusarvutused 2021. aasta andmete põhjal	43
3.3.3 Tasuvusarvutused 2022. aasta andmete põhjal	44
3.4 Tasuvusarvutused 2023. aastaks	45
3.5 Järeldused	46
KOKKUVÕTE	49
SUMMARY	51
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	54

EESSÕNA

Käesoleva bakalaureusetöö teema idee tuli insenerilahendusi pakkuvast ettevõttest Filter Solutions OÜ, kus autor töötab projekteerijana.

Autor tänab bakalaureusetöö juhendajat Tallinna Tehnikaülikooli Energiatehnoloogia instituudi vanemlektor Igor Krupenski, kes kiiresti vastas tekkinud küsimustele ja andis tagasisidet.

Autor tänab teda innustanud ja toetanud kolleege Filter Solutions OÜ ettevõttest energialahenduste müügiinsener Oleksii Kokosha ja projektijuht Aleksandr Godõrev.

Autor tänab oma pere ja sõpru, kes toetasid teda nii kogu õppimise jooksul kui ka käesoleva lõputöö valmimise käigus.

kolmiktootmine, elektrienergia, soojusenergia, gaasimootor, bakalaureusetöö

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

CCHP (ingl k *Combined Cooling, Heat and Power*) – jahutus-, soojus- ja elektrienergia kolmiktootmine

CHP (ingl k *Combined Heat and Power*) – soojus- ja elektrienergia koostootmine

COP (ingl k *Coefficient of Performance*) – absorptsioonijahuti soojustegur

EGHE (ingl k *Exhaust Gas Heat Exchanger*) – suitsugaaside soojusvaheti

GW – gigavatt, võimsuse ühik ($1 \text{ GW} = 1 \cdot 10^9 \text{ W}$)

GWh – gigavatt-tund, energia ühik ($1 \text{ GWh} = 3,6 \cdot 10^{12} \text{ J}$)

KSEJ – kondensatsioonielektrijaam

KTJ – koostootmisjaam

kW – kilovatt, võimsuse ühik ($1 \text{ kW} = 1 \cdot 10^3 \text{ W}$)

kWh – kilovatt-tund, energia ühik ($1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$)

MPa – megapaskal, rõhu ühik ($1 \text{ MPa} = 1 \cdot 10^6 \text{ Pa}$)

MW – megavatt, võimsuse ühik ($1 \text{ MW} = 1 \cdot 10^6 \text{ W}$)

MWh – megavatt-tund, energia ühik ($1 \text{ MWh} = 3,6 \cdot 10^9 \text{ J}$)

p – rõhk, Pa

Q_{alumine} – alumine kütteväärtus, kWh/m³

SEJ – soojuselektrijaam

T – temperatuur, K

t_{aastas} – töötundide arv aastas, h

η_{el} – elektriline kasutegur, %

η_{soojus} – soojuslik kasutegur, %

η_{kogu} – kogukasutegur, %

θ_{gaas} – maagaasi mahtkulu, m³/h

μm – mikromeeter, pikkuse ühik ($1 \mu\text{m} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}$)

SISSEJUHATUS

Energia tootmine liigub kliimaneutraalsuse suunas. Kliimamuutuste leevendamine on tähtis nii Euroopa Liidu kui ka kogu maailma jaoks. Euroopa Liidu eesmärgiks on kliimaneutraalsuse saavutamine 2050. aastaks, aga kasvuhoonegaaside heitkogused peavad vastu võetud direktiivide järgi juba 2030. aastaks poole võrra vähenema võrreldes 1990. aasta olukorraga. Toimuvad muutused toovad kaasa majanduslikku arengut, ühiskonna heaolu ja loomulikult ka keskkonna seisuga parandamist [1].

Erinevate tehnoloogiate tehnilis-majanduslik analüüs on eriti aktuaalne Eestis toimuva rohepöörde kontekstis. Käesolevas bakalaureusetöös analüüsitakse kolmiktootmise süsteemi, mis on efektiivne ja keskkonnasõbralik jahutus-, soojus- ja elektrienergia tootmise viis. Energia tootmine peab samas stabiilne, ohutu ja soodne olema. Kolmiktootmine on võimeline kõikidele nendele nõutele vastama.

Vaatamata sellele, et energiakandjate hinnad muutuvad kiiresti, saab uute süsteemide rajamise ja olemasolevate süsteemide ümberehitamise tasuvust enne investeeringu tegemist hinnata. Käesoleval aastal planeeritava investeeringu tasuvusaja arvutamisel ja selle analüüsis tuleb arvestada 2020. - 2022. aastate olukorda, mis oli keeruline maagaasi ja elektrienergia ebastabiilse turu tõttu.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on selgitada erinevaid energia tootmise tehnoloogiaid, anda ülevaade gaasimootoriga kolmiktootmise tehnoloogiast ja selles süsteemis kasutatavatest põhi- ja abiseadmetest, välja arvutada ja analüüsida võimalikku tasuvusaega mitme erineva olukorra jaoks ning välja selgitada, mis on kolmiktootmise süsteemi eelised ja puudused.

Käesolev bakalaureusetöö koosneb kolmest peatükist, igal nendest on olemas oma eesmärk. Iga peatükk on jagatud alapeatükkideks, milles keskendutakse konkreetsetele kolmiktootmisega seotud aspektidele.

Esimese peatüki eesmärgiks on anda ülevaade soojus- ja elektrienergia tootmise viisidest ja võimalustest. Selles peatükis selgitatakse täpsemalt eraldi tootmise, koos- ja kolmiktootmise tehnoloogiaid ning nende rakendamise võimalusi. Samuti antakse ülevaade energia tootmise olukorrast Eestis.

Teise peatüki eesmärgiks on anda ülevaade gaasimootoriga kolmiktootmise süsteemis kasutatavatest seadmetest. Teises peatükis selgitatakse, mis põhimõttel toodud seadmed töötavad ja mis rolli mängivad süsteemis.

Kolmanda peatüki eesmärgiks on välja selgitada tööstusettevõttes kasutusele võetava kolmiktootmise süsteemi võimalik tasuvusaeg mitme erineva olukorra raames ning hinnata selle potentsiaali analüüsides põhiliseid eeliseid ja puudusi võrreldes teiste soojusenergia saamise võimalustega.

Tasuvusarvutused on tehtud MS Exceli tarkvara abil. Kolmiktootmise süsteemi maksumus ja tehnilised parameetrid on saadud Filter Solutions OÜ ettevõttes läbi viidud intervjuu käigus, mida andis energialahenduste müügiinsener Oleksii Kokosha.

Aktuaalsed hinnad on saadud elektri ja gaasi ühendussüsteemi halduri Elering AS (maagaasi hind), elektribörsi Nord Pool (elektrienergia hind) ja Konkurentsiameti (soojusenergia hind) poolt avalikustatud materjalidest.

1. SOOJUS- JA ELEKTRIENERGIA TOOTMINE

Soojus- ja elektrienergia tootmine on lahutamatu osa kaasaegsest elust nii Eestis kui ka kogu maailmas. Energia tootmine on vajalik igal tasandil, see puudutab nii tööstusettevõtteid kui ka eluhooneid. Energeetikasektoris toimuvad pidevalt muutused, mis on tingitud selle valdkonna kiirest arengust ja energia tarbimise suurenemisest.

Käesoleva bakalaureusetöö esimene peatükk annab ülevaate energia tootmise viisidest ja võimalustest. See peatükk on omakorda jagatud kolmeks osaks: eraldi tootmine, koostootmine ja kolmiktootmine. Iga alapeatüki eesmärgiks on detailsemalt selgitada vastavat tehnoloogiat ning anda ülevaade selle rakendamise võimalustest, sh Eestis.

Alapeatükis 1.3 vaadeldakse lähemalt kolmiktootmise olemasolu ja selle protsessi eripärasid. Kolmiktootmine on põhimõtteliselt koostootmise edasiarendus [2], seega olemasolevad kolmiktootmise tehnoloogiad põhinevad alapeatükis 1.2 välja toodud koostootmise tehnoloogiatel.

1.1 Soojus- ja elektrienergia eraldi tootmine

Soojuselektrijaamad (SEJ) võivad olla kas kondensatsioonielektrijaamad (KSEJ), kus soojust on vaja vaid elektrienergia tootmiseks või koostootmisjaamad (KTJ), kus soojus leiab kasutuse ka. Tuleb arvestada, et eraldi tootmise kasutegur on palju väiksem, kui koos- ja kolmiktootmisel [3].

Eestis toodetakse ainult elektrienergiat erisugustes elektrijaamades. Nendeks on nii fossiilsetel kütustel töötavad KSEJ-d kui ka keskkonnasõbralikumad päikese-, tuule- ja hüdroelektrijaamad, kus kasutatakse ainult taastuvaid energiaallikaid [4].

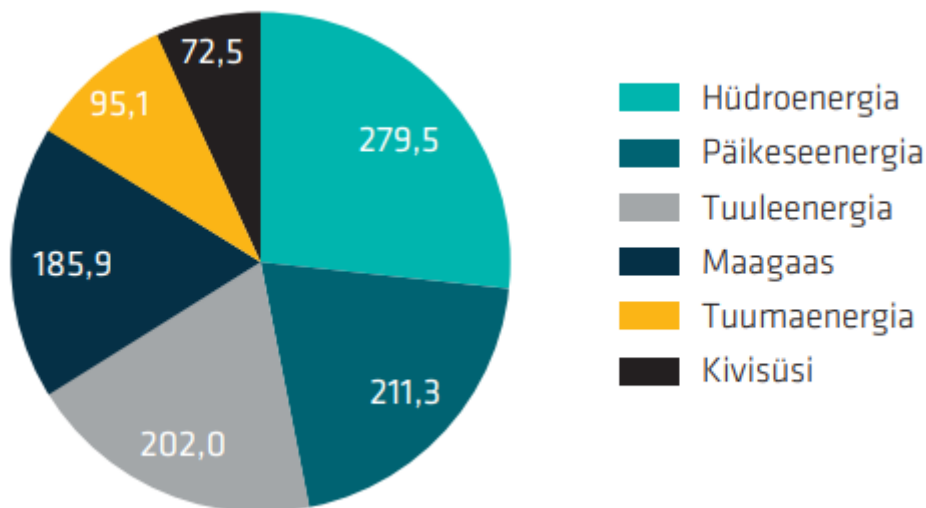
Soojusenergia tootmine toimub suures mahus katlamajades. Katlad võivad töötada gaasil, vedel- ja tahkekütustel. On olemas mitu võimalust katla efektiivsust hinnata, nt selle soojusliku kasuteguri välja arvutamine [5].

Katla soojuslik kasutegur jääb tavaliselt vahemikku 80 - 93%, kuid gaasil töötavate katelde kasutegur võib olla ka 95%. Suitsugaaside veeauru soojuse ärakasutamine võimaldab katla kasutegurit tõsta ning see võib ületada ka 100%. See tähendab, et vaatamata sellele, et koostootmisjaama kogukasutegur on kõrgem, siis just soojusenergia tootmise poolest on katlamaja parem valik [5].

1.1.1 Elektrienergia tootmine

Eesti elektrisüsteem on võimeline efektiivselt toimima vaid siis, kui on tagatud usaldusväärne primaarenergia ning stabiilne elektrijaamade kütustega varustus. Energeetikasektoris toimuvad maailma tasandil muutused seoses fossiilsete energiaallikate kasutamisest loobumisega. Aina rohkem eelistatakse taastuvaid energiaallikaid, mis on ohutud keskkonnale ning aitavad kaasa Euroopa Liidu ja teiste riikide kliimanetraalsuse poliitika eesmärkide täitmisele [6].

Elektriturg on ühtne kogu Euroopas ja selletõttu konkureerib Eesti tootmine teiste riikide omaga. Muutused energiasüsteemis toimuvad kiires korras, kuid installeeritud tootmisvõimsuste maht muutub aeglasemalt. Turu igapäevane tootmisvõimsuste maht ja kütuste osakaal muutuvad sõltuvalt ilmatingimustest, avariolukordadest, hooldusteenustest, kütuse valikust ja erinevatest teistest asjaoludest. Joonisel 1.1 toodud installeeritud tootmisvõimsused kõiguvad tegelikult mõnel määral [6].



Joonis 1.1 Euroopa installeeritud tootmisvõimsused (GW) kütuste kaupa 2021. aasta talve seisuga [6]

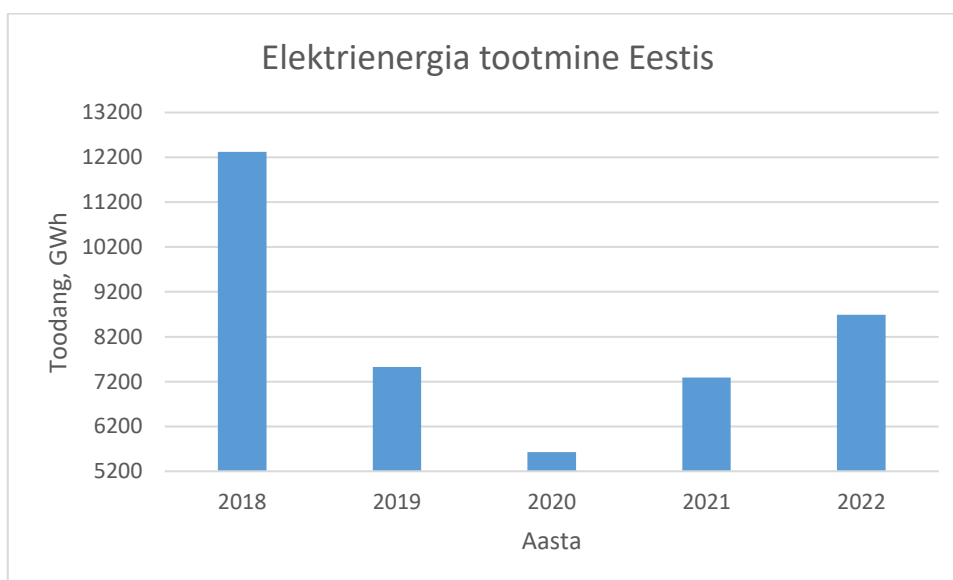
Elektrijaam on energia muundamise seadmete rajatis, milles toodetakse elektrienergiat muudest energiaallikatest. Elektrienergiaks muudetud energialiigi järgi elektrijaamad jagatakse peamiselt päikese-, tuule-, tuuma- ja hüdroelektrijaamadeks. Samuti on olemas loodetelektrijaamad, geotermaalelektrijaamad jt [7].

Eestis toimivad elektrijaamad, kus toodetakse ainult elektrienergiat ning koostootmisjaamad, kust lisaks elektrile saab ka soojust. Olemasolevad elektrijaamad erinevad üksteisest kasutatava kütuse poolest. Suurimat kogust elektrienergiat saadakse Eestis põlevkivist. Eesti elektrijaam (866 MW), Auvere elektrijaam (272 MW) ja Balti elektrijaam (192 MW) on kondensatsioonielektrijaamad, mis töötavad põlevkivil ja biokütusel [4].

Tabel 1.1 Eesti elektrisüsteemi tootmisvõimsused 2022. aasta seisuga [4]

Elektrijaama tüüp	Tootmisvõimsus, MW
Elektrijaamad (KSEJ)	1340
Päikeseelektrijaamad	510
Koostootmisjaamad (KTJ)	367,6
Tuuleelektrijaamad	317,3
Hüdroelektrijaamad	8

Jooniselt 1.2 on näha, kuidas on muutunud elektrienergia tootmine viimase viie aasta jooksul. Põlevkiviõli toodangu maht sai väiksemaks, mis mõjutas otseselt seda trendi. Maksimaalne toodang oli 2018. aastal (12325,48 GWh), edaspidi elektrienergia tootmine vähenes üsna kiiresti, 2020. aastal oli see näit juba kaks korda väiksem [8]. Järsk langus oli tingitud COVID-19 pandeemia aja piirangutest [9]. 2021. - 2022. aastatel kasvas elektrienergia toodang jälle ning taastuvate energiaallikate osakaal suurenes oluliselt võrreldes eelmiste aastate andmetega [8, 10].



Joonis 1.2 Elektrienergia tootmine Eestis 2018. - 2022. aastatel [8]

1.1.2 Soojusenergia tootmine

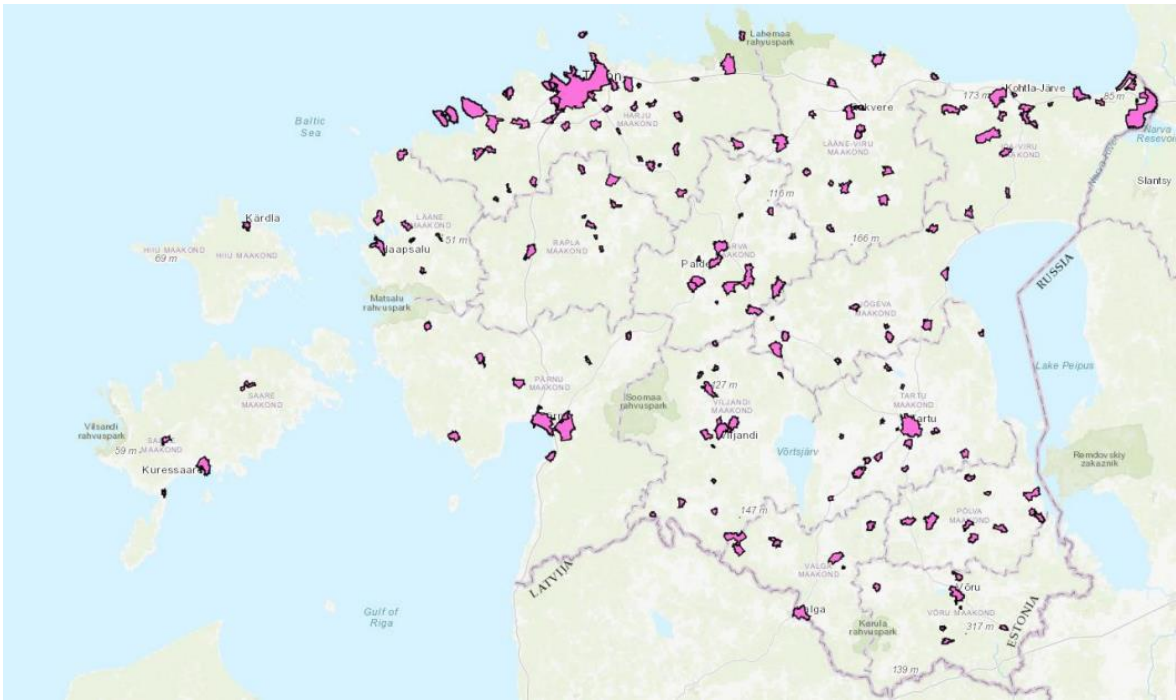
Eestis toodetakse soojust peamiselt katlamajades. Katel on seade auru või kuuma vee tootmiseks. On olemas erinevad katelde tüübid, nt võib katlaid jagada kasutatava kütuse järgi. Kaugküttevõrguga ühendatud katlamajades asuvad katlad võivad töötada gaasil, tahke- või vedelkütusel [2].

Gaaskütuse populaarsemaks liigiks on keskkonnasõbralik maagaas, mille põletamisel ei teki peenosakesi ega teisi tahkeid jäätmeid. Eestis on umbes 4000 registreeritud katelt. Maagaasil töötavad katlad on summaarse võimsuse järgi esimesel kohal (2952 MW), sellele järgnevad biomassikatlad (1161 MW), mille kütuseks on puit. Hakkepuidu kasutamine on veelgi keskkonnasõbralikum, sest see on taastuv loodusressurss, mille põletamisel ei teki teisi keskkonnaohtlikke gaase peale süsihappegaasi [2].

Tabel 1.2 Summaarne Eestis olevate katelde võimsus kasutatava kütuste kaupa [2]

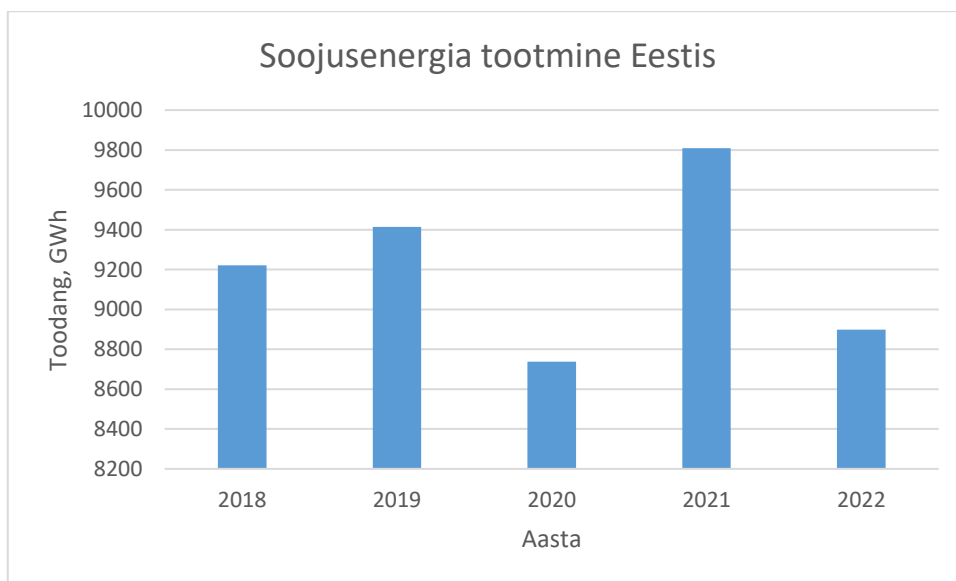
Kasutatav kütus	Katla võimsus, MW
Maagaas	2952
Puit	1161
Põlevkiviõli	393
Kerge kütteõli	347
Turvas	89
Põlevkivi	43
Elekter	20
Kivisüsi	20
Raske kütteõli	10
Põlevkivi- ja biogaas	6
Rohtne biomass	4

Eestis on 2022. aasta andmete järgi kokku rohkem kui 230 kaugküttevõrku (joonis 1.3), millest suurem osa (> 130) kasutab kütusena kas osaliselt või täielikult puiduhaket või muud puidupõhist kütust (nt halupuitu, puidugraanule). Tippkoormused on kaetud sageli ikka veel fossiilsetel kütustel töötavate katelde abil. Muidu katlad, mis töötavad vedelkütustel (kerge ja raske kütteõlil, põlevkiviõlil) on tavaliselt reservkatlad. Kõikidest kaugküttevõrkudest 11 kasutavad kütusena turvast, sest see on soodsama hinna ja väiksema keskkonnamõjuga kohalik kütus [11].



Joonis 1.3 Eesti kaugküttepiirkonnad [11]

Eesti soojusenergia tootmine kõigub mõnel määral viimase viie aasta lõikes. Jooniselt 1.4 võib näha, et soojusenergia minimaalne toodang oli 2020. aastal (8738 GWh), mis oli põhjustatud kõigepealt oodatud soojemast talvest. Maksimaalne toodang oli 2021. aastal (9809,5 GWh). 2022. aastal tootmise maht sai jälle väiksemaks, mis võib olla jälle soojemast ilmast tingitud. Erinedes elektrienergia toodangust oli samal perioodil soojusenergia toodang suurem [8].



Joonis 1.4 Soojusenergia tootmine Eestis 2018. - 2022. aastatel [8]

1.2 Soojus- ja elektrienergia koostootmine

Soojus- ja elektrienergia koostootmine (ingl k *Combined Heat and Power (CHP), Cogeneration*) on energia kahe vormi samaaegne tootmine, mille juures kasutatakse elektrienergia tootmise protsessis tekkivat heitsoojust kasulikult [12].

Soojus- ja elektrienergia koostootmise iseloomulikuks tunnuseks on säästlik kütuse kasutamine, sest koostootmisel saab samast kütuse kogusest mitu korda rohkem soojust ja elektrit, kui nende eraldi tootmisel. Peale selle mõjutab tõhus energiakasutus positiivselt energiavarustuse kindlust [2].

Koostootmist rakendatakse aktiivselt nii Euroopa Liidus kui ka kogu maailmas. Järgnevalt on loetletud olemasolevad koostootmise tehnoloogiad:

- kombineeritud tsükliga gaasiturbiin koos utilisaatorkatlagaga;
- gaasiturbiin koos utilisaatorkatlagaga;
- vasturõhuraaturturbiin;
- vaheltvõttudega auruturbiin;
- sise põlemismootor;
- mikroturbiin;
- Stirling-mootor;
- kütuseelement;
- orgaanilise Rankine'i ringprotsessiga seade;
- muud tehnoloogiad või eelmainitud tehnoloogiate kombinatsioonid [13].

Koostootmisjaam (KTJ) on soojuselektrijaam (SEJ), kus toodetakse nii soojust kui ka elektrit. KTJ võib energiat kasutada otse või omatarbimiseks toota või soojuse ja elektriga teisi lõpptarbijaid võrgu kaudu varustada. Tarbijateks võivad olla nt ärihooned (büroohooned, hotellid, kaubanduskeskused), elamud, asutused (koolid, haiglad, vanglad), tööstusettevõtted (toiduainete tööstus, keemiatööstus, põllumajandus, tselluloosi tootmine), reoveepuhastusjaamad, teised energeetika ettevõtted jne [12].

Koostootmisjaamu võib liigitada erinevate tunnuste järgi. Need on loetletud allpool.

Kasutatud kütuse järgi:

- gaasil töötav KTJ;
- biokütusel töötav KTJ;
- põlevkivil töötav KTJ;
- jäätmetel töötav KTJ.

Võimsuse järgi:

- väikse võimsusega (< 100 MW) KTJ;
- keskmise võimsusega (100 - 1000 MW) KTJ;
- suure võimsusega (> 1000 MW) KTJ.

Auru rõhu järgi:

- madalrõhuga (< 3 MPa) KTJ;
- keskrõhuga (3 - 5 MPa) KTJ;
- kõrgrõhuga (5 - 17 MPa) KTJ;
- ülekõrgrõhuga (17 - 22,5 MPa) KTJ;
- ülekriitilise rõhuga (22,5 - 30 MPa) KTJ;
- ülikriitilise rõhuga (> 30 MPa) KTJ [3].

Koostootmisjaama suurema kasuteguri põhjuseks on see, et seal tagastatakse heitgaaside soojus süsteemi ja kasutatakse seda energia vajaduste katmiseks. Kondensatsioonielektriijaamades soojus lastakse õhku ehk see kaob ära [12].

Koostootmisjaamadest saadud soojusenergia hind on 1,5 - 2 korda odavam katlamajades toodetud soojuse hinnast. Kasutatud kütuse liik ja selle kogus mõjuvad otseselt hinna moodustamisele. Erinevates piirkondades kooskõlastatud hindadel võib olla suur vahe nt maagaasituru ebastabiilsuse tõttu [14].

Eesti koostootmisjaamad asuvad peamiselt suurtes linnades, kus on olemas piisav kaugkütte soojuskoormus [2].

Tabel 1.3 Eesti koostootmisjaamad (elektriline võimsus > 1 MW) 2022. aasta seisuga [2, 4]

Koostootmisjaam	Kasutatav kütus	Elektriline võimsus, MW	Soojuslik võimsus, MW
Iru Elektriijaam	maagaas	95	200
VKG Energia Põhja SEJ	generaatorgaas	87	379
Tartu Elektriijaam	biomass	25	50
Utilitas Tallinna SEJ, Väo 1	biomass	25	67
Pärnu Elektriijaam	biomass	24	48
Utilitas Tallinna SEJ, Väo 2	biomass	21	76
Iru Elektriijaama jäätmeplakk	segaolmejäätmed	17	50
Mustamäe KTJ (Utilitas Tallinn AS)	biomass	10	47
Osula KTJ	biomass	10	27
Imavere KTJ	biomass	10	27
Sillamäe SEJ	biomass	7	18

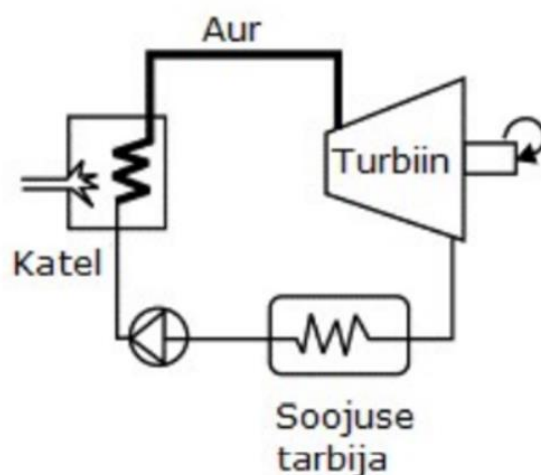
Tabel 1.3 järg. Eesti koostootmisjaamad (elektriline võimsus > 1 MW) 2022. aasta seisuga [2, 4]

Helme KTJ	biomass	6,5	15
Kuressaare KTJ	biomass	2,3	9,6
Jämejala KTJ	maagaas	1,8	1,7
Paide KTJ	biomass	1,7	8
Aravete biogaasijaam	biogaas	1,7	2
Ilmatsalu biogaasijaam	biogaas	1,5	1,5
Vinni biogaasijaam	biogaas	1,4	1,4
Kiviõli Keemiatööstus OÜ SEJ	uttegaas	1,3	6,5
Oisu biogaasijaam	biogaas	1,2	1,2
Rakvere KTJ	biomass	1	5,3

Koostoomisjaamas mängib suurt rolli soojusjõuseade, millena kasutatakse auruturbiiniseadmeid, gaasiturbiiniseadmeid, kombineeritud seadmeid (kombineeritud tsükliga auru- ja gaasiturbiiniseadmeid) või kolbsisepõlemismootoreid [3].

1.2.1 Vasturõhuga auruturbiiniga koostootmine

Vasturõhuturbiin on soojusjõuseade, milles toimub auru osaline eemaldamine enne lõpliku rõhuni paisumist. Auru energiat saab kasutada hoone kütteks või tööstusettevõtte tehnoloogilistes protsessides [3]. Auru saab viia ka kaugkütte soojusvahetisse, kuhu see suundub turbiinist, millel pole kondensaatorit. Turbiini vasturõhk peab vastama kaugkütte soojusvõrku suunduva vee temperatuurile (mis sõltub omakorda välisõhu temperatuurist). Aurujõuseade saab toota piisavalt suurt elektrienergia kogust vaid siis, kui tegemist on madalrõhulise auruga [2].

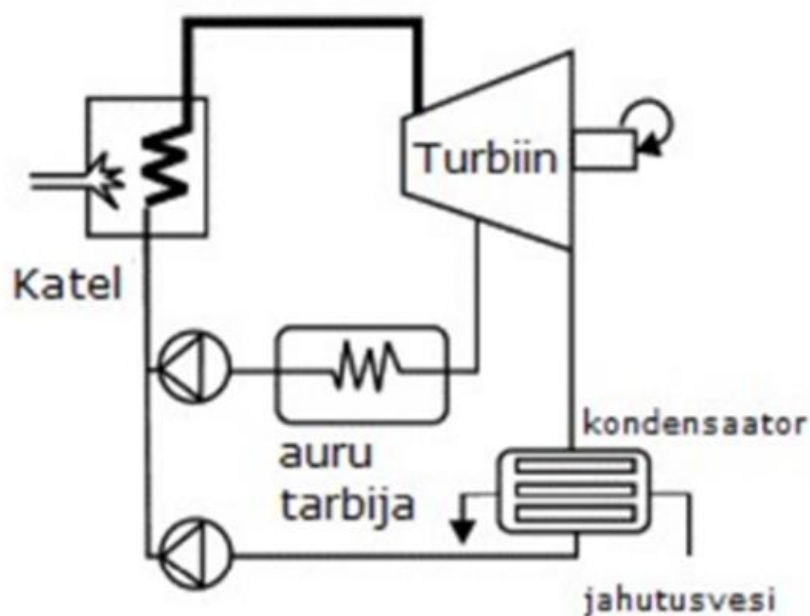


Joonis 1.5 Vasturõhuga auruturbiini põhimõtteline skeem [2]

1.2.2 Vaheltvõtuga auruturbiiniga koostootmine

Vaheltvõtuga auruturbiin on soojusjõuseade, kus aur osaliselt väljub turbiinist enne lõpliku rõhuni paisumist. On olemas kaks aurujõuseadme tüüpi: tööstusliku auru vaheltvõttud ja kaugkütte vaheltvõttud, mille korral on vaheltvõetava auru rõhk madalam (0,07 - 0,25 MPa). Tööstuslik vaheltvõtt teostatakse kõrgemal rõhul (>0,6 MPa) [3].

Vaheltvõtuga auruturbiini eeliseks on see, et suunatud auru kogust saab mugavalt reguleerida ning väline soojuskoormus ei mõjuta kuidagi selle elektrilist koormust [3]. Kui soojuskoormust pole, siis saab vaheltvõtuga auruturbiin ka ainult konsensatsioonirežiimis töötada [2].



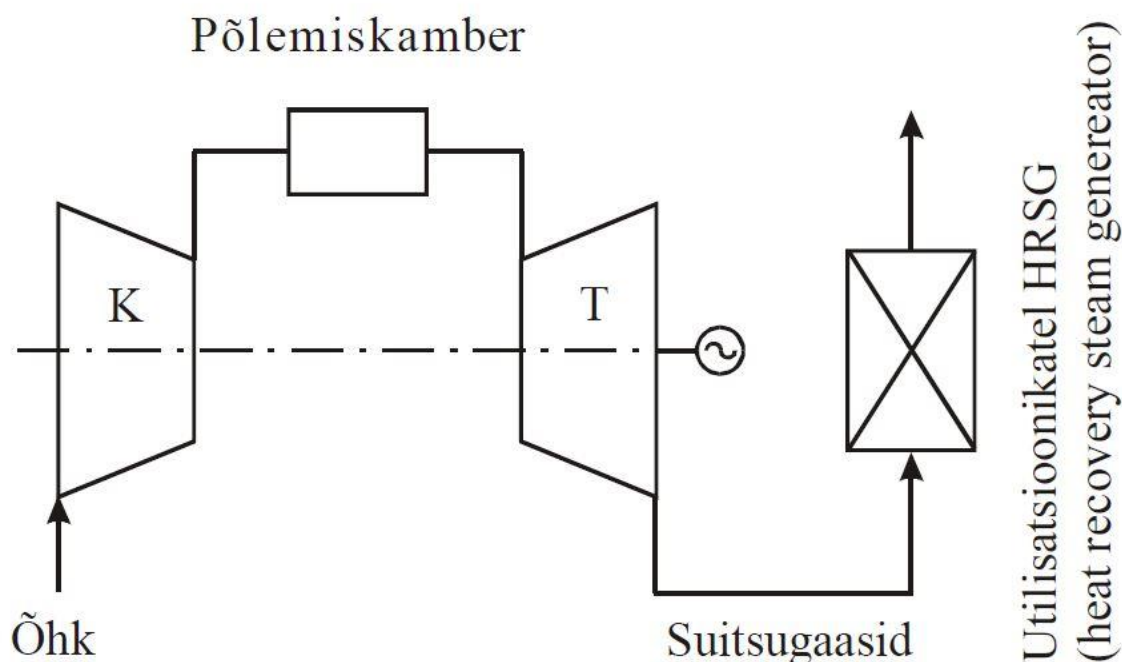
Joonis 1.6 Vaheltvõtuga auruturbiini põhimõtteline skeem [2]

1.2.3 Gaasiturbiiniga koostootmine

Gaasiturbiin on soojusjõuseade, mis on üsna sarnane ehituse poolest auruturbiiniga. Muidu kasutatakse turbiini rootori pöörlemiseks mitte auru, vaid kütuse põlemisel eraldatud kõrge rõhuga gaasi. Kütuse põlemine toimub põlemiskambris, kuhu kõrge rõhu all suunatakse kasutatav kütus ja õhk. Gaasiturbiinjõuseadme töö põhineb Braytoni ringprotsessil [2, 3].

Gaasiturbiinide elektriline kasutegur on umbes 30 - 35%. Seda saab tõsta mitmeastmelise põletamisega [3].

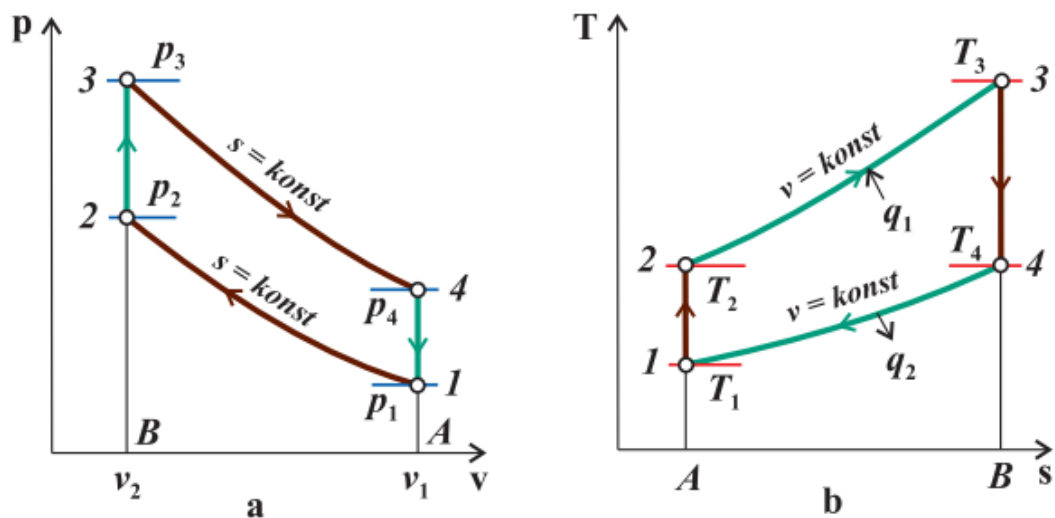
Kui koostootmise süsteemis kasutatakse soojusjõuseadmena gaasiturbiini, siis peab soojustarbija piisavalt suur võimsus tagatud olema, mille väärtus ei muutu ajas. Koostootmisjaamade gaasiturbiinide võimsus jääb vahemikku 0,5 - 400 MW. Eesti koostootmisjaamades ei kasutata seda tehnoloogiat [2].



Joonis 1.7 Gaasiturbiini põhimõtteline skeem [3]

1.2.4 Kolbisepõlemismootoriga koostootmine

Sisepõlemismootor on soojusjõuseade, mille töö põhineb kas Dieseli või Otto ringprotsessil. Otto põhimõttel toimivate gaasimootorite kütuseks on tavaliselt kas maagaas või biogaas, Dieseli mootorite kütuseks on kas diisel, selle segu biolisanditega (biodiisel), masuut või teised naftast eraldatud fraktsioonid. Soojusenergiat on võimalik saada nii eraldunud heitgaaside soojuse utiliseerimisel kui ka gaasimootori jahutussüsteemist. Üldiselt jääb sisepõlemismootori elektriline võimsus vahemikku 100 - 5000 kW. Tänapäeval kasutatakse ka 9 - 20 MW võimsusega sisepõlemismootoreid. Kütuse energiast on võimalik saada 40% elektrienergiat ja 50% soojusenergiat. Gaasimootorit saab kombineerida auruturbiiniga ning tänu sellele on saavutatav elektriline kasutegur kuni 50% [2, 3].



Joonis 1.8 Otto ringprotsessi diagrammid [15]

Tabelis 1.4 on kajastatud energia tootjate poolt esitatud installeeritud tootmisvõimsused ja kasutatavad kütused gaasimootoriga koostootmisjaamades Elering AS-i 2022. aasta Eesti elektrivarustuskindluse aruande andmete järgi [4].

Tabel 1.4 Eesti koostootmisjaamade gaasimootorite (võimsus >0,5 MW) parameetrid [4]

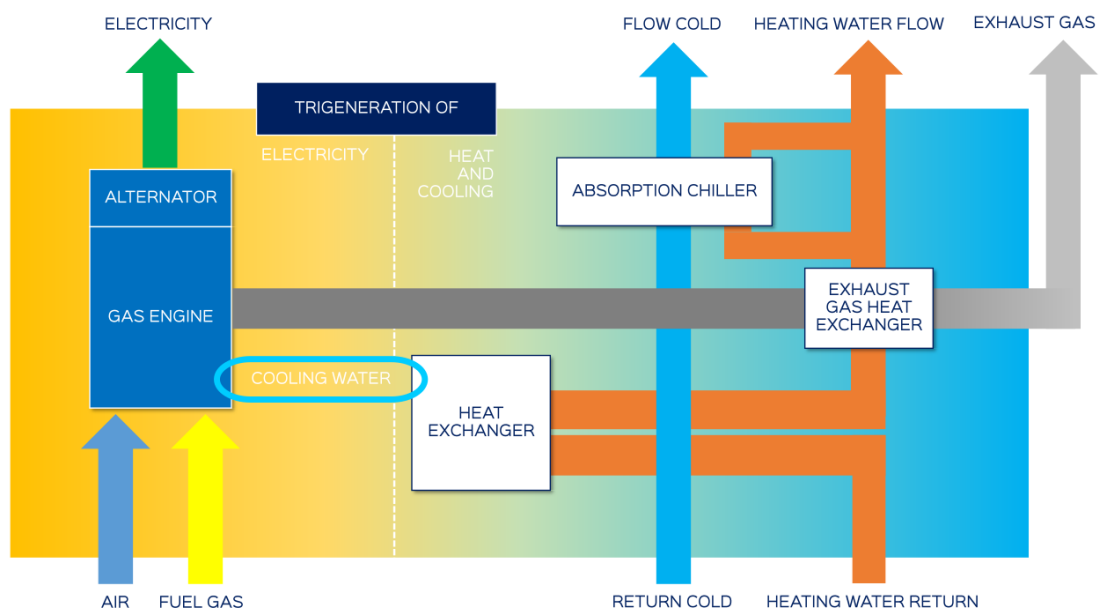
Koostootmisjaam	Kasutatav kütus	Võimsus, MW
Sillamäe II KTJ	maagaas	7,1
Grüne Fee Eesti AS	maagaas	4,1
Aravete Biogaas OÜ	biogaas	2,0
Jämejala KTJ	maagaas	1,8
Ilmatsalu biogaasijaam	biogaas	1,5
Vinni biogaasijaam	biogaas	1,4
Oisu biogaasijaam	biogaas	1,2
Tallinna Prügilagaas OÜ	prügilagaas	1,9
Põlva KTJ	maagaas	0,9
Kopli KTJ	maagaas	0,9
WTC Tallinn AS	maagaas	0,6
Tartu Aardlapalu prügila KTJ	prügilagaas	0,5

1.3 Jahutus-, soojus- ja elektrienergia kolmiktootmine

Jahutus-, soojus- ja elektrienergia kolmiktootmine (ingl k *Combined Cooling, Heat and Power (CCHP), Trigeneration*) on energia kolme vormi üheaegne tootmine. Soojusenergiat ja jahutusenergiat toodetakse tänu sellele, et elektrienergia tootmisel tekkinud heitsoojust on võimalik mitmel viisil ära kasutada. Tekkinud soojust ei lasta keskkonda, nagu tehakse KSEJ-s, vaid kasutatakse tööstusettevõtte tehnoloogilistes protsessides ja/või hoone kütteks ning tarbevee soojendamiseks [16].

1.3.1 Tehnoloogia kirjeldus

Kolmiktootmise protsessil ühendatakse koostootmisjaama jahutusseadmega (tavaliselt absorptsioonijahutiga), mis toodab jahutusenergiat tekkinud heitsoojusest. Absorptsioonijahuti eeliseks on see, et jahutusenergia tootmiseks kasutab see energiaallikana tekkinud heitsoojust ning samuti selle elektrikulud on minimaalsed võrreldes teiste jahutusseadmetega [16]. Kuna kolmiktootmine baseerub koostootmise tehnoloogia tööpõhimõttel, siis protsessi kasutegur langeb koostootmise omaga kokku. Kogukasutegur ületab 90% [17].



Joonis 1.9 Kolmiktootmise tehnoloogia põhimõtteline skeem [16]

1.3.2 Tehnoloogia rakendamine

Kolmiktootmist kasutatakse siis, kui on olemas hooajaline või aastaringne jahutusenergia vajadus. Külma vett kasutatakse õhu konditsioneerimiseks või

tehnoloogiliste protsesside jahutamiseks [16]. Kolmiktootmine on laialt levinud toiduainetööstuses, suurtes kaubanduskeskustes, lennujaamades, andmekeskustes, hotellides, pankades, haiglates, ärihoonetes, keemiatööstuses. Seda samuti saab kasutada vesiniku tootmises, reovee puhastamises ja teistes valdkondades. See tehnoloogia on sobilik ka kaugküttevõrguga ühendatud objektidele [16, 18].

Kolmiktootmise süsteem võimaldab mugavalt reguleerida soojus- ja jahutusenergia tootmise osakaalu vastavalt vajadustele. Soojus- ja jahutusenergia saab toota kas samal ajal või valida vaid seda energia tüüpi, mis on konkreetsetel tingimustel vajalik. Kõik ressursid leiavad kasutuse sobival ajal, mis tagab tõhusa ja keskkonnasõbraliku tootmise. Tänu sellele on võimalik säästa umbes 30% primaarkütust [16, 17].

Käsitatud süsteemis võib kasutada nii fossiilseid kui ka taastuvaid kütuseid sõltuvalt valitud tehnoloogiast. Kütuste valik on väga lai: diiseli, maagaasi, petrooli, lennukikütuse, biogaasi (sh prügilagaasi), propaan, biomass (sh puiduhakke, turvas). Kolmiktootmist võib olemasolevasse süsteemi integreerida, see aitab nt katlamaja koormust vähendada. Kolmiktootmist saab rakendada ka uutes innovatiivsetes jaamades. Seda variant tuleb kaaluda, kui on plaanis uut tootmishoonet projekteerida, lisa katlamaja paigaldada või on soovi olemasolevat soojuselektrijaama ümber ehitada [17, 19].

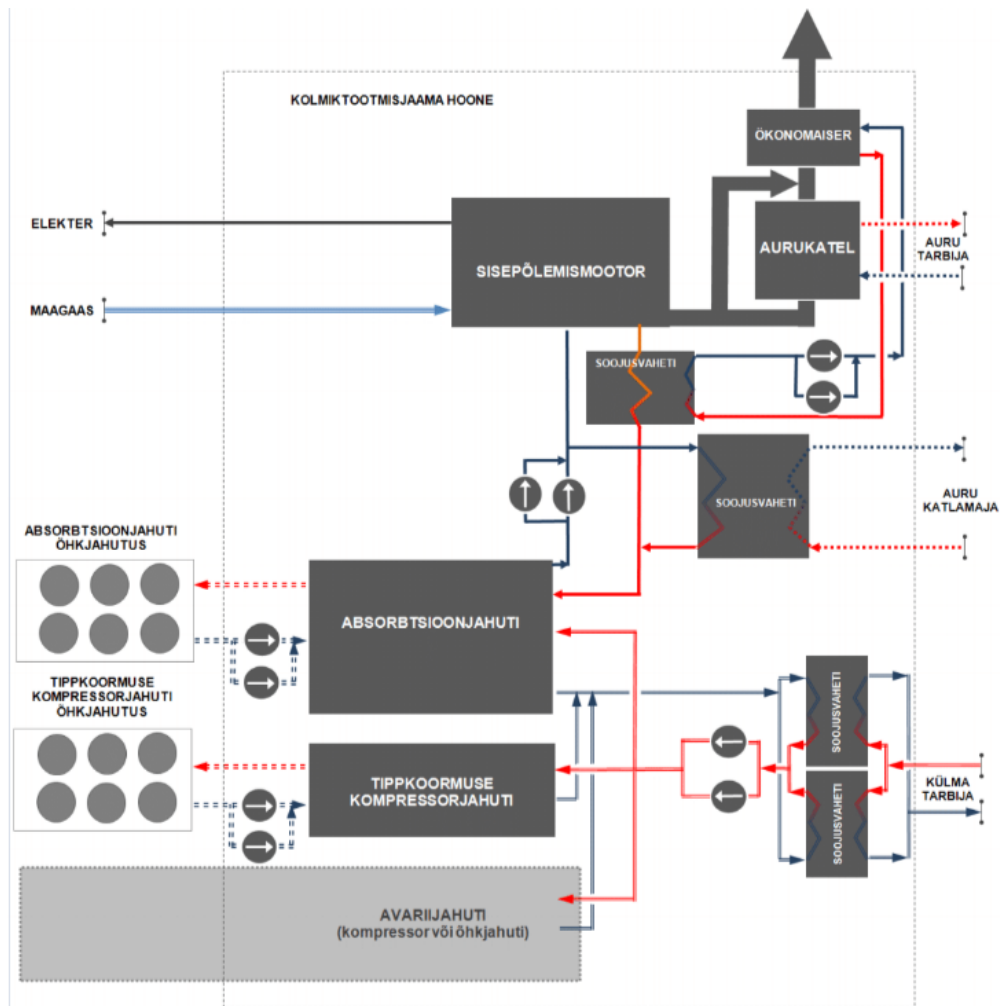
Kolmiktootmise süsteem aitab ettevõtetel kütust säästa, võimaldab süsihappegaasi (CO₂) emissioonide kogust oluliselt vähendada ja elektriarveid alandada. Käsitleva tehnoloogia kasutamine soodustab nii looduse hoidmist kui ka ettevõtte kasumit teenimist [16].

1.3.3 Olukord Eestis

Kolmiktootmist on tunda kogu maailmas, kuid Eestis pole ühtegi kolmiktootmisjaama. Eesti Energia poolt oli 2013. aastal ehitatud Balti riikides ainulaadne kolmiktootmise tehnoloogial põhinev jaama Painküla tööstusalale. Jaamaga oli plaanis varustada energiaga mitmeid ettevõtteid, kuid mõne aja pärast oli see demonteeritud. Põhiliseks põhjuseks oli see, et õlitehas Weroll oli läinud pankrotti [20, 21].

2010. aastal korraldatud hanke eesmärgiks oli projekteerida ja ehitada Painküla tööstusalale sisepõlemismootoriga kolmiktootmisjaama. Kolmiktootmisjaam oli valmistatud konteinerlahendusena. Konteiner paigutati olemasoleva katlamaja juurde. Kolmiktootmisjaama põhiseadmeteks oli sisepõlemismootor, aurukatel, generaator, absorptsioonijahuti, avariijahutusseade, automaatjuhtimise süsteem, soojusvahetid ja elektri jaotusseadmed [22]. Paigaldatud maagaasil töötava sisepõlemismootori mehaaniliseks võimsuseks oli 4390 kW ning kogukasuteguriks oli 87,2% [23].

Kolmiktootmisjaama jahutusenergia süsteem oli projekteeritud aastaringseks töötamiseks. Absorptsioonijahuti kasutab kõigepealt maksimaalselt gaasimootori tööst eralduva madalpotentsiaalse soojust ära, mis on vajalik jahutusenergia tootmiseks. Absorptsioonijahuti COP (ingl k *Coefficient of Performance*) peab olema vähemalt 0,7. COP on mõiste, mida kasutatakse jahutusseadme tõhususe kirjeldamiseks. Jahutusenergia tootmiseks oli pakutud kaks võimalikku süsteemi, millest joonisel 1.10 näidatud oli kõige soodsam [22].



Joonis 1.10 Kolmiktootmisjaama jahutusenergia tootmise põhimõtteline skeem [22]

Enne kolmiktootmise süsteemi rajamist tuleb eelprojekti etapis selle tasuvusaega hinnata. Kolmiktootmise alginvesteering on kallim, kui eraldi tootmise ja koostootmise omad, seepärast tuleb täpne tehniline ja majanduslik analüüs konkreetse olukorra raames läbi viia. Seda võib muutuv tarbimise olukord takistada. Üldjuhul on kolmiktootmise tasuvusaeg üsna lühike [19].

2. KOLMIKTOOTMISE SÜSTEEMI SEADMED

Käesolevas bakalaureusetöös vaadeldakse lähemalt gaasimootoriga kolmiktootmise tehnoloogiat ning teise peatüki peamiseks eesmärgiks on anda ülevaade selle tüübi energiatootmise süsteemis põhilistest kasutatavatest seadmetest. Alapeatükkides 2.1 - 2.8 on toodud tähtsaimate kolmiktootmise süsteemi seadmete ja nende tööpõhimõtete lühikirjeldus ning pildid nendest.

Kolmiktootmise tehnoloogial põhinev kompleks koosneb koostootmisjaama põhi- ja abiseadmetest ning jahutusseadmest. Põhimõtteliselt on see omavahel ühendatud kolmest seadmete plokist koosnev kompleks.

Esimene plokk on elektrienergia tootmise plokk, mis on tähtsaim süsteemi osa nii kooskui ka kolmiktootmise lahendustes. Sinna kuuluvad gaasimootor (põhiseade), sellega ühendatud elektrigeneraator ning abiseadmed, milleks on summuti, gaasirong, ventilatsioonisüsteem, määrdeõli süsteem, sulgemis- ja reguleerimisarmatuur (ventiilid) ja igasugused automaatika- ja mõõteseadmed.

Teine plokk on soojusenergia tootmise plokk, mille osadeks on suitsugaaside soojusvaheti, soojusvaheti, gaasimootori mitmeastmeline jahutussüsteem, mis koosneb kõrgtemperatuursest jahutussüsteemist (70/90 °C) ja vajadusel madaltemperatuursest jahutussüsteemist (30/40 °C), sulgemis- ja reguleerimisarmatuur ja igasugused automaatika- ja mõõteseadmed.

Kolmas plokk on jahutusenergia tootmise plokk, mida moodustavad absorptsioonijahuti (põhiseade), kuivajahutid, tagasivoolu ja külma vee pumbajaamad, sulgemis- ja reguleerimisarmatuur ja igasugused automaatika- ja mõõteseadmed.

Sõltuvalt tööstusettevõtte vajadustest ja valitud tehnoloogiast saab süsteemi lisada kemikaalide doseerimise plokki (orgaaniliste ainete veest eemaldamiseks), veepehmedussüsteemi, võrguvee pumbajaama ja vastavaid automaatika- ja mõõteseadmeid.

2.1 Gaasimootor

Gaasimootor on seade, mis muundab kasutatava kütuse (nt maagaasi, biogaasi, prügilagaasi) keemilist energiat mehaaniliseks energiaks. Mehaanilisest energiast saadakse elektrienergia mootori võlliga ühendatud elektrigeneraatori (üldjuhul

vahelduvvoolugeneraatori) abil. Gaasimootorid on üsna sarnased ehituse poolest diiselmootoritega, kuid on erinevad hinna ja tööpõhimõtte poolest [24].

Gaasimootor kui sisepõlemiskolbmootor töötab Otto ringprotsessi põhimõtte alusel. See tähendab, et toimub püsimahuline soojuse suunamine protsessi. Kütuse põlemisel vabanev soojus muundub mehaaniliseks tööks otse mootori silindris, kütus põleb väga kiiresti ning kolb (mootori põhielement) ei jõua selles ajavahemikus ülemisest surnud seisust teisele poolele üle minna [15].

Gaasimootoril on kõrge elektriline võimsus (tavaliselt 100 kW – 5 MW), see on mugav lahendus nii ainult elektri tootmiseks kui ka mitme energia vormi koos- ja kolmiktootmiseks. See on tingitud sellest, et elektri tootmisel ei eraldu nii palju heitsoojust, mida oleks vaja süsteemi tagastada. See teeb kogu tehnoloogiat soodsamaks ja keskkonnasõbralikumaks [24].

Gaasimootorid saastavad õhku võrreldes diiselmootoritega vähem, mis teeb neid paremaks variandiks linnas asuvate tööstusettevõtete energia saamise ühiku jaoks. Gaasimootor valitakse individuaalselt ja arvestatakse ettevõtte vajadustega. Gaasimootori hind on kõrge, sest see sõltub seadme suurusest ja materjalidest. Samuti gaasimootori hoolduskulud on kõrged, sest seda tuleb regulaarselt hooldada, et selle tööiga oleks võimalikult pikk [24].

Maailmas väga tuntud gaasimootorite tootja INNIO Jenbacher pakub mitu tüüpi mootoreid, mis võivad erineval kütusel (maagaas, söekaevanduse gaas, kanalistasioonigaas, biogaas, prügilagaas, leekgaas) töötada. Kokku toodab Jenbacher 2023. aasta andmete järgi 10 erinevat mudelit, mis on kättesaadavad kas üksiku mootori, koostootmise mooduli või konteinerina. Jenbacher'i mootori elektriline võimsus jääb vahemikku 249 - 10400 kW sõltuvalt tüübist. Üldised parameetrid iga olemasoleva tüübi kohta on esitatud allpool olevas tabelis [24].

Tabel 2.1 INNIO Jenbacher gaasimootori erinevate tüüpide tehnilised parameetrid [24]

	2. tüübi mootor	3. tüübi mootor	4. tüübi mootor	6. tüübi mootor	9. tüübi mootor
Elektriline võimsus, kW	249 - 333	472 - 1067	749 - 1562	1634 - 4507	10400
Soojuslik võimsus, kW	266 - 409	530 - 1311	750 - 1906	1668 - 4706	10021
Elektriline kasutegur, %	>39,1	>43,3	>44	>47,1	>48,7
Soojuslik kasutegur, %	>52	>49,9	>50,5	>47,7	>45,3



Joonis 2.1 INNIO Jenbacher J616 (JMS 616 GS-N.L) gaasimootor [24]

Täpsemad parameetrid sõltuvad valitud kütuse liigist, mille kütteväärtus ja koostis mõjutavad nii elektri kui ka soojuste väljundit ning kogukasutegurit, mida saadakse elektri- ja soojusenergia kasutegurite liitmisel vastavalt valemile (2.1).

$$\eta_{kogu} = \eta_{el} + \eta_{soojus} \quad (2.1)$$

kus η_{kogu} – elektri- ja soojusenergia koostootmise kogukasutegur, %,

η_{el} – elektriline kasutegur, %,

η_{soojus} – soojuslik kasutegur, %.

Vajalikud lisaseadmed kas sisalduvad koos mootoriga koostootmise mooduli tarnes või neid tellitakse eraldi kindlaks määratud parameetrite järgi [24].

2.2 Gaasirong

Gaasirong (ingl k *Gas Train*) sisaldab kütusena kasutatava gaasi filtreerimiseks 3 μm ($=3 \cdot 10^{-6}$ m) peenfiltrit. Gaasivõrgust või teistest gaasi kasutajatest (nende olemasolul) põhjustatud gaasirõhu muutuste vähendamiseks on paigaldatud eelrõhuregulaator, mis tagab gaasivarustuse parema töökindluse [24].



Joonis 2.2 INNIO Jenbacher gaasirong [24]

2.3 Suitsugaaside soojusvaheti

Suitsugaaside soojusvaheti (ingl k *Exhaust Gas Heat Exchanger, EGHE*) võimaldab maksimaalselt ära kasutada gaasimootori kasulikku soojust. Süsteemi tagastatava soojuse võimsus sõltub väljuvate suitsugaaside temperatuurist. Utiliseeritav heitsoojus tõstab kolmiktootmise mooduli kogukasutegurit [24].



Joonis 2.3 INNIO Jenbacher suitsugaaside soojusvaheti [24]

2.4 Summuti

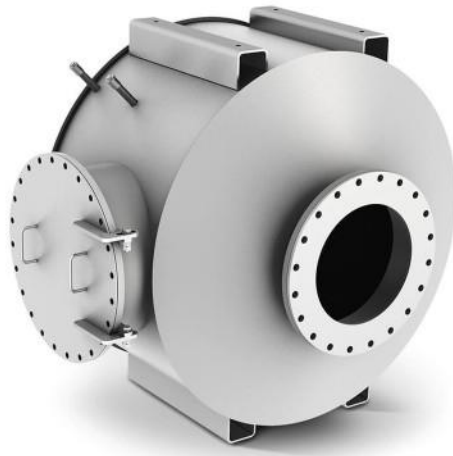
Summuti on kas horisontaalselt või vertikaalselt paigaldatud seade, mis võimaldab gaasimootori toimimisest tingitud müra leevendada. Summuti ülesandeks on väljuvate suitsugaaside müra vähendada, et selle näitaja vastaks konkreetse asukoha piirnormidele. Helirõhutasemed on alates 35 dB (A) 10 m kaugusel kuni 75 dB (A) 10 m kaugusel [24].



Joonis 2.4 INNIO Jenbacher summuti [24]

2.5 Oksüdatsioonikatalüsaator

Oksüdatsioonikatalüsaator on eraldi kambris asuv seade, mis aitab süsinikmonoksiidi (CO), formadehüüdi (HCHO) ja mittemetaansete süsivesinike heitkoguste vähendamiseks. Seadmes toimub eralduvate keemiliste ühendite oksüdeerimine. Tänu sellele tagatakse minimaalne võimalik õhusaaste ning saavutatakse lubatud heitkoguste piirnorme. Oksüdatsioonikatalüsaatorid on vajalikud nii maagaasil kui ka biogaasil töötavatele mootoritele [24, 25].



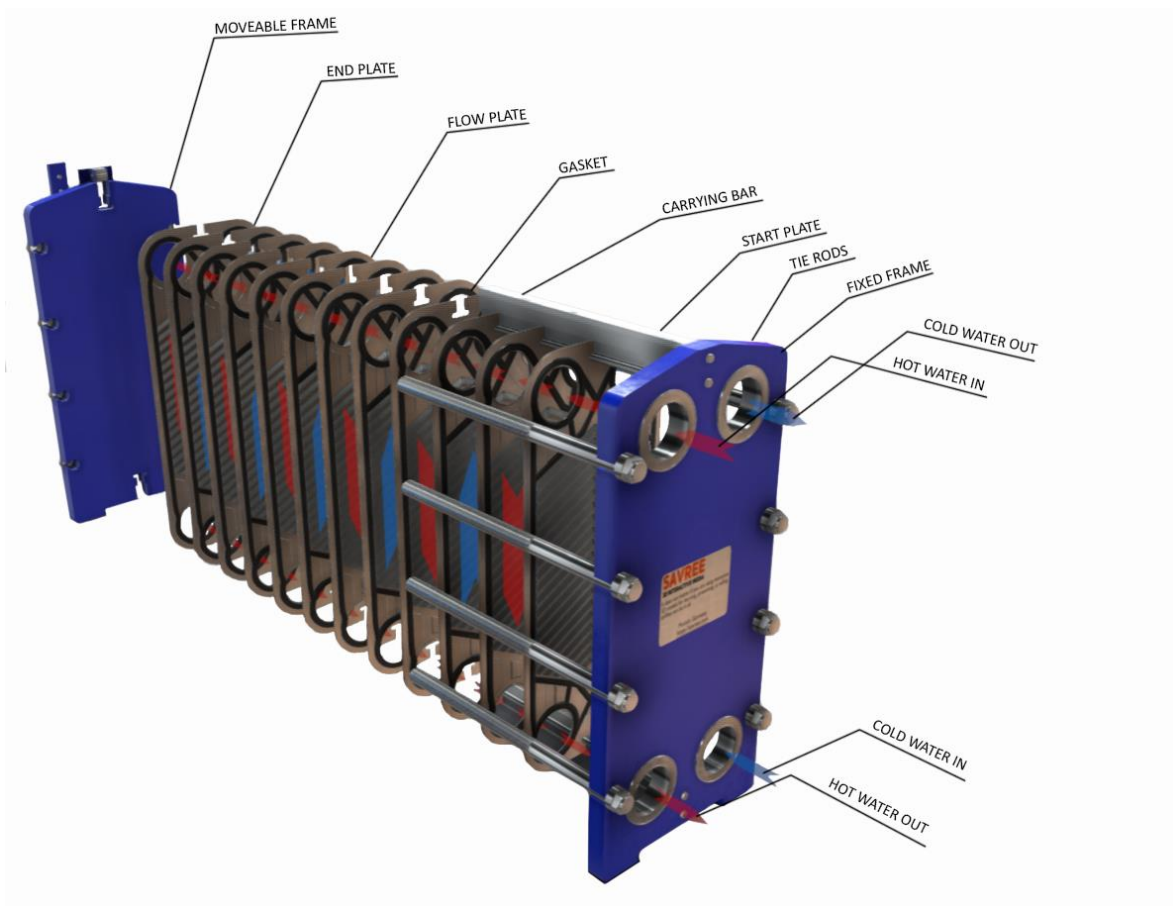
Joonis 2.5 INNIO Jenbacher oksüdatsioonikatalüsaator [24]

2.6 Plaatsoojusvaheti

Plaatsoojusvaheti on seade, mille abil soojusenergia kantakse üle kõrgema temperatuuriga keskkonnast madalama temperatuuriga keskkonda (soojuse jaotus). Vaadeldud kolmiktootmise süsteemis kasutatakse soojusvahetit selleks, et eraldada kontuuris kahte töövedelikku, milleks on vesi ja madala külmumistemperatuuriga glükool. Plaatsoojusvaheti tihendid ja plaadid on mõeldud selleks, et vesi ja glükool ei seganeks omavahel. Sõltuvalt vajadustest võib soojuskandjaks olla nii vesi kui ka glükool. Sobiv soojusvaheti mudel valitakse vastavalt olemasolevate töövedelike peale- ja tagasivoolu temperatuuridele ja vooluhulgale [26, 27, 28].



Joonis 2.6 Alfa Laval plaatsoojusvaheti [29]



Joonis 2.7 Plaatsoojusvaheti ja selle osad [28]

2.7 Jahutussüsteem

Jahutussüsteem tagab gaasimootori töökindlustuse ja süsteemi õige temperatuuri [24].

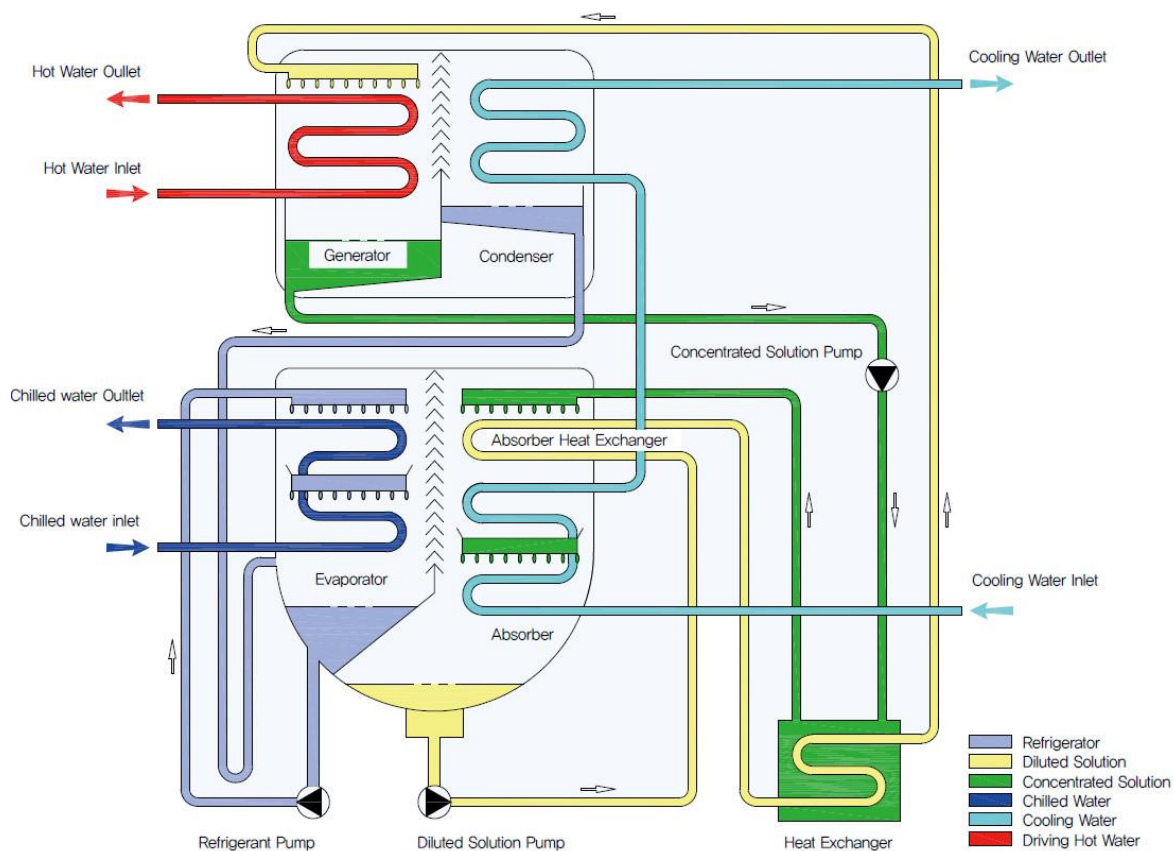


Joonis 2.8 INNIO Jenbacher kuivjahuti [24]

Jahutussüsteemi moodustavad säästlikud kuivajahutid (ingl k *Dry Cooler*) [21]. Kuivajahuti koosneb soojusvahetist ja ventilaatoritest ning selle piisavalt suur pindala tõstab kolmiktoormise süsteemi efektiivsust. Selle ülesandeks on jahutada gaasimootori toimimisel tekkinud heitsoojust, et seda saaks edaspidi kasulikult ära kasutada [24].

2.8 Absorptsioonijahuti

Absorptsioonijahuti on jahutusseade, mis muundab soojusenergiat jahutusenergiaks. See võimaldab rakendada absorptsioonijahutit nendes tööstusettevõtetes, kus protsessis tekkivat heitsoojust saab edaspidi kasutada kas vee või õhu jahutamiseks. Selle poolest erinevad absorptsioonijahutid teistest laialt levinud jahutusseadmetest, mis tarbivad samaks eesmärgiks elektrit. Tihtipeale kasutatakse absorptsioonijahuti jahutusagensina vesi-liitiumbromiidi lahust, kuid sellena võib olla ka vesi-ammoniaagi lahus. Vesi-liitiumbromiidi lahus (LiBr kontsentratsioon segus on umbes 60 - 65%) pole nii ohtlik ega toksiline kui teised võimalikud külmutusagensid, aga see lahus pole efektiivne, kui tegemist on miinustemperatuuridega [30, 31]. Joonisel 2.9 on näidatud absorptsioonijahuti töösükli skeem.



Joonis 2.9 Absorptsioonijahuti tööpõhimõtteline skeem [32]

Tüüpilise üheastmelise absorptsioonijahuti COP on 0,7, mitmeastmelise puhul on see näitaja tavaliselt 1,2, mis teeb seda tõhusamaks variandiks. Vaatamata sellele, et absorptsioonijahuti hind on üsna kõrge, see aitab ettevõttel energiaressurse säästa ja loodust hoida, järelkult on see edukas investeering tööstusettevõtte tulevikku. Samuti selle hoolduskulud on madalad, sest seade koosneb ainult liikumatu osadest, lisaks tagab liikuvate osade puudus absorptsioonijahuti kõrgema vastupidavuse ja pikema eluiga [31].



Joonis 2.10 GMS Interneer absorptsioonijahuti [33]

3. KOLMIKTOOTMISE SÜSTEEMI ANALÜÜS

Käesoleva bakalaureusetöö kolmanda peatüki põhiliseks eesmärgiks on analüüsida võimalikku kolmiktootmise süsteemi mitme olukorra raames.

Alapeatükis 3.1 antakse ülevaade kolmiktootmise süsteemi põhilistest tehnilistest ja majanduslikest andmetest. Nende andmete põhjal on tehtud tasuvusarvutused mitme olukorra jaoks. Tasuvusaja välja arvutamine ja selle analüüsimine on vajalikud tööstusettevõttele enne investeringu tegemist.

Alapeatükis 3.2 on toodud tasuvusarvutused potentsiaalse kolmiktootmise süsteemi jaoks, selles selgitatakse välja, kui pikk on tasuvusaeg Eesti mitmes piirkonnas. Tasuvusaeg arvutatakse välja sellise olukorra raames, kui alternatiivis peab käsitletud tööstusettevõtte elektrienergiat elektribörsilt ning soojusenergiat kaugküttevõrgust ostma.

Alapeatükis 3.3 on tehtud tasuvusarvutused potentsiaalse kolmiktootmise süsteemi jaoks, selles selgitatakse välja, kui pikk oleks tasuvusaeg kolme viimase aasta (2020. – 2022. aasta) jooksul. Hindamiseks oli valitud see ajavahemik nii aktuaalsuse kui ka üsna suure hinnavaheemiku tõttu. Tasuvusaeg arvutatakse välja sellise olukorra raames, kui alternatiivis peab käsitletud tööstusettevõtte elektrienergiat elektribörsilt ostma ning soojusenergiat iseseisvalt maagaasil töötavas katlamajas tootma.

Alapeatükis 3.4 on tegemist eeldatava tasuvuaja arvutamisega 2023. aastaks. Prognoosis on arvestatud 2020. – 2022. aastate keskmised elektrienergia ja maagaasi hinnad ning samuti käesoleva aasta kolme esimese kuu andmed.

Alapeatükis 3.5 esitatakse järeldusi, milleni jõuti eelnevate tulemuste analüüsimisel.

3.1 Lähteandmed

Kõik arvutused ja kogu analüüs on üldistitud ning ei põhine mõnest konkreetsest ettevõttest saadud andmetel. Konkreetse ettevõtte puhul tuleb ka spetsiifilisemaid vajadusi ja parameetreid arvestada põhjalikumalt tehnilis-majandusliku analüüsi raames. Tööstusettevõttel on võimalik integreerida kaasaegset ja efektiivset kolmiktootmise tehnoloogiat olemasolevasse süsteemi. Enne seda on vaja täpne tehnilis-majanduslik analüüs läbi viia. Selleks tuleb kõigepealt objektiga põhjalikult tutvuda ja kõike vajalikke andmeid koguda. Seda tehakse paljude aspektide hõlmava energiaauditi raames ning täpsem tasuvusaeg on võimalik eelprojekti etapil arvutada.

Lihttasavusarvutuste tegemiseks piisab avalikest allikatest saadud andmetest, nagu elektrienergia hind (elektribörs Nord Pool), maagaasi hind (elektri ja gaasi ühendusüsteemi haldur Elering AS) ja erinevate Eesti piirkondade soojusenergia hind (Konkurentsiamet). Jenbacher'i gaasimootori tehnilised andmed, sh energia sisend, soojus- ja elektrienergia võimsus, kogukasutegur ja maagaasi mahtkulu on saadud Filter Solutions OÜ ettevõttes läbi viidud intervjuu käigus [34].

3.1.1 Tehnilised andmed

Käsitletud tööstusettevõtte peamised energiatarbijad on tootmishooned, kontoriruumid ja tehnoloogilised protsessid. Elektrienergiat tarbib tööstusettevõtte pidevalt. Soojusenergia vajadus on kõrge kütteperioodil, mis kestab seitse kuud (oktoober - aprill). Soojusenergiat tarbivad tootmishooned ja kontoriruumid. Kütteperioodi välisel perioodil ehk mai - septembri jooksul (v.a. üks kuu, mis on mõeldud vajalike hooldustööde teostamiseks) on soojusenergiat samuti vaja tarbevee soojendamiseks. Suuremat osa tekkinud soojusenergiat soovitakse aga jahutusenergiana absorptsioonijahuti abil kasutada. Jahutusenergia on vajalik nii tehnoloogilistes protsessides kui ka tootmishoonete ja kontoriruumide õhu konditsioneerimiseks.

Tasuvusarvutused on tehtud eeldusel, et kolmiktootmise süsteem töötab aastaringelt, v.a. ühe kuu jooksul. Töötundide arv on vastavalt sellele 8040. Elektri- ja soojusenergia tootmine ei muutu aasta jooksul eeldusel, et gaasimootor töötab 100% koormusel. Vastavalt valemile (3.1) on arvutatud maagaasi kogus, mis 8040 töötundide jooksul läheb süsteemi efektiivseks toimimiseks vaja [34].

$$\theta_{gaas} \cdot t_{aastas} \cdot Q_{alumine} = P_{aastas} \quad (3.1)$$

kus θ_{gaas} – maagaasi mahtkulu, m³/h,

t_{aastas} – süsteemi töötundide arv aastas, h,

$Q_{alumine}$ – maagaasi alumine kütteväärtus, kWh/m³,

P_{aastas} – maagaasi tarbimine aastas, kWh.

Elering AS-i poolt esitatud 2023. aasta aprilli maagaasi kvaliteedi tunnistuse andmete järgi on selle alumine kütteväärtus $Q_{alumine} = 9,553 \text{ kWh/m}^3$. See väärtus näitab ühe mahuühiku maagaasi täielikul põlemisel saadud soojushulka, millesse pole arvestatud veeauru kondenseerumisest tekkivat soojust [35, 36].

Gaasimootori peamised tehnilised parameetrid on toodud allpool.

Tabel 3.1 INNIO Jenbacher J616 gaasimootori tehnilised parameetrid [24, 34]

Tehnilised andmed	Väärtus	Ühik
Energia sisend	5965	kW
Elektriline võimsus	2682	kW
Soojuslik võimsus	2890	kW
Maagaasi mahtkulu	628	m ³ /h
Kogukasutegur	93,4	%
Töötunnid	8040	h/aastas
Aastane maagaasi tarbimine	47966640	kWh/aastas
Aastane elektri tootmine	21563280	kWh/aastas
Aastane soojuse tootmine	23235600	kWh/aastas

3.1.2 Majanduslikud andmed

Majandusliku analüüsi eesmärgiks on tehtava investeeringu tasuvusaja arvutamine. Tööstusettevõtte kasumi teenimine on võimalik vaid siis, kui tulud ületavad kulusid. Tasuvusaeg on tööstusettevõtte saadud kasumiga pöördvõrdeline ehk mida suurem kasum, seda lühem tasuvusaeg. Tasuvusaja suurimaks eeliseks majanduslikus analüüsis on see, et seda saab kergesti arvutada erisuguste projektide puhul, kuid on vaja silmas pidada, et see ei arvesta inflatsiooni ega muutuvate kuludega [37].

$$A = \frac{I}{K}, \quad (3.2)$$

kus A – tasuvusaeg, aasta,

I – investeeringu maksumus, €,

K – kasum, €.

Investeeringu maksumus hõlmab endasse kõigepealt jahutus-, soojus- ja elektrienergia saamise plokkides sisalduvaid seadmeid, torustikke ja vajalikku toruarmatuuri. Peale selle hinnas sisuldavad ka transport, varuosad, automaatika- ja mõõteseadmed, elektritööd, eeluuringud ning süsteemi testimine ja käivitamine [34].

Seadmed moodustavad investeeringu suuremat osa. Investeering sisaldab ka projekteerimist ja projektijuhtimist. Investeering ei kata ehitustööde ega ehitusjuhtimisega seotud kulusid. Investeeringu maksumuseks on 2 300 000 eurot (ei sisalda käibemaksu) [34].

Hoolduskulud hõlmavad endasse hooldustöid, mootoriõli, glükooli ja igasuguseid kulumaterjale. Nendeks on arvestatud 120 000 eurot aastas (ei sisalda käibemaksu) [34].

Maagaasi hind pärineb elektri ja gaasi ühendussüsteemi haldurilt Elering AS [38]. Hind kõikus suurem määral viimase kolme aasta jooksul, mida mõjutab keeruline poliitiline ja majanduslik olukord. Allpool olevas tabelis on esitatud möödunud kolme aasta keskmised hinnad Eesti tarbijatele (ei sisalda käibemaksu) [39].

Tabel 3.2 Maagaasi keskmine hind 2020. – 2022. aastatel Eesti turul [39]

Aasta	Maagaasi hind, €/kWh
2020	0,0108
2021	0,0398
2022	0,1302

Käesoleva aasta keskmist hinda pole veel teada, kuid saab vaadelda möödunud kolme kuu (alates jaanuarist kuni märtsini) hindu. Need on esitatud allpool olevas tabelis [39].

Tabel 3.3 Maagaasi keskmine hind 2023. aasta jaanuar-märts perioodil Eesti turul [39]

Kuu	Maagaasi hind, €/kWh
jaanuar	0,0680
veebruar	0,0585
märts	0,0489

Elektrienergia börsihind kujuneb elektrienergia tootjatele avatud platvormil. Eesti tarbijad ostavad elektrit läbi Balti riikides tegutsevat elektribörsi Nord Pool [40].

Kolm viimast aastat olid ebastandardised Eesti turu jaoks, nt 2022. aasta keskmine hind oli kõige kõrgem võrreldes 2011. - 2021. aastate andmetega. Allpool olevas tabelis on esitatud 2020. - 2022. aastate elektrienergia hinnad (ei sisalda käibemaksu) [41].

Tabel 3.4 Elektrienergia keskmine hind 2020. - 2022. aastatel Eesti turul [41]

Aasta	Elektrienergia hind, €/kWh
2020	0,0337
2021	0,0867
2022	0,1928

Käesoleva aasta keskmist hinda pole veel teada, kuid saab vaadelda möödunud kolme kuu (jaanuarist märtsini) hindu. Need on esitatud allolevas tabelis [41].

Tabel 3.5 Elektrienergia keskmine hind 2023. aasta jaanuar - märts perioodil Eesti turul [41]

Kuu	Elektrienergia hind, €/kWh
jaanuar	0,0990
veebruar	0,1131
märts	0,0872

3.2 Tasuvusarvutused Eesti erinevate piirkondade jaoks

Tasuvusarvutused erinevate piirkondade näitel on tehtud eeldusel, et käsitletud tööstusettevõtte ostab soojusenergiat mõne piirkonna kaugküttevõrgust, sellel juhul soojuse hind varieerub sõltuvalt ettevõtte asukohast. Konkurentsiamet kooskõlastab soojusenergia piirhinnad, mis kehtivad lõpptarbijatele, sh erinevatele tööstusettevõtetele, mis on kaugküttevõrguga ühendatud [42].

Kaugküttevõtteid on Eestis kokku üle 60, need tegutsevad paljudes piirkondades, peamiselt Harjumaal, Tartumaal ja Ida-Virumaal [2, 42].

Edaspidi arvutatakse ja analüüsitakse tasuvusaega kolme piirkonna näitel, nendeks oli valitud kõige kõrgema soojuse hinnaga võrgupiirkond Väandra, kõige madalama hinnaga võrgupiirkond Narva ning Tallinna võrgupiirkond, milles kehtiv piirhind on keskpärane. Tabelis 3.6 esitatud andmed on 1. aprilli 2023. aasta seisuga ehk kajastavad

2023. aasta märtsi olukorda, hinnad ei sisalda käibemaksu [42]. Elektrienergia hind on samuti 2023. aasta märtsi seisuga [41].

Tabel 3.6 Eesti piirkondades kehtivad soojuse hinnad ja vastavas kaugküttevõrgus soojusenergia tootmiseks kasutatav kütus 2023. aasta aprilli seisuga [2, 42, 43]

Võrgupiirkond	Kaugkütet pakkuv ettevõtte	Kasutatav kütus	Soojuse hind, €/kWh
Narva	Narva Soojusvõrk AS	põlevkivi	0,0398
Tallinn	Utilitas Tallinn AS	biomass, segaolmejäätmed	0,0972
Vändra	Adven Eesti AS	maagaas, põlevkiviõli	0,2013

3.2.1 Tasuvusarvutused Narva võrgupiirkonna näitel

Eestis tegutseb 12 soojusettevõtet, mis toodavad heitsoojust kaugküttevõrgu jaoks koostootmise tulemusena. Nende hulgas on ka Eesti Energia AS-i Balti elektrijaam, millest saab soojuse kaugküttepakkuja Narva Soojus AS [44]. Narva võrgupiirkonnas kehtiv lõpptarbijatele hind on kõige madalam Eestis, mis on tingitud põlevkivi odavusest [42].

Tabelis 3.7 on näidatud oluliseimad majanduslikud parameetrid, mille alusel on tasuvusaeg välja arvatud. Nende andmete põhjal tasub kolmiktootmise süsteemi alginvesteering Narva võrgupiirkonnas asuva tööstusettevõtte puhul ennast ära 6,77 aastat (ehk umbes 6 aastat ja 9 kuud) pärast.

Tabel 3.7 Narva piirkonnas asuva kolmiktootmise süsteemi tasuvusaja arvutused [34, 41, 42]

Majanduslikud parameetrid	Väärtus	Ühik
Maagaasi hind	0,0489	€/kWh
Maagaasi hind aastas	2345568,70	€/aastas
Hoolduskulud	120000	€/aastas
Kulud kokku	2465568,70	€/aastas
Elektrienergia hind	0,0872	€/kWh
Soojusenergia hind	0,0398	€/kWh
Elektrienergia hind aastas	1880318,02	€/aastas
Soojusenergia hind aastas	924776,88	€/aastas
Tulud kokku	2805094,90	€/aastas
Kasum	339526,20	€/aastas
Investeeringu maksumus	2300000	€
Tasuvusaeg	6,77	aasta

3.2.2 Tasuvusarvutused Tallinna võrgupiirkonna näitel

Analoogselt Narva piirkonnale saab ka Tallinna võrgupiirkond koostootmisel toodetud soojuse. Kaugkütet pakkuv ettevõtte Utilitas Tallinn AS toodab soojust Utilitas Tallinna SEJ-s ja Mustamäe KTJ-s ning ostab Iru Elektriijaama jäätmeplokist. Põhikütusena kasutatakse eestimaiset hakkepuitu ehk puidu- ja metsatööstuse jääke [44].

Tabelis 3.8 on näidatud oluliseimad majanduslikud parameetrid, mille alusel on tasuvusaeg välja arvatud. Nende andmete põhjal tasub kolmiktootmise süsteemi alginvesteering Tallinna võrgupiirkonnas asuva tööstusettevõtte puhul ennast ära 1,37 aastat (ehk umbes 1 aasta ja 4 kuud) pärast.

Tabel 3.8 Tallinna piirkonnas asuva kolmiktootmise süsteemi tasuvusaja arvutused [34, 41, 42]

Majanduslikud parameetrid	Väärtus	Ühik
Maagaasi hind	0,0489	€/kWh
Maagaasi hind aastas	2345568,70	€/aastas
Hoolduskulud	120000	€/aastas
Kulud kokku	2465568,70	€/aastas
Elektrienergia hind	0,0872	€/kWh
Soojusenergia hind	0,0972	€/kWh
Elektrienergia hind aastas	1880318,02	€/aastas
Soojusenergia hind aastas	2258500,32	€/aastas
Tulud kokku	4138818,34	€/aastas
Kasum	1673249,64	€/aastas
Investeeringu maksumus	2300000	€
Tasuvusaeg	1,37	aasta

3.2.3 Tasuvusarvutused Vändra võrgupiirkonna näitel

Kaugkütet pakkuv ettevõtte Adven Eesti AS varustab soojusega 14 Eesti võrgupiirkonda. Lõpptarbijatele kehtivad hinnad jäävad vahemikku 105,47 - 201,30 €/MWh. Kõige kallim soojus on Vändra võrgupiirkonnas [42].

Adven Eesti AS-i katlamajades saab mugavalt ja paindlikult kasutada sobivat kütust sõltuvalt selle hinnast ja kättesaadavusest [45]. Kütusena kasutati 2022. aasta andmete järgi vastavas piirkonnas maagaasi (73%) ja põlevkiviõli (27%) [43]. Mõlema fossiilse kütuse hinnad ei erinenud enne 2021. aasta sügist üksteisest üsna kaua aega [46]. Maagaasi hind oli 2022. aasta oodatud kallim [39] ning vaatamata sellele, et kohaliku põlevkiviõli hind on tõusnud ka, siis ikka on maksnud see umbes 2 korda vähem [46].

Tabelis 3.9 on näidatud oluliseimad majanduslikud parameetrid, mille alusel on tasuvusaeg välja arvatud. Nende andmete põhjal tasub kolmiktootmise süsteemi alginvesteering Vädra võrgupiirkonnas asuva tööstusettevõtte puhul ennast ära 0,56 aastat (ehk umbes 7 kuud) pärast.

Tabel 3.9 Vädra piirkonnas asuva kolmiktootmise süsteemi tasuvusaja arvutused [34, 41, 42]

Majanduslikud parameetrid	Väärtus	Ühik
Maagaasi hind	0,0489	€/kWh
Maagaasi hind aastas	2345568,70	€/aastas
Hoolduskulud	120000	€/aastas
Kulud kokku	2465568,70	€/aastas
Elektrienergia hind	0,0872	€/kWh
Soojusenergia hind	0,2013	€/kWh
Elektrienergia hind aastas	1880318,02	€/aastas
Soojusenergia hind aastas	4677326,28	€/aastas
Tulud kokku	6557644,30	€/aastas
Kasum	4092075,60	€/aastas
Investeeringu maksumus	2300000	€
Tasuvusaeg	0,56	aasta

3.3 Tasuvusarvutused 2020. – 2022. aastate andmete põhjal

Tasuvusarvutused on tehtud eeldusel, et käsitletud tööstusettevõtte toodab soojusenergiat iseseisvalt katlamajas. Tööstusettevõtte küttesüsteem baseerub maagaasil ning energiaallikana kasutatava gaasikatla kasutegur on 95%, mis on kõrgeim võimalik kasutegur tavalises olukorras [47]. Siinkohal mängib olulist rolli ka see, et nii olemasoleva kui ka pakutud kolmiktootmise tehnoloogia puhul on kütus sama ehk edaspidi analüüsidest võrreldakse just tehnoloogiate eripärasid, aga mitte kütuse koostisest ja hinnast tingitud tegureid.

Selleks, et toota 1000 kWh soojusenergiat eeldusel, et gaasikatla kasuteguriks on 95%, tuleb ära põletada 1053 kWh maagaasi. Teades konkreetse ajavahemiku maagaasi keskmist hinda, on võimalik välja arvutada toodetud soojusenergia omahinda. Sellele lisanduvad veel hooldus- ja teeninduskulud, mis moodustavad 10% soojuse hinnast.

Tabel 3.10 Tööstusettevõtte katlamajas toodetud soojusenergia omahind (sisaldab hooldus- ja teeninduskulusid) sõltuvalt kehtivast maagaasi hinnast 2020. – 2022. aastatel [39]

Aasta	Maagaasi hind, €/kWh	Soojuse hind, €/kWh
2020	0,0108	0,0125
2021	0,0398	0,0461
2022	0,1302	0,1507

3.3.1 Tasuvusarvutused 2020. aasta andmete põhjal

Alates 2020. aastast Eestis, Lätis ja Soomes kehtestati ühine turupiirkond FINESTLAT. Samal aastal toimus järskult COVID-19 levikust põhjustatud energia tarbimise vähenemine. Seoses sellega on langenud ka maagaasi hind. Hind sai väiksemaks 37% võrra võrreldes 2019. aasta andmetega [48].

Peale pandeemiat mõjutas maagaasi hinnalangust ka oodatud soojem talv Euroopas. Üldiselt hinnalangus oli Euroopas märgatavam, kui USA-s, mille maagaasiturul ei toimunud nii suuri muutusi tänu selle stabiilsusele [48].

Tabelis 3.11 on näidatud oluliseimad majanduslikud parameetrid, mille alusel on tasuvusaeg välja arvatud. Nende andmete põhjal tasuks kolmiktootmise süsteemi alginvesteering 2020. aastal kehtivate maagaasi ja elektrienergia hindade puhul ennast ära 6,07 aastat (ehk umbes 6 aastat ja 1 kuu) pärast.

Tabel 3.11 Kolmiktootmise süsteemi tasuvusaja arvutused 2020. a andmete näitel [34, 39, 41]

Majanduslikud parameetrid	Väärtus	Ühik
Maagaasi hind	0,0108	€/kWh
Maagaasi hind aastas	518039,71	€/aastas
Hoolduskulud	120000	€/aastas
Kulud kokku	638039,71	€/aastas
Elektrienergia hind	0,0337	€/kWh
Soojusenergia hind	0,0125	€/kWh
Elektrienergia hind aastas	726682,54	€/aastas
Soojusenergia hind aastas	290445,00	€/aastas
Tulud kokku	1017127,54	€/aastas
Kasum	379087,82	€/aastas
Investeeringu maksumus	2300000	€
Tasuvusaeg	6,07	aasta

3.3.2 Tasuvusarvutused 2021. aasta andmete põhjal

2021. aasta maagaasi keskmine hind oli erakordselt kõrge võrreldes eelmiste aastatega. Kui 2020. aastal hakkas hind Euroopa ja Balti turgudel enam-vähem ühtlustama, siis 2021. aastal suurenesid erinevused nõudluse ja pakkumise vahel [48].

Maagaasi hinnatõusu mõjutas palju erinevaid tegureid. Peamiseks probleemiks oli ebapiisav maagaasi kogus Euroopa hoidlates. Nende tase oli madalam kui eelnevatel aastatel. Lisaks mõjutasid negatiivselt maagaasiga efektiivset varustatust tehnilised piirangud. Pandeemia ajal mitte teostatud ja edasi lükatud hooldustööd tekitasid katkestusi 2021. aastal [48].

Taastuvad energiaallikad ei saanud ka häid tulemusi sellel perioodil näidata. Kui võrrelda taastuvatest energiaallikatest saadud toodangu 2019. aastaga, siis päikeseenergia toodang jäi samaks. Nii tuule- kui ka tuumaenergia osakaal langes ebasoodsate ilmastikutingimuste tõttu. Euroopa reservuaaride madal tase määras hüdroenergia väiksema toodangu [48].

Tabelis 3.12 on näidatud oluliseimad majanduslikud parameetrid, mille alusel on tasuvusaeg välja arvatud. Nende andmete põhjal tasuks kolmiktootmise süsteemi alginvesteering 2020. aastal kehtivate maagaasi ja elektrienergia hindade puhul ennast ära 2,52 aastat (ehk umbes 2 aastat ja 6 kuud) pärast.

Tabel 3.12 Kolmiktootmise süsteemi tasuvusaja arvutused 2021. a andmete näitel [34, 39, 41]

Majanduslikud parameetrid	Väärtus	Ühik
Maagaasi hind	0,0398	€/kWh
Aastane maagaasi tarbimine	47966640	kWh/aastas
Maagaasi hind aastas	1909072,27	€/aastas
Hoolduskulud	120000	€/aastas
Kulud kokku	2029072,27	€/aastas
Elektrienergia hind	0,0867	€/kWh
Soojusenergia hind	0,0461	€/kWh
Elektrienergia hind aastas	1869536,38	€/aastas
Soojusenergia hind aastas	1071161,16	€/aastas
Tulud kokku	2940697,54	€/aastas
Kasum	911625,26	€/aastas
Investeeringu maksumus	2300000	€
Tasuvusaeg	2,52	aasta

3.3.3 Tasuvusarvutused 2022. aasta andmete põhjal

Möödunud 2022. aasta maagaasi keskmine hind oli enam kui 3 korda 2021. aasta hinnast kõrgem [46]. Seda mõjutasid samad tegurid, mis mõjutasid maagaasi hinnatõusu 2021. aastal. Negatiivset mõju avaldas ka valitsev keeruline poliitiline olukord. Euroopa Liidu sanktsioonipakett Venemaa suhtes mõjutas maagaasi impordi vähendamist Euroopa riikidesse. Samal ajal tõusis oluliselt Ameerika Ühendriikidest imporditud veeldatud maagaasi (ingl k *Liquefied Natural Gas, LNG*) kogus. Sealt sai Euroopa rohkem kui 50 miljardit kuupmeetrit veeldatud maagaasi [49].

Samal aastal oli valmis ehitatud Balti riikide ja Poola gaasiühendus GIPL (ingl k *Gas Interconnection Poland–Lithuania*), mille ülesandeks on ühendada Eesti gaasisüsteemi ja Kesk-Euroopa gaasimagistraale omavahel. Eesti jätkab aktiivselt Läti, Leedu ja Soomega koostöö arendamisega tegeleda [50].

Tabelis 3.13 on näidatud oluliseimad majanduslikud parameetrid, mille alusel on tasuvusaeg välja arvatud. Nende andmete põhjal tasuks kolmiktootmise süsteemi alginvesteering 2020. aastal kehtivate maagaasi ja elektrienergia hindade puhul ennast ära 1,78 aastat (ehk umbes 1 aastat ja 9 kuud) pärast.

Tabel 3.13 Kolmiktootmise süsteemi tasuvusaja arvutused 2022. a andmete näitel [34, 39, 41]

Majanduslikud parameetrid	Väärtus	Ühik
Maagaasi hind	0,1302	€/kWh
Maagaasi hind aastas	6245256,53	€/aastas
Hoolduskulud	120000	€/aastas
Kulud kokku	6365256,53	€/aastas
Elektrienergia hind	0,1928	€/kWh
Soojusenergia hind	0,1507	€/kWh
Elektrienergia hind aastas	4157400,38	€/aastas
Soojusenergia hind aastas	3501604,92	€/aastas
Tulud kokku	7659005,30	€/aastas
Kasum	1293748,78	€/aastas
Investeeringu maksumus	2300000	€
Tasuvusaeg	1,78	aasta

3.4 Tasuvusarvutused 2023. aastaks

Tasuvusarvutused on tehtud käesoleva aasta jaoks eeldusel, et käsitletud tööstusettevõtte toodab soojusenergiat iseseisvalt maagaasil töötavas katlamajas.

Tasuvusaega hinnates oli ajavahemik jagatud kolmeks kategooriaks: eriti soodne (tabelis 3.15 on rohelise värviga ära märgitud), soodne (tabelis 3.15 on kollase värviga ära märgitud) ja ebasoodne (tabelis 3.15 on punase värviga ära märgitud) tasuvusaeg tööstusettevõtte jaoks.

Eriti soodsa majandusliku olukorra puhul tasub kolmiktootmise süsteem ennast maksimaalselt kolme aasta jooksul. Sellel juhul on tööstusettevõttel mõistlik kolmiktootmise süsteemi rajamisega tegeleda.

Soodsaks nimetatakse siin tasuvusaega, mis ei ületa viis aastat. See ajavahemik on optimaalne, kuid tuleb silmas pidada majandusliku olukorra muutmise võimalust.

Ebasoodne tasuvusaeg ületab omakorda viis aastat. Kui tasuvusaeg on pikk, siis ikka on võimalik alginvesteeringu ära teha, kuid tuleb täpsem analüüs läbi viia. Kui tehtava alginvesteeringu puhul on tööstusettevõtte kulud ületavad tulusid, siis on tegemist majandusliku kahjumiga ning tasuvusaeg on sellel juhul negatiivne. Sellise majandusliku olukorra puhul pole mõistlik kolmiktootmise süsteemi rajada.

Tabelis 3.15 on näidatud arvutatud tasuvusajad erinevate elektrienergia ja maagaasi hindade puhul. Prognoosi tegemisel on arvestatud 2020. – 2022. aastate keskmised hinnad (tabel 3.4 ja tabel 3.10) ning 2023. aasta jaanuari – märtsi keskmised hinnad (tabel 3.5 ja tabel 3.14). Maagaasi hinnavahe on 0,0108 – 0,1302 €/kWh, elektrienergia hinnavahe on 0,0337 – 0,1928 €/kWh.

Tabel 3.14 Tööstusettevõtte katlamajas toodetud soojusenergia omahind (sisaldab hooldus- ja teeninduskulusid) sõltuvalt keskmisest maagaasi hinnast 2023. a jaanuar - märts perioodil [39]

Kuu	Maagaasi hind, €/kWh	Soojuse hind, €/kWh
jaanuar	0,0680	0,0788
veebruar	0,0585	0,0678
märts	0,0489	0,0566

Tabel 3.15 Tasuvusaja arvutused erinevate elektrienergia ja maagaasi hindade puhul [39, 41]

		Elektrienergia hind, €/kWh												
		0,0337	0,0407	0,0507	0,0707	0,0807	0,0867	0,0872	0,0931	0,099	0,106	0,1131	0,153	0,1928
Maagaasi hind, €/kWh	0,0108	6,064	4,338	3,084	1,954	1,651	1,511	1,500	1,385	1,287	1,187	1,100	0,779	0,604
	0,0158	8,393	5,412	3,590	2,146	1,786	1,623	1,611	1,479	1,367	1,255	1,158	0,808	0,621
	0,0208	13,627	7,194	4,296	2,380	1,945	1,754	1,739	1,587	1,459	1,331	1,220	0,839	0,639
	0,0258	36,210	10,725	5,348	2,670	2,136	1,907	1,890	1,711	1,563	1,418	1,295	0,873	0,659
	0,0308	-55,096	21,063	7,081	3,042	2,367	2,089	2,069	1,856	1,683	1,516	1,377	0,909	0,677
	0,0358	-15,645	584,697	10,475	3,534	2,654	2,310	2,285	2,028	1,824	1,629	1,470	0,948	0,700
	0,0408	-9,117	-22,698	20,122	4,216	3,022	2,583	2,552	2,236	1,990	1,760	1,576	0,991	0,724
	0,0489	-5,440	-8,460	-40,906	6,133	3,894	3,194	3,147	2,680	2,334	2,024	1,784	1,070	0,765
	0,0555	-4,094	-5,599	-11,784	9,742	5,092	3,958	3,886	3,200	2,718	2,306	1,999	1,144	0,802
	0,0585	-3,681	-4,853	-8,903	13,300	5,919	4,441	4,350	3,506	2,937	2,462	2,116	1,181	0,820
	0,0655	-2,978	3,702	-5,670	89,975	9,536	6,207	6,031	4,522	3,617	2,923	2,447	1,278	0,865
	0,0680	-2,788	-3,413	-5,018	-84,966	12,198	7,234	6,997	5,044	3,944	3,133	2,592	1,316	0,883
	0,0755	-2,340	-2,765	-3,732	-12,435	74,999	14,371	13,464	7,717	5,408	3,992	3,154	1,447	0,940
	0,0805	-2,114	-2,454	-3,188	-7,925	-30,832	41,984	35,080	11,930	7,187	4,884	3,686	1,549	0,982
	0,0855	-1,927	-2,207	-2,782	-5,816	-12,788	-45,561	-57,934	26,279	10,710	6,289	4,433	1,668	1,028
	0,0905	-1,771	-2,004	-2,468	-4,593	-8,067	-14,768	-15,866	-129,640	21,008	8,832	5,562	1,805	1,079
0,0955	-1,638	-1,836	-2,217	-3,795	-5,892	-8,812	-9,192	-18,698	545,270	14,823	7,461	1,968	1,135	
0,1005	-1,524	-1,693	-2,013	-3,234	-4,640	-6,279	-6,470	-10,076	-22,762	46,095	11,330	2,163	1,200	
0,1105	-1,338	-1,466	-1,670	-2,495	-3,257	-3,988	-4,064	-5,242	-7,382	-14,318	-305,350	2,670	1,344	
0,1155	-1,260	-1,374	-1,577	-2,239	-2,834	-3,372	-3,426	-4,228	-5,518	-8,560	-20,391	3,077	1,432	
0,1302	-1,078	-1,160	-1,301	-1,721	-2,052	-2,320	-2,345	-2,695	-3,167	-3,997	-5,447	5,250	1,774	

Tabelist 3.15 on näha, et valitud hinnavaheemiku puhul on ebasoodne tasuvusaeg tõenäolisem kolmiktootmise süsteemi alginvesteeringu suhtes.

3.5 Järeldused

Gaasimootoriga kolmiktootmise süsteem võimaldab tööstusettevõttel oluliselt oma rahalisi ressursse säästa, kuid mitte igas majanduslikus olukorras on iseseisev energia tootmine tegelikult soodne.

Kõigepealt võrreldi Eesti kolmes piirkonnas potentsiaalse kolmiktootmise süsteemi tasuvusaega. Tabelist 3.16 on näha, et 2023. aasta andmeid arvestades on Narva võrgupiirkonnas üsna pikk (peaaegu 7 aastat), mis on tööstusettevõttele üldjuhul ebasoodne. Tallinnas ja Väandras on tasuvusaeg pigem soodne, sest ei ületa 3 aastat. See sõltub soojusenergia hinnast nii, et mida kõrgem see hind, seda lühem tasuvusaeg. Narva piirkonna puhul on kaugküttevõrgust mõistlik soojust osta, mitte iseseisvalt toota. Teiste piirkondade tööstusettevõtted peavad kaaluma kõike võimalikke variante, sest lühikese ajavaheemiku hindadel põhinevad tasuvusarvutused ei pruugi kõige tõenäolisemat tulemust näidata.

Tabel 3.16 Eesti erinevates piirkondades asuva kolmiktootmise süsteemi tasuvusaeg [41, 42]

Võrgupiirkond	Soojuse hind, €/kWh	Elektrienergia hind, €/kWh	Tasuvusaeg, aasta
Narva	0,0398	0,0872	6,77
Tallinn	0,0972	0,0872	1,37
Vändra	0,2013	0,0872	0,56

Samuti võrreldi omavahel kolme viimase aasta kehtivate maagaasi ja elektrienergia hindade puhul arvatud tasuvusaegu. Erakordselt kõrgete hindadega 2022. aastal toimiv kolmiktootmise süsteem tasuks ennast kõige kiiremini, see võtaks vähem kui 2 aastat. Lühikese tasuvusaja tagavad kõrged elektrienergia hinnad võimalikult madalate maagaasi hindade puhul.

Tabelist 3.17 on näha, et elektrienergia ja maagaasi keskmised hinnad kasvavad üksteisest sõltuvalt. See on tingitud sellest, et elektrienergia hinda mõjutab ka gaasituru olukord. Peamiseks järeltuleks on see, et kolmiktootmise süsteemi rajamine ja arendamine on eriti aktuaalsed kallima elektri korral, mille hinda oli keeruline ennustada. See kehtib isegi erakordselt kõrge maagaasi hinna puhul.

Tabel 3.17 2020. – 2022. aasta jaoks arvatud kolmiktootmise süsteemi tasuvusaeg [39, 41]

Aasta	Maagaasi hind, €/kWh	Elektrienergia hind, €/kWh	Tasuvusaeg, aasta
2020	0,0108	0,0337	6,07
2021	0,0398	0,0867	2,52
2022	0,1302	0,1928	1,78

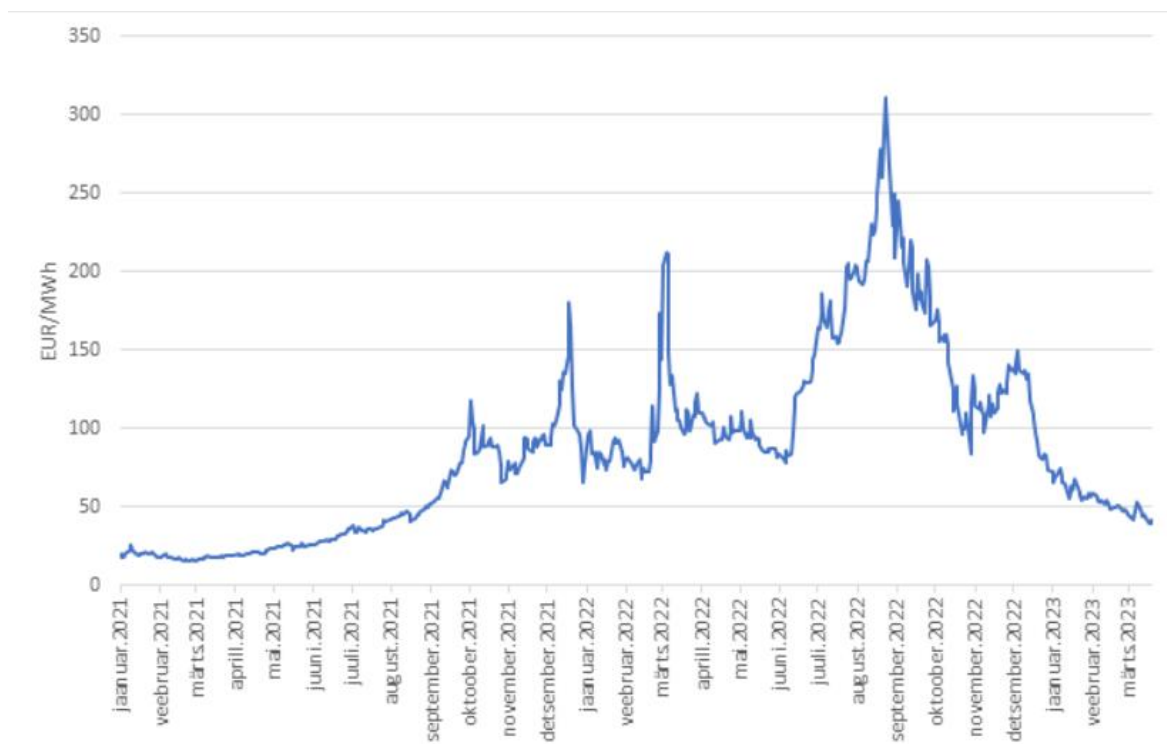
Tabel 3.15 näitab, et valitud maagaasi ja elektrienergia hinnavahele on ebastabiilne tasuvusaeg suurem. Paljude stsenaariumide korral on see hoopis negatiivne, mis kajastab seda, et tööstusettevõtete kulud hakkavad saadud tulusid ületama ning sellele järgneb majanduslik kahjum. Juhul, kui elektrienergia hind ületab 0,153 €/kWh, tasuvusaeg on igati rahuldav sõltumata maagaasi hinnast.

Iga olukorra puhul tuleb silmas pidada, et elektrienergia tootmine ega maagaasiturud pole alati stabiilsed ning tasuvusarvutuste tulemused ei saa olla täpsed. Eelnevalt toodud tasuvusarvutused sõltuvad suurel määral ka alginvesteeringu maksumusest, mis võib ajas oluliselt muutuda.

Üldiselt võib elektrienergia hind ebastabiilne olla, seega isesev tootmine teeb tööstusettevõtet sõltumatuks.

Energia isesev tootmine on eriti kasulik variant siis, kui sõltuvalt valitsevast olukorrast on võimalik ka võrgust elektrienergiat osta. Sellel juhul valib tööstusettevõtte ise, kas see toodab energiat kehtiva maagaasi hinna korral või pigem soodsamalt saab võrgust.

Joonisel 3.1 on näha, kui suurel määral kõikuvad maagaasi hinnad Euroopas. Maagaasi turu ebastabiilsus ja hinna mitmekordse tõusu oht mõjutab gaasimootorite perspektiivi negatiivselt ning ärgitab tööstusettevõtteid teisi tehnoloogiaid valida.



Joonis 3.1 Maagaasi hinna muutmise graafik ajavahemikus 2021. aasta jaanuar – 2023. aasta märts Euroopa turul [39]

IEA (ingl k *International Energy Agency*) prognoosi järgi tõuseb maagaasi nõudlus maailmas, kuid see prognoos oli koostatud 2021. aastal ning sinna pole arvestatud poliitilised asjaolud. Kliimanetraalsuse saavutamisel hakatakse maagaasi kivisöele ja naftale eelistama eriti Aasia ja Vahemere piirkondades. Tööstuslik aktiivsus kiireneb ning seda soodustab samuti maagaasi kasutamine. Igal juhul maagaasi nõudlus langeb oluliselt, sest see on fossiilne kütus, mida asendab taastuvenergia paljudes valdkondades. Prognoosi järgi 2022. – 2024. aastatel maagaasi nõudlust saab nimetada stabiilseks [48].

Euroopa Liidu prognoosi järgi ei sõltu see juba viie aasta jooksul Venemaa maagaasist, sest suudab täielikult taastuvenergiale üle minna. See aitab Euroopa Liidul oma kliimaeesmärkideni kiiremini jõuda, energiajulgeoleku taset tõsta ja liikmeriikide tööstust edasi arendada. Juba praegu eelistavad paljud tööstusettevõtted taastuvaid energiaallikaid. See mõjutab oluliselt gaasimootorite rakendamise perspektiivi [51].

KOKKUVÕTE

Energeetikasektoris toimuvad kiired ja olulised muutused, mis on põhjustatud energia tarbimise suurenemisest ja uute tehnoloogiate arendamisest. Kliimaneutraalsuse saavutamiseks mängib suurt rolli kogu maailmas. Euroopa Liidu riigid tegelevad aktiivselt erinevate tehnoloogiate uurimise, hindamise ja rakendamisega.

Kõikide tehnoloogiate puhul on eriti tähtis tehnilis-majanduslik analüüs. See võimaldab hinnata, kui vajalik ja aktuaalne vaadeldav tehnoloogia mõne võimaliku olukorra raames.

Käesolevas bakalaureusetöös analüüsiti efektiivset jahutus-, soojus- ja elektrienergia tootmise viisi. Kolmiktootmise tehnoloogiat saab kas uutes tööstusettevõtetes rakendada või olemasolevasse süsteemi integreerida, mis võimaldab seda stabiilsemaks ja soodsamaks muuta.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli selgitada erinevaid energia tootmise tehnoloogiaid, anda ülevaade gaasimootoriga kolmiktootmise tehnoloogiast ja selles süsteemis kasutatavatest põhi- ja abiseadmetest, välja arvutada ja analüüsida võimalikku tasuvusaega mitme erineva olukorra jaoks ning välja selgitada, mis on kolmiktootmise süsteemi eelised ja puudused.

Autori hinnangul on püstitatud eesmärk täidetud.

Esimeses peatükis antakse ülevaade soojus- ja elektrienergia tootmise viisidest ja võimalustest. Selles peatükis selgitati eraldi tootmise, koos- ja kolmiktootmise tehnoloogiaid ning nende rakendamise võimalusi. Samuti oli antud ülevaade energia tootmise olukorrast Eestis, kõigepealt 2013. aastal esimesest Eestis ehitatud kolmiktootmisjaamast, mida hiljem demonteeriti.

Teise peatüki eesmärgiks oli anda ülevaade gaasimootoriga kolmiktootmise süsteemis kasutatavatest seadmetest. Teises peatükis selgitati, mis põhimõttel töötavad põhiseadmed gaasimootor ja absorptsioonijahuti ning sellised abiseadmed nagu soojusvaheti, kuivjahuti, gaasirong jt.

Kolmanda peatüki eesmärgiks oli välja selgitada tööstusettevõttes kasutusele võetava kolmiktootmise süsteemi võimalikku tasuvusaega mitme erineva olukorra raames ning

hinnata selle potentsiaali analüüsidest põhiliseid eeliseid ja puudusi võrreldes teiste soojusenergia saamise võimalustega.

Kolmiktootmise süsteemi võrreldi kahe võimaliku alternatiiviga, milleks olid soojusenergia kohalikust kaugküttevõrgust ostmine ja soojusenergia iseseisev tootmine lokaalses maagaasil töötavas katlamajas. Mõlema alternatiivi puhul saadakse elektrienergiat võrgust. Iga alternatiivi raames oli käsitletud kolm erinevat juhtumit, mille analüüs võimaldas saadud järeldusteni jõuda.

Kolmiktootmise süsteemi rakendamine on mõistlik 2022. aastal kehtiva turu olukorra puhul, millal elektrienergia hinnad olid erakordselt kõrged. Tähtsaks järelduseks on ka see, et kolmiktootmise süsteemi investering tasub ennast eriti kiiresti ära kallima soojusega võrgupiirkonnas, milleks 2023. aasta märtsi seisuga oli Vändra piirkond.

Kolmiktootmise süsteemi analüüsi käigus oli arvatud ka võimalik tasuvusaeg 2023. aastaks. Prognoosi tegemisel olid arvestatud 2020. – 2022. aastate ja käesoleva aasta kolme esimese kuu elektrienergia ja maagaasi keskmised hinnad. Analüüsi käigus jõuti järelduseni, et jahutus-, soojus- ja elektrienergia samaaegne tootmine on eriti soodne kõrgete elektrienergia ja madalate maagaasi hindade puhul. Muidu pole see variant eriti tõenäoline, sest elektrienergia hinnad sõltuvad sh maagaasi hinnast.

Kolmiktootmise tehnoloogia ei piiru ainult maagaasimootori rakendamisega, seega käesoleva lõputöö edasi arendamiseks pakub autor välja ka teistel tehnoloogiatel põhinevaid kolmiktootmise süsteeme põhjalikku tehnilis-majanduslikku analüüsi. Tuleb võrrelda teistel kütustel gaasimootorite rakendamise eeliseid ja puudusi ning hinnata nende perspektiivi võrreldes maagaasimootoritega koos- ja kolmiktootmise süsteemidega.

Veel üheks võimalikuks analüüsi objektiks on biomassil toimiv kolmiktootmise süsteem. Biomass on keskkonnasõbralik ja soodne taastuvressurs, mille põletamisel ei kaasne tõsiseid keskkonnaprobleeme. Samuti saab võrrelda eelmainitud tehnoloogiaid omavahel selleks, et välja selgitada, mis variant tasub ennast kõige kiiremini ära. Käesolevas bakalaureusetöös kõik arvutused ja kogu analüüs olid üldistatud, magistritöö tasemel on võimalik aga konkreetse tööstusettevõtte spetsiifiliseid vajadusi ja kindlaks määratud parameetreid vaadelda ning nende põhjal kolmiktootmise süsteemi potentsiaali hinnata.

SUMMARY

The energy sector is undergoing rapid and significant changes caused by the increase in energy consumption and the development of new technologies. Achieving climate neutrality plays a major role worldwide. The European Union is actively involved in the research, evaluation and implementation of various technologies.

Techno-economic analysis is an especially important tool to evaluate all technologies. This enables assessment of the importance and relevance of the observed technology in the framework of some possible situations.

This bachelor's thesis analyses an efficient method of cooling, heat and power generation. The trigeneration technology can either be implemented in new industrial enterprises or integrated into the existing system, which makes it more stable and affordable.

The aim of this bachelor's thesis was to explain different energy production technologies, to provide an overview of the gas engine trigeneration technology, as well as the main and auxiliary equipment used in this system, to calculate and analyse the possible payback period in several different situations, and to find out what the advantages and disadvantages of the trigeneration system are.

According to the author, the aim has been achieved.

The first chapter provides an overview of the methods and possibilities of heat and power generation. This chapter explains the technologies of separate generation, cogeneration and trigeneration as well as the possibilities of their application. It also gives a survey of the situation of energy production in Estonia, especially, that of the first trigeneration plant built in Estonia in 2013 and dismantled later.

The second chapter overviews the equipment used in the gas engine trigeneration system. It explains the working principle of both the main devices, such as the gas engine and absorption cooler, and auxiliary devices, such as the heat exchanger, dry cooler, gas train, etc.

The third chapter focuses on calculating the possible payback period of the trigeneration system introduced in an industrial company in several different situations and evaluating

its potential by analysing the main advantages and disadvantages compared to other ways of generating thermal energy.

The trigeneration system was compared to two possible alternatives, namely, the purchase of thermal energy from the local district heating network and the independent generation of thermal energy in a local natural gas-fired boiler house. Both alternatives involved electricity delivered by the power distribution grid. Within each alternative, three different cases were considered, the analysis of which has led to the conclusions drawn in this thesis.

The implementation of the triple generation system is reasonable for the current market situation in 2022, when electricity prices were exceptionally high. An important conclusion is also that the payback of the investment in the trigeneration system is especially fast in the power distribution grid with more expensive heat, which was Vändra region as of March 2023.

During the analysis of the trigeneration system, the possible payback period for 2023 was also calculated. The forecast was based on the average prices of electricity and natural gas in the period 2020 - 2022 and the first three months of 2023. According to the results of the analysis, simultaneous production of cooling, heat and power is particularly advantageous in times of high electricity and low natural gas prices. However, the aforementioned option is quite unlikely, because electricity prices also depend on the price of natural gas.

Trigeneration is not limited to the application of a natural gas engine. Therefore, further development of this thesis suggested by the author is a comprehensive techno-economic analysis of trigeneration systems based on other technologies. It is possible to compare the advantages and disadvantages of the application of gas engines on other fuels and to evaluate their perspective compared to the cogeneration and trigeneration systems with natural gas engines.

Another possible object of analysis is a trigeneration system operating on biomass. Biomass is an environmentally friendly and affordable renewable resource, the burning of which does not cause serious environmental problems. It is also possible to compare the aforementioned technologies to each other in order to find out which option pays for itself the fastest. All the calculations and analyses presented in this bachelor's thesis are of a general nature. However, at the level of the master's thesis, it is possible to

consider the specific needs and determined parameters of a certain industrial company and evaluate the potential of the trigeneration system based on them.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

[1] Euroopa Liidu Nõukogu ja Euroopa Ülemkogu. *Kliimamuutused: mida teeb EL*. [www] <https://www.consilium.europa.eu/et/policies/climate-change/>. Kasutatud 28.03.2023.

[2] A. Volkova, E. Latõšov, V. Mašatin, I. Krupenski ja A. Siirde, "Soojuse tootmine kaugkütte jaoks", *Jätkusuutlik kaugküte*. Tallinn, 2022. [Online]. Loetud aadressil: <https://kaugkutetaltech.ee/soojuse-tootmine/>. Kasutatud 04.03.2023.

[3] Energiatalgud. *Soojusjõuseadmed*. [www] <https://energiatalgud.ee/Soojusj%C3%B5useadmed>. Kasutatud 25.02.2023.

[4] Elering, *Eesti elektrivarustuskindluse aruanne*. Tallinn, 2022. Loetud aadressil: <https://elering.ee/varustuskindluse-aruanded>. Kasutatud 12.02.2023.

[5] M. Hasanuzzaman and L. Kumar. „Energy Supply” in *Energy for Sustainable Development*. Elsevier Inc, 2020. Loetud aadressil: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128146453/energy-for-sustainable-development>. Kasutatud 12.03.2023.

[6] Elering, *Elektrituru käsiraamat*. Tallinn, 2022. Loetud aadressil: <https://elering.ee/elektrituru-kasiraamat>. Kasutatud 26.02.2023.

[7] Energy Education. *Power Plant*. [www] https://energyeducation.ca/encyclopedia/Power_plant. Kasutatud 12.02.2023.

[8] Statistikaamet. *Elektrienergia ja soojuse tootmine ning toodanguindeks (kuud)*. [www] https://andmed.stat.ee/et/stat/majandus__energeetika__energia-tarbimine-ja-tootmine__luhiajastatistika/KE20. Kasutatud 12.02.2023.

[9] Euroopa Komisjon, *Energialiidu olukorda käsitlev 2020. aasta aruanne, mis on ette nähtud energialiidu ja kliimameetmete juhtimist käsitleva määrusega (EL) 2018/1999*. Brüssel, 2020. Loetud aadressil: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0950&from=SL>. Kasutatud 12.02.2023.

[10] SA Kutsekoda, *COVID-19 põhjustatud majanduskriisi mõju tööjõuja oskuste vajaduse muutusele: energeetika ja mäetööstus*. Tallinn, 2021. Loetud aadressil:

https://oska.kutsekoda.ee/wp-content/uploads/2016/04/Eriuuring_Energeetika-ja-maetoostus.pdf. Kasutatud 12.02.2023.

[11] A. Volkova, E. Latõšov, V. Mašatin, I. Krupenski ja A. Siirde, "Kaugküte eile, täna ja homme", *Jätkusuutlik kaugküte*. Tallinn, 2022. [Online]. Loetud aadressil: <https://kaugkute.taltech.ee/kaugkute-eile-tana-homme-2/>. Kasutatud 04.03.2023.

[12] GE Gas Power. *Combined Heat and Power Generation*. [www] <https://www.ge.com/gas-power/applications/chp>. Kasutatud 13.03.2023.

[13] C. Eiche, "Lokaalse koostootmisjaama toodangu modelleerimine ja majanduslik analüüs Ülemiste City näitel", [Magistritöö], Inseneriteaduskond, TalTech, Tallinn, Eesti, 2018. [Online]. Loetud aadressil: <https://digikogu.taltech.ee/en/Item/741516a4-ebd1-4196-a056-acb2ec7425a2>. Kasutatud 13.03.2023.

[14] A. Godõrev, "Kõrgepinge elektroodkatla kasutamine soojusenergia tootmiseks kaugküttevõrgus Tallinna Mustamäe katlamaja näitel", [Magistritöö], Inseneriteaduskond, TalTech, Tallinn, Eesti, 2021. [Online]. Loetud aadressil: <https://digikogu.taltech.ee/en/item/56cc1b04-bec0-47a0-8d40-46e8996592f6>. Kasutatud 14.03.2023.

[15] A. Ots, *Soojustehnika aluskursus*. Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2011.

[16] Edina. *Trigeneration (CCHP)*. [www] <https://www.edina.eu/power/trigeneration-cchp>. Kasutatud 13.03.2023.

[17] Clarke Energy. *Trigeneration/CCHP*. [www] <https://www.clarke-energy.com/trigeneration/>. Kasutatud 13.03.2023.

[18] M. Salimi, M. Hosseinpour, S. Mansouri and T. N. Borhani, „Environmental Aspects of the Combined Cooling, Heating and Power (CCHP) Systems”, MDPI, *Processes*. Loetud aadressil: <https://www.mdpi.com/2227-9717/10/4/711>. Kasutatud 23.02.2023.

[19] Pure World Energy. *CCHP Systems*. [www] <https://www.pureworldenergy.com/solutions/chp/cchp/>. Kasutatud 12.02.2023.

[20] Vooremaa, *Painküla tööstusalale rajatavale koostootmisjaamale pandi nurgakivi*. Jõgeva, 2011. Loetud aadressil: <https://www.vooremaa.ee/painkula-toostusalale-rajatavale-koostootmisjaamale-pandi-nurgakivi/>. Kasutatud 03.03.2023.

[21] Kaltra. *Dry Coolers VS. Wet Cooling Towers*. [www] <https://www.kaltra.com/single-post/2019/08/19/dry-coolers-vs-wet-cooling-towers>. Kasutatud 12.03.2023.

[22] *Sisepõlemismootoriga 4 MWe elektrilise võimsusega koostootmisjaama tehniline kirjeldus*, publitseerimata materjal.

[23] *Technical data 50 HzTCG 2032 V16, Natural gas, 500 NOx*, publitseerimata materjal.

[24] Jenbacher. *Jenbacher J616*. [www] <https://www.jenbacher.com/en/gas-engines/type-6/j616>. Kasutatud 13.03.2023.

[25] K. Lehtoranta jt, „Natural Gas Engine Emission Reduction by Catalysts“, *Transsmart*, vol 1, no 1, p 7, 2016, doi: 10.1007/s40825-016-0057-8. Loetud aadressil: http://transsmart.fi/files/400/Natural_Gas_Engine_Emission_Reduction_by_Catalysts.pdf. Kasutatud 13.03.2023.

[26] Sigma Thermal. *Glycol Heaters*. [www] <https://www.sigmathermal.com/blog/glycol-heaters/>. Kasutatud 17.03.2023.

[27] BYJU'S Exam Prep. *What is a Heat Exchanger?* [www] <https://byjusexamprep.com/heat-exchanger-i>. Kasutatud 17.03.2023.

[28] Savree. *Plate Heat Exchanger (PHE) Explained*. [www] <https://savree.com/en/encyclopedia/plate-heat-exchanger-phe>. Kasutatud 17.03.2023.

[29] Alfa Laval. *Brazed Plate Heat Exchangers*. [www] <https://www.alfalaval.com/products/heat-transfer/plate-heat-exchangers/brazed-plate-heat-exchangers/>. Kasutatud 17.03.2023.

[30] SWEP. *Absorption Chiller*. [www] <https://www.swep.net/refrigerant-handbook/10.-systems/asdf1/>. Kasutatud 20.03.2023.

- [31] The Engineering Mindset. *Absorption Chiller, How it works*. [www] <https://theengineeringmindset.com/absorption-chiller-works/>. Kasutatud 20.03.2023.
- [32] Link Energy. *How Absorption Chillers Work*. [www] <https://goenergylink.com/blog/how-absorption-chillers-work/>. Kasutatud 20.03.2023.
- [33] GMS Interneer Co., Ltd. *Absorption Chiller*. [www] <https://www.gmsthailand.com/blog/absorption-chiller/>. Kasutatud 20.03.2023.
- [34] Intervjuu ettevõttes Filter Solutions OÜ. Tallinn, 2023.
- [35] Elering, *Maagaasi kvaliteedi tunnustus*, Tallinn, 2023. Loetud aadressil: <https://elering.ee/vorgugaasi-kvaliteet>. Kasutatud 02.05.2023.
- [36] Energiatalgud. *Alumine kütteväärtus*. [www] <https://energiatalgud.ee/moisted/alumine-kuttevaartus>. Kasutatud 26.03.2023.
- [37] Rahandus. *Tasuvusaeg*. [www] <https://www.rahandus.ee/et/tasuvusaeg>. Kasutatud 27.03.2023.
- [38] Elering. *Gaasisüsteem*. [www] <https://elering.ee/gaasisusteem#tab0>. Kasutatud 27.03.2023.
- [39] Elering. *GetBaltic hinnad*. [www] <https://dashboard.elering.ee/et/gas-trade/price?interval=hours&period=years&start=2021-12-31T22:00:00.000Z&end=2022-12-31T21:59:59.999Z>. Kasutatud 07.04.2023.
- [40] Elering. *Elektribörs*. [www] <https://elering.ee/elektribors>. Kasutatud 27.03.2023.
- [41] Nord Pool. *Day-ahead prices*. [www] <https://www.nordpoolgroup.com/en/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/EE/Yearly/?view=table>. Kasutatud 07.04.2023.
- [42] Konkurentsiamet. *Konkurentsiameti kooskõlastatud soojuse lõpptarbijahinnad seisuga 01.04.2023*. [www] <https://www.konkurentsiamet.ee/et/vesi-soojus/soojus/hindade-kooskolastamine>. Kasutatud 07.04.2023.

[43] Adven. *Vändra kaugkütte võrgupiirkond.* [www] <https://adven.com/ee/kaugkute/vandra-kaugkutte-vorgupiirkond/>. Kasutatud 08.04.2023.

[44] KPMG Baltics OÜ, *Heitsoojuse ja heitjahutuse kasutamise võimalused kütte- ja/või jahutus sektoris ning Eesti töhusa kaugkütte ja -jahutuse potentsiaali hindamine.* Tallinn, 2020. Loetud aadressil: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2021-10/et_ca_2020_et.pdf. Kasutatud 27.03.2023.

[45] Adven. *Kaugküte.* [www] <https://adven.com/ee/kaugkute/>. Kasutatud 08.04.2023.

[46] Tööstusuudised, *Parim alternatiiv kallile gaasile on kohalik põlevkiviõli.* Juuli 2020. Loetud aadressil: <https://www.toostusuudised.ee/sisuturundus/2022/07/20/parim-alternatiiv-kallile-gaasile-on-kohalik-polevkivioli>. Kasutatud 08.04.2023.

[47] Australian Government, Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water. *Boiler Efficiency.* [www] <https://www.energy.gov.au/sites/default/files/hvac-factsheet-boiler-efficiency.pdf>. Kasutatud 08.04.2023.

[48] Konkurentsiamet, *Maagaasi hinnatõusu analüüs.* Tallinn, 2021. Loetud aadressil: https://www.konkurentsiamet.ee/sites/default/files/Dokumentide-failid/maagaasi_analuus_2021_dets.pdf. Kasutatud 09.04.2023.

[49] Euroopa Nõukogu. *Infograafik - Kust pärineb Eli gaas?* [www] <https://www.consilium.europa.eu/et/infographics/eu-gas-supply/>. Kasutatud 09.04.2023.

[50] Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium. *Gaasiturg.* [www] <https://www.mkm.ee/energeetika-ja-maavarad/energiaturud/gaasiturg>. Kasutatud 09.04.2023.

[51] Euractiv. *Study: Stronger Policy Drive Needed for Green Alternatives to Replace Russian Gas by 2028.* [www] <https://www.euractiv.com/section/energy/news/study-stronger-policy-drive-needed-for-green-alternatives-to-replace-russian-gas-by-2028/>. Kasutatud 16.05.2023.