

Energiatehnoloogia instituut

**PUUGAASIL TÖÖTAVAD
MIKROKOOSTOOTMISEADMED**

**MICRO COMBINED HEAT AND POWER WOOD GAS
PLANTS**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Henry Rebane

Üliõpilaskood 153222MASM

Juhendaja: Eduard Latõšov, dotsent

Tallinn 2020

(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.

"27" mai 2020.

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." mai 2020.

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....." mai 2020.

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Henry Rebane (*autori nimi*) (sünnikuupäev: 23.10.1992)

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

2. *PUUGAASIL TÖÖTAVAD MIKROKOOSTOOTMISEADMED,*

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on Eduard Latõšov,

(juhendaja nimi)

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.

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

4. 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.*

_____ (*allkiri*)

27.05.2020 (*kuupäev*)

Energiatehnoloogia instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Henry Rebane, 153222MASM

Õppekava, peeriala: MASM02/15 - Energiatehnoloogia ja soojusenergeetika

Juhendaja: dotsent Eduard Latõšov, 620 3908

Lõputöö teema:

PUUGAASIL TÖÖTAVAD MIKROKOOSTOOTMISEADMED

MICRO COMBINED HEAT AND POWER WOOD GAS PLANTS

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Analüüsida Eesti energiatarbimist ning eesmäärke
2. GFE45 koostootmiseseadme tehniline ning majanduslik analüüs ning hinnangu andmine
3. Hinnata gaasigeneraatorite kasutusvõimalusi ning kasutamist piiravaid tegureid Eestis

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Teema valik, eesmärkide seadmine ja ülesehituse kinnitamine	28.02.2020
2.	Andmete kogumine, analüüsimine ja järelduste tegemine	20.05.2020
3.	Andmete sisestamine ning lõplik vormistamine	26.05.2020
4.	Lõputöö esitamine	27.05.2020

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: "27" mai 2020. a

Üliõpilane: Henry Rebane

..... "27" mai 2020. a

/allkiri/

Juhendaja: Eduard Latõšov

..... "27" mai 2020. a

/allkiri/

SISUKORD

EESSÕNA	7
SISSEJUHATUS	8
1. EESTI ENERGIATARBIMINE NING EESMÄRGID	10
1.1 Puidu kasutamine Eesti energeetikas	10
1.2.1 Soojusenergia toodang	11
1.2.2 Elektrienergia toodang	13
1.2 Puidu energeetiline karakteristik ning puitkütuste liigid	14
2. VÄÄRINDATUD PUIDUPÕHINE KÜTUS – PUUGAAS.....	18
2.1 Puidu gaasistamine	19
2.2 Gaasistamise eelised	20
2.3 Gaasigeneraatorite tüübid.....	21
2.3.1 Liikumatu kihiga vastuvoolu ehk ülesvoolu gaasigeneraator	22
2.3.2 Liikumatu kihiga pikivoolu ehk allavoolu gaasigeneraator	23
2.3.3 Liikumatu kihiga ristivoolu gaasigeneraator	24
2.3.4 Mulliv keevkihtreaktor.....	25
2.3.5 Tsirkuleeriv keevkihtreaktor	26
2.3.6 Pneumotransport- ehk läbivoolureaktor.....	27
2.3.7 Plasmareaktor.....	28
3. GFE45 KOOSTOOTMISSEADE NING TARBIJA	30
3.1 Seadme tehniline kirjeldus	30
3.2 Kütuse spetsifikatsioon	33
3.3 Tööprotsessi kirjeldus.....	35
3.4 Tarbija kirjeldus.....	35
3.4.1 Tänapäevane energeetika.....	36
3.4.2 Prognoositav energeetika	37
4. GFE45 KOOSTOOTMISSEADME KASUTAMISE OTSTARBEKUSE HINNANG	39
4.1 Ühe aasta energia tootmise ning käitamiskulu prognoos kulukomponentide lõikes	39
4.1.1 Toodetav elektri- ja soojusenergia	39
4.1.2 Hakkepuidu kulu	40
4.1.3 Otseliini tulud ja kulud	40
4.1.4 Seadmega seotud hoolduskulud	41
4.1.5 Energia tootmise kogukulu	42
4.2 GFE45 energialahendus võrreldes vana süsteemiga	43
4.3 Investeering.....	46
4.4 Käiduandmed	49
4.5 Järeldused	54

4.5.1 Puiduhakke separaator.....	56
4.5.2 Puiduhakke kuivati	57
4.6 Näiteid puugaasi kasutuselevõtu projektidest	58
4.6.1 GFE45 koostootmisseade Paldiskis PAKRI Teadus- ja Tööstuspark OÜ-s	59
4.6.2 GFE45 koostootmisseade Tartus Kodumaja AS-is	59
4.6.3 Võhma koostootmisjaam	59
4.6.4 GFE45 koostootmisseade Soomes Nurmes Kuittila talus	60
KOKKUVÕTE	61
SUMMARY.....	64
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	66

EESSÕNA

Magistritöö teema valisin eelkõige isiklikust huvist. Alguse sai see kõik sellest, et meie ettevõtte tootmisbaasis olev katel oli amortiseerunud, mistõttu see vajab väljavahetamist. Kuna turul on erinevaid tehnoloogiaid ning võimalusi mitmeid, tuli analüüsida pakutavate seadmete plusse, miinuseid ning sobivust konkreetseesse keskkonda. Protsess lõppes ühe puugaasil töötava mikrokoostootmiseseade paigaldamisega. Vaatamata põhjalikule eeltööle kaasnes seadme paigaldamisel rida probleeme, mis vajasis lahendust. Otsustasin ennast puugaasi teemaga rohkem kurssi viia, et probleemsetest kohtadest paremini aru saada, nendele lahendus leida ning tulevasi probleeme vältida. Järgmiseks võtsin ühendust Tallinna Tehnikaülikooli Inseneriteaduskonna Instituudi dotsendi Eduard Latõšoviga, et formuleerida lõputöö teema ning paika panna üldine tööde teostamise plaan.

Autor tänab oma juhendajat Eduard Latõšovit, kes oli suureks abiks lõputöö koostamisel, soovitades asjakohast kirjandust ning hoides autorit kogu tööprotsessi õigel kursil. Lisaks tänab autor kõiki Energiatehnoloogia ja soojusenergeetika õppekava õppejõude, kelle käe all õpingud on möödunud.

SISSEJUHATUS

Olgugi, et aastakümneid on räägitud fossiilkütuste negatiivsetest külgedest, on alles viimastel aastatel suurenenud inimeste keskkonnateadlikkus ning sellest tulenevalt ka taastuvenergia kasutamine. Vaatamata taastuvenergia osakaalu suurenemisele ei ole Eesti ühe olulisema maavara, põlevkivi, kõrvale tekkinud elektrienergia tootmisel ühtegi tõsist konkurenti. Antud töös on fossiilkütuste võimaliku alternatiivina analüüsitud väärindatud puitkütuse (puugaasi) kasutamist. Puitkütuste väärindamine on eelistatud eelkõige energeetilise lisaväärtuse tõttu, kuna raiemahud on Eestis rangelt reguleeritud. Vaadates Eesti riigi metsasust, siis tundub see pealtnäha ainuõige suunana, pakkudes lahendust ka kliimamuutuste vastu võitlemisel. Kui fossiilkütuste põletamisel vabaneb atmosfääri hulganisti saasteaineid, siis biokütuste põletamisel vabaneb süsihappegaas, mis loetakse vastavalt taastuvenergia direktiivile nulliks, kuna eeldatakse, et raiutud metsad taastatakse ning need seovad aja jooksul põletatud süsiniku koguse. Teiseks oluliseks aspektiks on biokütuste oluliselt parem kättesaadavus, töödeldavus ning toodangu kontroll võrreldes konkureerivate taastuvate energiaallikatega (geotermaalenergia, hüdroenergia, päikeseenergia, loodete energia, laineenergia, tuuleenergia), mis on otseses seoses looduslike nähtustega (päike, tuul, vesi). Kuna tegemist on kodumaise ressursiga, siis ei puidupõhise biomassi osakaalu suurendamisel ning põlevkivi osakaalu vähendamisel ei vähenda see riigi üleüldist energiapuudust. Puidupõhise tooraine kasutamist toetab ka fakt, et enamik tootmiseks tehtavatest kuludest tehakse Eestist ning tulu jõuab ka vaesematesse maapiirkondadesse. Olgu öeldud, et olulist rolli taastuvenergia arendamisel ning uute tehnoloogiate kasutusevõtul mängivad riiklikud tasud ning toetused, kuna lõppude lõpuks peab olema püstitatud seade ka majanduslikult tasuv.

Lõputöö on jaotatud viite peatükki. Esimeses sissejuhatavas peatükis tutvustab autor Eesti energiatarbimist ning energiatarbimise eesmärgi. Selgub, mis on tänasel päeval energeetikasektoris kõige kasutatavam kütus, kuid miks selle osakaal tulevikus väheneb, missugused on Eesti energiatarbimise eesmärgid ning kuidas püstitatud eesmärkideni jõuda. Loomulikult vaatame üle ka puidu kasutamise statistika ning peatüki lõpuks teame täpselt, millises mahus kasutatakse Eestis soojus- ja elektrienergia tootmiseks puitkütust ehk puugaasi toorainet. Põgusalt vaatame üle ka puidupõhiste kütuste omadused ning puitkütuste liigid, et mitte ilma olulise taustinformatsioonita puidust spetsiifilisele puugaasi teemale minna. Teises peatükis selgitab autor puidu gaasistamise protsessi olemust ning vaadatakse üle ka erinevad gaasigeneraatorite tüübid. Kolmas peatükk annab ülevaate GFE45 mikrokoostootmisest ning koostootmisest paigaldanud tarbijast. Neljandas

ehk viimases peatükis leiab autor seadme ühe aasta energia tootmise ning käitamiskulu kulukomponentide lõikes ning võrdleb saadud tulemusi vana süsteemiga, analüüsib paigaldatud seadme majanduslikku otstarbekust ning leiab seadme tasuvusaja. Esitatakse olulised ning reaalsed käiduandmed, mida võrreldakse esialgse prognoosiga, tehakse kokkuvõtte kerkinud probleemidest, millest tehakse järeldused ning tuuakse mõned näited teistest puugaasi kasutuselevõtu projektidest.

Käesoleva lõputöö eesmärk on anda ülevaade Eesti energiatarbimisest, puidu gaasistamisest ja gaasistamise tehnoloogiatest energia tootmise mõistes ning hinnata puugaasil töötavate mikrokoostootmiseseadmete kasutusvõimalusi, eeliseid ja puudusi Eestis reaalset paigaldatud GFE45 koostootmiseseadme näitel.

1. EESTI ENERGIATARBIMINE NING EESMÄRGID

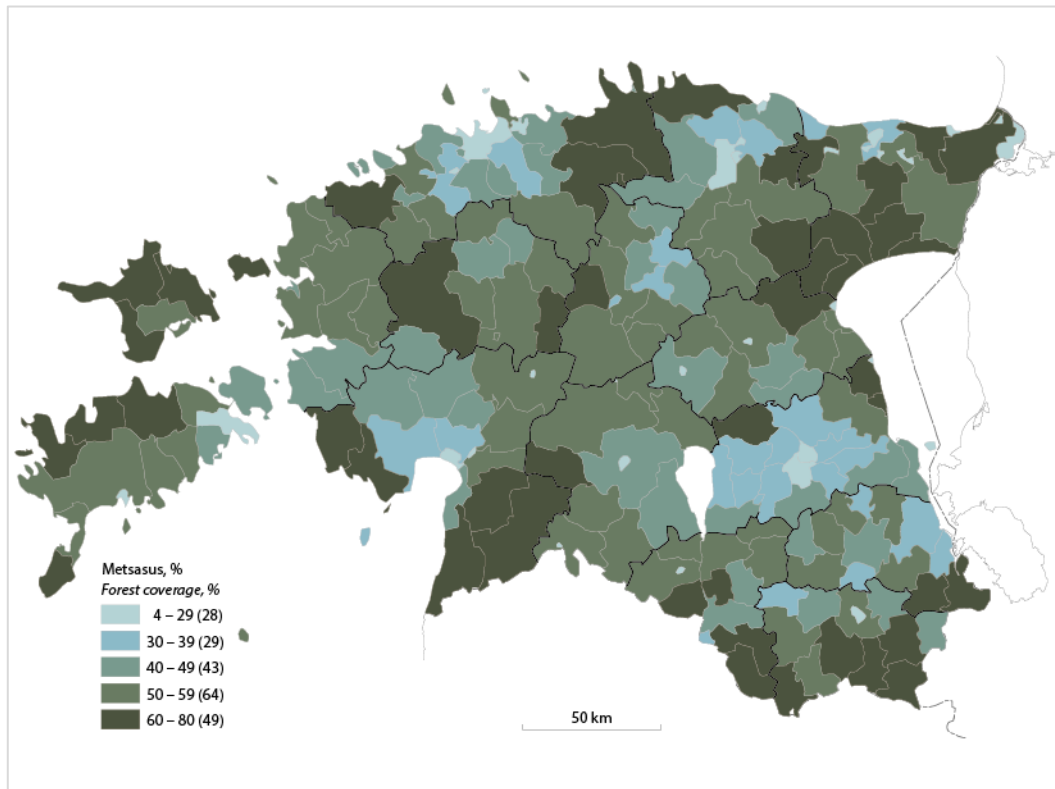
2018. aastal toodeti kõikides Eesti elektrijaamades kokku 12 322 GWh elektrienergiat ning 4718 GWh soojusenergiat. [1] Eesti primaarenergia vajadused kaetakse valdavalt olemasolevate energiaallikatega. Tänaasel päeval moodustab ülekaaluka osa elektrienergia tootmisest endiselt põlevkivi, kuid lähitulevikus hakkab see järk-järgult, kuid oluliselt vähenema. See tuleneb olemasolevate elektrijaamade amortiseerumisest, uute karmistuvate keskkonnapiirangute rakendamisest ning Eesti riigi eesmärgist üle minna vähese süsinikuheitega majandusele. Nimelt on plaan vähendada kasvuhoonegaaside (KHG) hulka ligikaudu 70% aastaks 2030 ning 80% aastaks 2050 võrreldes 1990. aastaga. [2]

Muutused energiatarbimises eeldavad muutusi ka inimeste igapäevastes toimingutes, transpordis, metsa- ja põllumajanduses ning eelkõige energiatootmises, mis on vaieldamatult suurim KHG-de heitkoguste allikas Eestis. Juba täna astume väga selgeid samme selles suunas, et aastaks 2030 tarbiksime taastuvenergiat mahus, mis moodustaks vähemalt 50% lõpptarbimisest. Justnimelt selline eesmärk seati energiamajanduse arengukavas aastani 2030 (ENMAK 2030). [2] Eurostat SHARES mudeli andmetel moodustas taastuvenergia osakaal 2018. aastal 29,996% energia brutotarbimisest. [3] Selleks, et taastuvenergia jätkaks oma kasvutrendi, tuleb maksimaalselt ära kasutada geograafilistest ning looduslikest tingimistest tulenevaid võimalusi. Näiteks oli Eesti, ühe tähtsaima taastuva loodusvara ning elukeskkonna, metsamaa pindala 2018. aastal 2 331 000 hektarit. [4] Vaatamata rangelt kaitstava metsamaa osakaalu suurenemisele on metsamaa juurdekasv majanduspiiranguta metsamaal kasvanud, seega ei ole puidu üleüldine kättesaadavus muutnud. [5] Positiivse trendina selgub, et juba eelmisel aastal kasvaski Eestis puitkütustest toodetud elektrienergia toodang, kuid langes põlevkivist toodetud energiatoodang. [2]

1.1 Puidu kasutamine Eesti energeetikas

Eesti maismaa pindala on 4 533 902 hektarit ning kõige suurema osa sellest moodustab metsamaa. [6] 2018. aasta lõpuga on Eesti metsavaru 2 331 000 hektarit ehk 51,4% kogu pindalast. Olgugi, et 2009. aastal suurenes hüppeliselt soojus- ja elektrijaamades puitkütuste kasutamine on Eesti metsavarud viimasel kümnel aastal tasapisi suurenenud, olles 2018. aastal kõigi aegade kõrgeimal tasemel. [4] Loomulikult ei ole kogu maht sellest mõeldud otseselt energeetiliseks kasutamiseks, ligikaudu 26% Eesti metsamaast on kaitse all. [7] Olenemata sellest on võimalik pika aja kestel

jätksuutlikult raiuda kuni 15 000 000 m³ metsamaterjali aastas, kuna just selline kogus kasvab hinnanguliselt igal aastal metsa juurde. Metsaressursside mittetäielikul kasutamisel on tegemist ebamõistliku taastuenergia raiskamisega. [8] Raiemahud on läbi aastate aga püsinud madalamal tasemel, mis annab alust puidu kui taastuva energiaallika osakaalu suurendamisele Eesti energeetikas. [9] Seda toetab kindlasti ka puidu tõhusam kasutamine ning väärindamine.

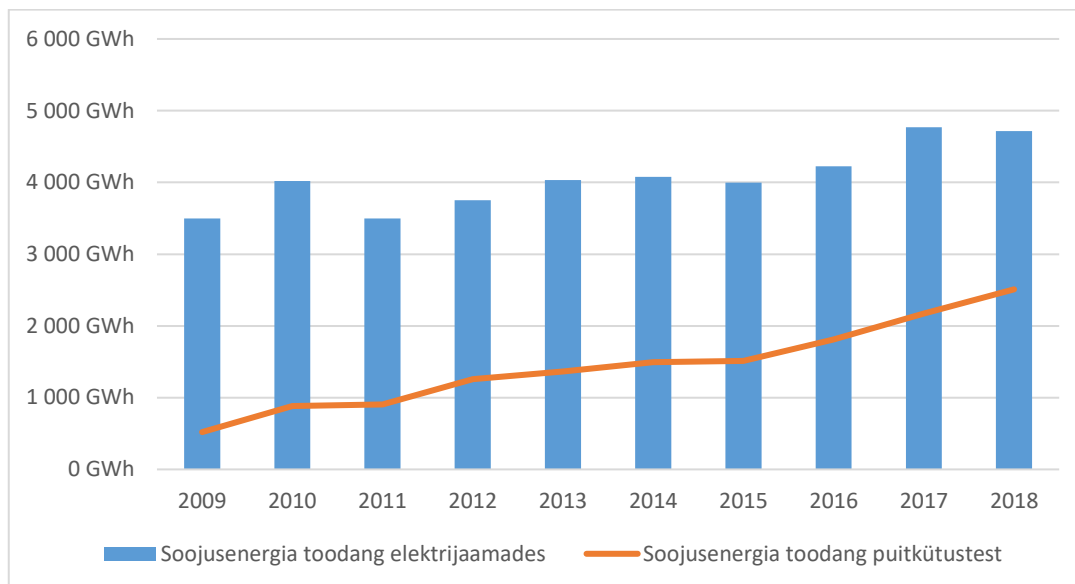


Joonis 1.1 Eesti metsasuse kaart aastast 2016. [10]

1.2.1 Soojusenergia toodang

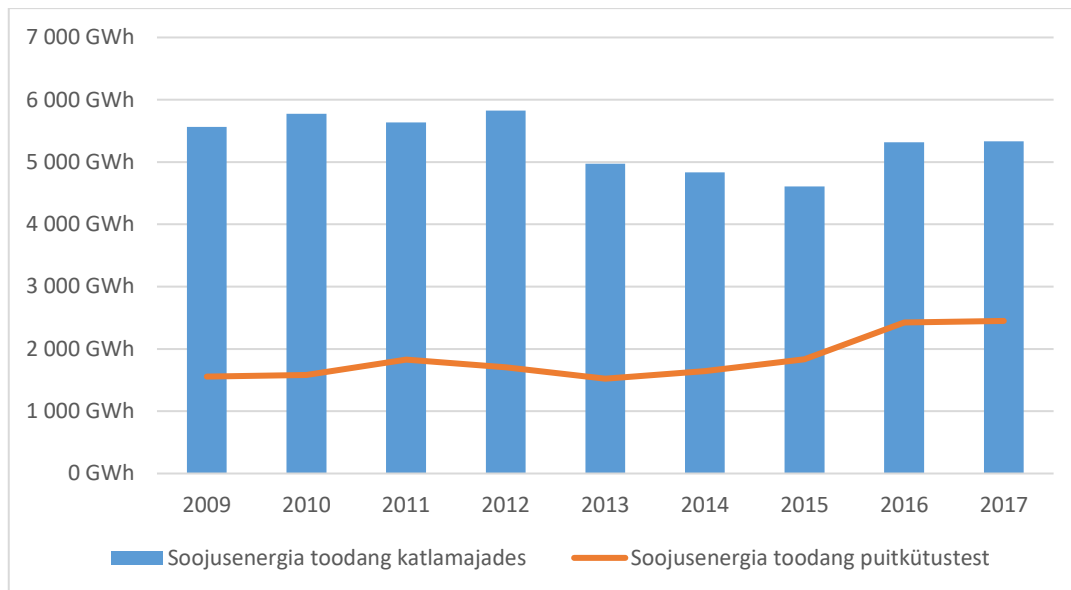
Tuginedes Eesti Statistika andmebaasi viimase 20 aasta andmetele, kasutati elektrijaamades juba 1999. aastal 10 000 tihumeetrit puitkütust soojusenergia tootmiseks, kuid kogu toodetud soojusenergia leidis kasutust omatarbeks. Seesugune trend jätkus ka järgmised kümme aastat, sest esimesed andmed avalikkusele tootvatest elektrijaamadest pärinevad 2009. aastast, kui on hüppeliselt tõusnud puitkütuste tarbimine. Kui veel 2008. aastal moodustas soojusenergia toomiseks tarbitud puitkütus 3200 tihumeetrit aastas, siis järgmisel aastal oli see number juba 256 400 tihumeetrit ning 520 GWh, moodustades sellega ligikaudu 15% kogu elektrijaamade soojusenergia toodangust. Sellest ajast alates on igal järgneval aastal puitkütustest toodetud

soojusenergia maht kasvanud, jõudes esialgsest 520 GWh-st 2 510 GWh-ni 2018. aastal. Sellest 2 331 GWh toodeti avalikkusele tootvates elektrijaamades ning 179 GWh endale tootvates elektrijaamades. Soojusenergia tootmiseks tarbitud kütuse maht oli 2018. aastal kokku 1 324 000 tihumeetrit. [1]



Joonis 1.2 Eesti elektrijaamade soojusenergia toodangu ning puitkütustest toodetud soojusenergia toodangu võrdlus (GWh), perioodil 2009 – 2018. [1]

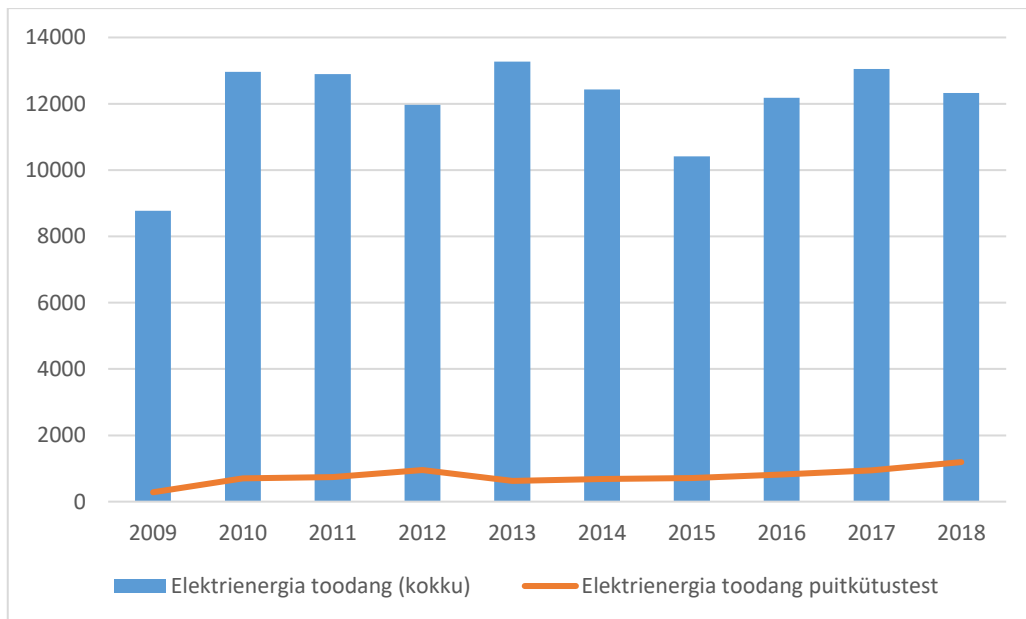
Tunduvalt pikemalt ning suuremas mahus on puitkütuseid kasutatud katlamajades. 2017. aastal toodeti ligikaudu 46% toodetud soojusest puidul töötavate kateldegaga. Graafikult 1.3 on näha, et puitkütuste tarbimist aastatel 2009 – 2017. [11] Kasutades puitu katlas ainult soojuse tootmiseks tundub see energiaressursside raiskamisena, kuna tunduvalt tõhusam variant on soojuse ja elektri koostootmine. Tuleb tõdeda, et nii see ka läinud on, sest viimase 10 aastaga on koostootmisseadmetega toodetud soojusenergia maht suurenenud 60,6%. [12] Koostootmisseadmes leiab kasutamist valdavalt väärindamata puitkütus. [13] Statistikaameti poolt avaldatud andmetele tuginedes on Eestis 2018. aasta seisuga kokku 52 töötavat koostootmisjaamade genereerimisseadet (turbiini). [14]



Joonis 1.3 Eesti katlamajade soojusenergia toodangu ning puitkütustest toodetud soojusenergia toodangu võrdlus (GWh), perioodil 2009 – 2017. [11]

1.2.2 Elektrienergia toodang

Vaadates andmeid puitkütustest elektrienergia tootmise kohta, näeme, et see sai alguse märkimisväärselt hiljem kui soojusenergia tootmine. Esmakordselt kasutati puitkütust elektrienergia tootmiseks 2004. aastal ning ka siis leidis see kasutust täielikult omatarbeks. Nii nagu ka soojusenergia tootmisel, tõusis ka elektrienergia tootmiseks tarbitud kütuse maht 2009. aastal hüppeliselt. Toodetud elektrienergia maht on esialgselt 283 GWh-ilt kasvanud 1192 GWh-ni 2018. aastal, kus see on ka kõigi aegade kõrgeimal tasemel, kasutades elektrienergia tootmiseks puitkütust 588 000 tihumeetrit. 97% tarbitud kütusest leidis kasutust avalikkusele tootvates elektrijaamades. [1] Koostootmisprotsessis toodetud elektri osatähtsus elektri kogutoodangus moodustas 2018. aastal 12,1% ehk 1 497 GWh. Veel kümme aastat tagasi oli see number 8,5%. [14]



Joonis 1.4 Eesti kogu elektrienergia toodangu ning puitkütustest toodetud elektrienergia toodangu võrdlus (GWh), perioodil 2009 – 2018. [1]

Puitkütuste kasutamise mahtu elektrienergia tootmises on märkimisväärselt suurendanud riiklike toetuste andmine. Esiteks on taastuvatest energiaallikatest koostootmise režiimil või tõhusa koostootmise režiimil elektri tootjale põhivõrguettevõtja poolt makstava toetuse määraks kogunisti 53,7 €/MWh kohta. [5] Lisaks on vastavalt elektrituruseadusele alla 15 kW võimsusega taastuvatel energiaallikatel põhinevatel elektritootmiseseadmetel lihtsustatud liitumistingimused võrguga ühendamiseks ning alla 200 kW tootmiseseadme netovõimsuse korral puudub elektritootjal tegevusloa vajadus. [2] Eelnimetatud kannustused tagavad ka tulevikus investeeringute jätkumise puidupõhistesse energialahendustesse. [5]

1.2 Puidu energeetiline karakteristika ning puitkütuste liigid

Puit on puittaimede (puude ja põõsaste) tüve ja okste põhiosa, mis koosneb peamiselt puitunud rakkudest ning rakkude kest omakorda tselluloosist, hemitselluloosist ning liigniinist. [15] [16] Vähesel määral on esindatud ka vaigud, tõrv ning fenoolid. [17] Puidu mehaaniline tugevus ning ligikaudu 40% kütteväärtusest on tingitud liigniinist. Vaatamata faktile, et puit on loodusliku kütuse noorim liik, peetakse seda Eesti üheks vanimaks kasutatava kütuse liigiks. [15]

Puidu elementaarkoostise moodustavad süsinik (C), vesinik (H), hapnik (O), lämmastik (N), väävel (S) ning kloor (Cl). Kusjuures nimetatud elementidest esimesed kolm moodustavad kogunisti 99% kuivainest (Tabel 1.1). Esitatud list ei ole sugugi mitte lõplik, sest puidu koostises leidub vähesel määral ka niklit (Ni), arseeni (As), kaadiumi (Cd), kroomi (Cr), vaske (Cu), elavhõbedat (Hg), pliid (Pb) ja tsinki (Zn). Viimasena nimetatud metallide sisaldus puu erinevate osade koostises on aga niivõrd väike, et madalamate keskkonnanõuete korral nendega isegi ei arvestata. [17] Olgugi, et põlemisel valdavalt raskemetallid aurustuvad, moodustab osaliselt nendest ka tuhk, mille ringlusesse laskmine on takistatud, kuna metallid võivad pinnasesse imbuda. Keskkonna seisukohalt on eriti olulised elemendid lämmastik, väävel ning kloor. [18] Väavli ning lämmastiku sisaldus mõjutab puidu kütteväärtust minimaalselt, kuid nende elementide kõrge tase võib põhjustada lämmastiku- ja väavliühendite sattumise atmosfääri, millel on kahjulik mõju nii keskkonnale kui ka inimeste tervisele. Lisaks võib kõrge väavlisaldus põhjustada katlaelementide korrosiooni. [19] Kloori esineb peamiselt puitkütuste lehestikus ning okastes ning katlas põletamisel tekitab see oksüdatsiooni ning korrosiooni, mis viivad tõsiste probleemideni. Üheks võimaluseks on eemaldada lehestik ning teiseks võimaluseks on puitkütusesse lisada kõrgema väavlisaldusega kütust nagu näiteks turvas või kivisüsi. [18]

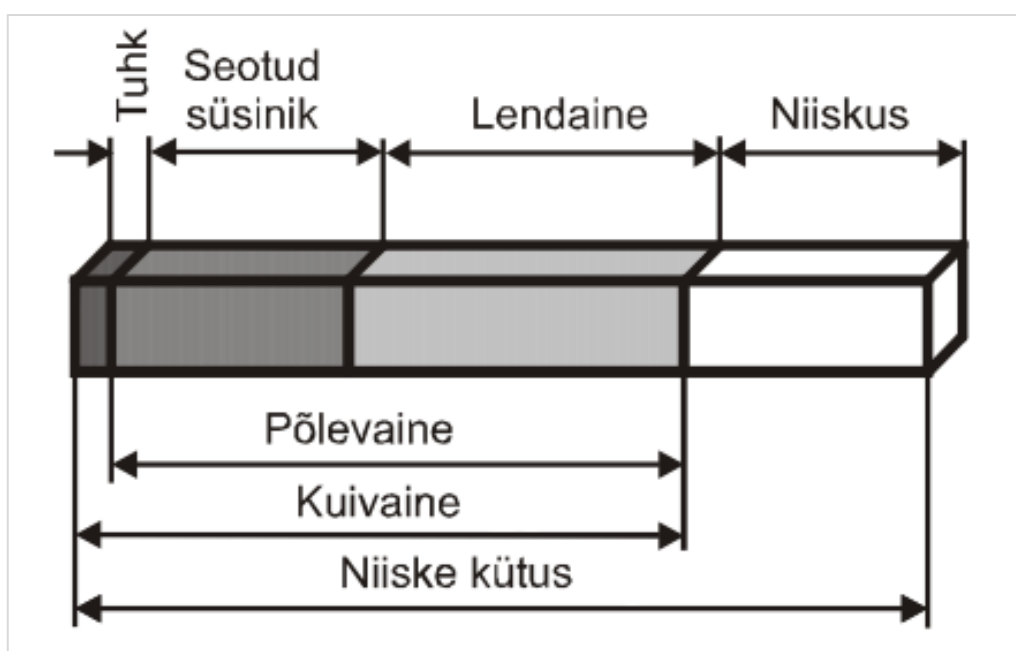
Tabel 1.1 Puidu elementaarkoostis. [17]

Element	Puit, % kuivaines
C	48 % - 50 %
H	6,0 % - 6,5 %
O	38 % - 42 %
N	0,5 % - 2,3 %
S	0,05 %
Cl	<0,01 %

Puidu kütteväärtuseks nimetatakse soojushulka, mis eraldub 1 kg puidu täielikul põlemisel. Kõikide puuliikide puhul saame rääkida sisuliselt püsivast ning võrdsest põlevaine kütteväärtusest 18,9 MJ/kg, mis sõltub mõnevõrra tuha-, niiskuse-, kuivaine- ja lendaine sisaldusest (Joonis 1.5). [15] [16]

Puidu süttimistemperatuuriks on 240 – 270 °C, kuid enne seda algab orgaanilise osa lagunemine, mis jätkub väga kõrgete temperatuurideni ning mille käigus eralduvad gaasilised produktid – puidu lendosad. Lendosad koosnevad põhiliselt järgmistest komponentidest: süsinikmonoksiid (CO), vesinik (H₂), metaan (CH₄), süsinikdioksiid (CO₂), vesi (H₂O). Alles jäänud tahket massi nimetatakse koksiks ning see koosneb peamiselt süsinikust. Niiskus mis koosneb sisemisest ehk hügrokoopsest ning välisest

ehk mehaanilisest niiskusest sõltub kasvukohast, puuliigist, vanusest ning aastaajast. Väline niiskus eraldub loomulikult kuivamisel õhus, kuid sisemine niiskus ainult kuumutamisel temperatuuriga üle 100 °C. Tarbimisaine niiskus õhukuivas puidus on 20%, poolkuivas puidus 21% ning toores puidus üle 50%. Absoluutne niiskus on aga vastavalt 25%, 26 – 50% ning üle 50%. Tuhk on kütuse täielikul põlemisel tekkinud tahke jääk, mille saab jagada sisemiseks ning väliseks tuhaks. Sisemise tuha moodustavad kiudained sisalduvad mineraalsed ühendid, mis näitavad, millises pinnases puu kasvas. Olgu öeldud, et sõltuvalt kasvukohast ja puuliigist võib tuha keemiline koostis oluliselt erineda. Välimine tuhk aga on seotud hoopis mineraalsete ühenditega, mis satuvad puitu tema töötlemisel, ladustamisel ja transpordil. [15] [16]



Joonis 1.5 Tahke kütuse komponendid [17]

Kateldes ning ahjudes kasutatavad puidust biokütused on halupuit, puiduhake, puidubrikett, puidupelletid, puidusüsi ning puugaas ning neid iseloomustatakse järgnevalt:

Halupuit – puutüvest kindla pikkusega saetud ja lõhutud halud (0,25; 0,33; 0,5; 0,75; 1). Kasutatakse nii kodumajapidamistes kui ka väikekateldes. [15] [16]

Puiduhake –peenestatud puidupõhine kütteaine (keskmine osakeste suurus 25-40mm). Tüki suurus ning kuju sõltub hakkuri tüübist. Kasutatakse nii suurtes tööstuses kui ka väikekateldes. [15] [16]

Puidubrikett – peenest ning kuivast puidust kõrge rõhu all ilma sideaineta pressitud korrapärase kujuga toode, mille alumine kütteväärtus on 18,9 MJ/kg, lendosade sisaldus on 83,5 – 84,5 %, tuhasisaldus 0,2 – 0,3 % ning niiskus 3 – 15 %. [15] [16]

Puidupelletid ehk graanulid – peenest ning kuivast puidust pressitud peened pulgad või kuubid, mille tarbimisaine alumine kütteväärtus on 14 – 14,7 MJ/kg ning niiskus sõltuvalt toorainest vahemikus 10 – 25 %. [15] [16]

Puidusüsi – kõrge kütteväärtuse ning süsiniksisaldusega aine, mis saadakse puidu kuumutamisel õhu juurdepääsuta või vähese juurdepääsuga. [15] [16]

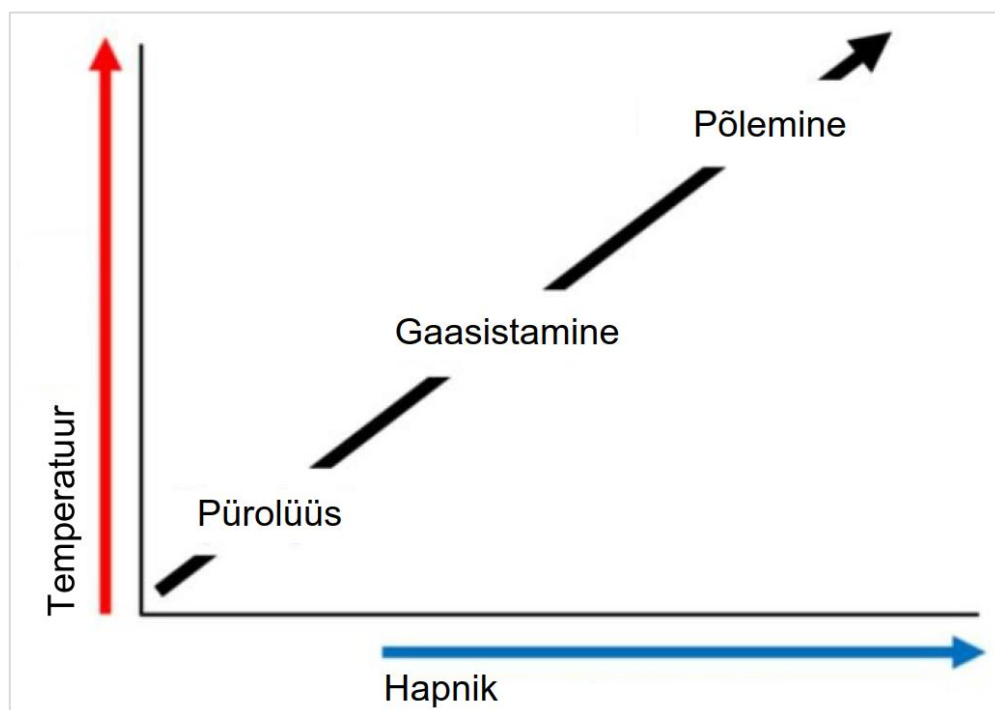
Puugaas – gaas, mis saadakse puidu termilisel lagundamisel või gaasistamisel ning mille kütteväärtus on vahemikus 4,5 – 15 MJ/m³. Generaatorgaasi peamiseks põlevosaks on CO ning vesigaasi põlevosaks on CO ja H₂. [15] [16]

Kõikide väärindatud ning väärindamata puitkütuste energeetiline kasutamine on Eestis võimalik, kuid antud lõputöös huvitab meid eelkõige puugaas, millest energia tootmist tuntakse juba üle 100 aasta, kuid mis mingil põhjusel nii Eestis kui ka mujal maailmas, vaatamata puitkütuste suurenenud tarbimisele, laiaulatuslikku kasutust ei ole leidnud. Järnevad peatükid keskenduvad spetsiifilisemalt gaasistamisele ning erinevatele gaasistamise tehnoloogiatele.

2. VÄÄRINDATUD PUIDUPÕHINE KÜTUS – PUUGAAS

Eelmisest peatükist selgus, et läbi aastate on puitkütuse tarbimine Eestis olnud kasvutrendis ning ühtlasi on see ka taastuvatest energiaallikatest kõige laiemalt kasutatav. Vaatamata metsamaa rohkusele tuleb puidupõhise biomassi puhul eelistada lahendusi, kus on võimalik ressursi maksimaalselt vääridada. [2] Puidupõhise biomassi eelis teiste biokütuste ees on madal tuhasisaldus, kloorisisaldus, lämmastikisisaldus ning väävlisisaldus lignotsellulooses materjalis. Teisisõnu on lõpuks generaatorgaasis vähem vesinikku, vesiniksulfiidi ning soolhapet. Sellega vähenevad seadme korrosioonikahjustused ning vähenevad gaasi puhastamisega seotud kulud. [20] Tuleb nentida, et vääridatud puitkütused ei ole Eesti Statistika andmebaasi alusel siiani elektrienergia tootmisel kasutust leidnud. [1]

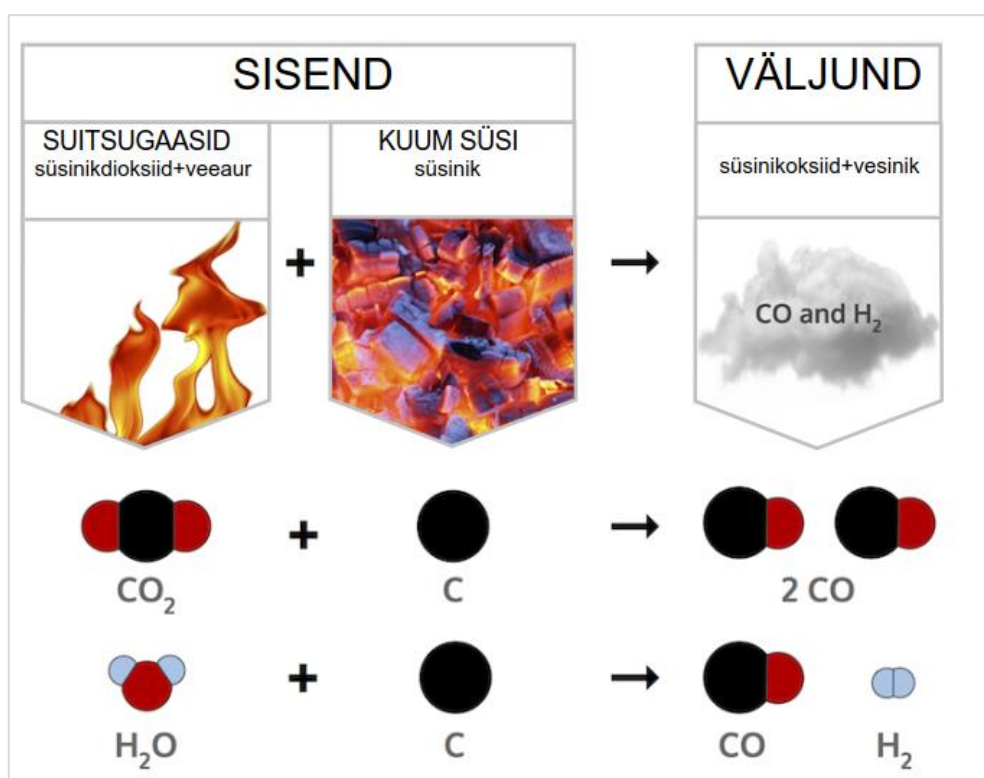
Üheks võimalikuks kütuste tootmise ning vääridamise viisiks on termokeemiline muundamine. Tehnoloogiline protsess iseenesest on lihtne – toimub aine lagundamine kõrgel temperatuuril ning selle käigus saadakse tahketest kütustest suurema kütteväärtusega tahked, vedelad või gaasilised kütused. Tulem sõltub sellest, millist protsessi kasutada. Tehnoloogias on kasutusel neli, pealtnäha sarnast, muundamisprotsessi: gaasistamine, pürolüüs, söestamine ning röstimine. [21]



Joonis 2.1 Termokeemiline muundamisprotsess sõltuvalt temperatuuril ja hapniku osakaalust. [22]

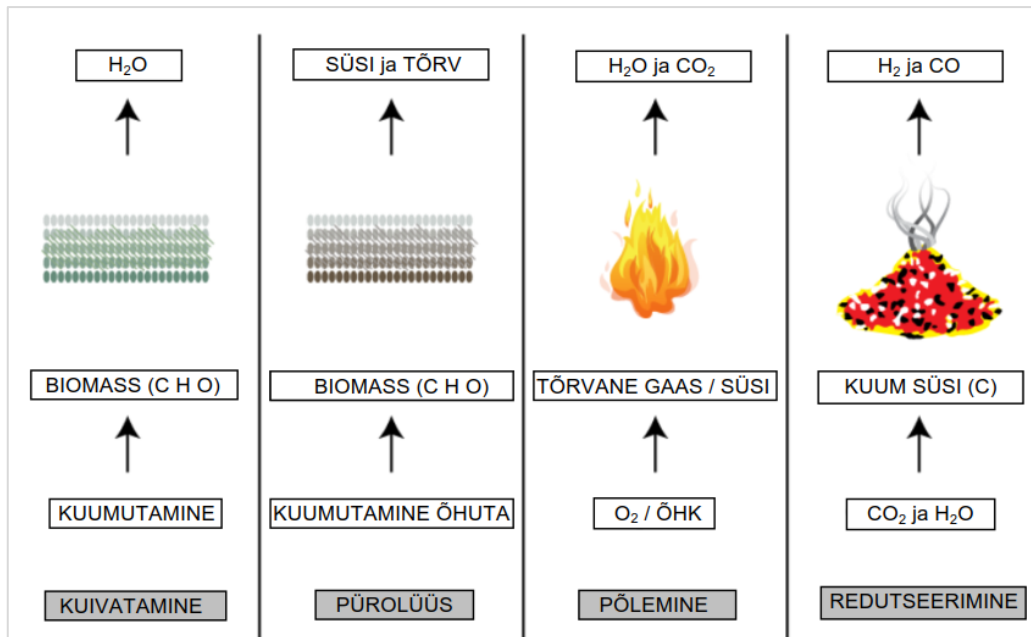
2.1 Puidu gaasistamine

Gaasistamise käigus muudetakse tahke kütus lihtsasti ja laiemalt kasutatavaks gaasiliseks energiakandjaks. Selleks, et protsess aset leiaks, peab olema loodud sobilik keskkond: kõrge temperatuur (kuni 1000 °C) ning vähem hapniku (maksimum 60%), kui oleks vaja kütuse täielikuks põletamiseks. Gaasistamise käigus muutub gaasiks peaaegu kogu kütuses sisalduv põlevaine. Gaasistamise eesmärgiks on purustada keerulisemad ühendid põletatavateks gaasideks – H₂ ja CO, mis satuvad uuesti gaaskütuse hulka (Joonis 2.2). [23]



Joonis 2.2 Keemilised reaktsioonid gaasistamisel. [24]

Gaasistamine on jagatud neljaks etapiks: kuivamine, pürolüüs, põlemine ning redutseerimine (Joonis 2.3). I etapis aurustub vesi materjalist välja. II etapis laguneb puidu struktuur keemilisteks ühenditeks (temperatuur üle 270 °C). III etapp on põlemine, kus toimub kontrollitud õhu peale andmine, mille käigus vabaneb rohkelt soojust (temperatuur kuni 1400 °C). Vabanev soojus leiab kasutust IV etapis, milleks on redutseerimine ehk taandamine. Lõpp-produktiks on puugaas, mille tüüpiline koostis on järgmine: 22% süsinikmonooksiidi (CO), 18% vesinikku (H₂), 3% metaani (CH₄), 6% süsinikdioksiidi (CO₂), 51% lämmastikku (N₂). See on keskmise kvaliteediga ning kütteväärtus jääb 10-18 MJ/m³ juurde. [23]



Joonis 2.3 Gaasistamisel toimuvad protsessid [23]

2.2 Gaasistamise eelised

Gaasistamine on oluline viis puitkütuste ning biomassi muundamiseks. Eelkõige paelub inimesi odavama kütuse (biomass, süsi, naftakoks) muundamine kõrgema energiaväärtusega gaasiks või vedelkütuseks. Võrreldes tahkete kütustega iseloomustab gaasi kasutusmugavus ning lihtne transporditavus. [25] Puugaasigeneraatorite kasutamine soojuse- ja elektrienergia koostootmiseks on viimase kümne aasta jooksul intensiivselt edasi arenenud. Valdavalt leiavad seadmed kasutust puidutöötlemisettevõtetes, kaugküttes ning teistes tööstussektorites, kus on kõrge energiatarbimine. Nimetatud rakendustel on suur turupotentsiaal kogu maailmas. [26]

2019. aasta seisuga töötab maailmas üle 1500 biomassi ning jäätmete gaasistamise tehnoloogial põhineva väikese koostootmiseseadme. [27] Suurimad puugaasil tehnoloogial koostootmiseseadmete tootjad Euroopas on Burkhardt GmbH, Holzenergie Wegscheid GmbH, Spanner Re2 GmbH, kuid esindatud on ka sellised ettevõtted nagu Urbas, Maschinenfabrik GmbH, Syncraft, Lipro, Glock Ökoenergie GmbH ja Volter. [28] Põhjanaanabrite Volter koostootmiseseadmeid on maailmas paigaldatud üle saja ning hilisemas peatükis tuleme selle seadme juurde veel tagasi.

On ka suuremaid koostootmiseseadmeid, millest leidub nii edulugusid kui ka ebaõnnestumisi. Suured gaasigeneraatorid on hulganisti kasutust leidnud gaasiliste või vedelate biokütuste tootmiseks või kütuste koospõletamise seadmetes. [29] Näiteks

asub maailma suurim puugaasiseade (140 MW) Soomes Vaasas. Seadet on võimalik käitada nii puugaasi kui kivisöe baasil. Tehnoloogiliselt on tegemist tsirkuleeriva keevkihtreaktoriga ning kasutusel on hakkepuut, millest puugaasi toodetakse. Puugaasiseadme paigaldamisel suurendati kohalike taasutavate energiaallikate osakaalu energiatarbimises, vähendati emissioonide taset (CO₂, SO₂) ning hoitakse kokku käitamiskuludelt. [30] [31] [32] [33]

Puidu gaasistamisel ning gaasigeneraatoritel on mitmeid eelised. Esiteks on gaasimootorite kasutamisel on võimalik saavutada kõrgemat kasutegurit, kui Rankine'i ringprotsessiga auruturbiinides. Teiseks kasutatakse gaasistamisjaamades tunduvalt väiksemates kogustes vett, kui tavalistes elektrijaamades (kõik null-emissiooniga jaamad kasutavad gaasistamise tehnoloogiat), eraldub tunduvalt väiksemas koguses saasteaineid, toodetakse vähem CO₂-te MWh kohta kui põlemisel põhinevates aurujõul töötavates elektrijaamades. Lisaks eelnevale on tahkete jääkainete kontsentratsioon suitsugaasides väiksem kui põletamissüsteemides. [25] Järgmine peatükk räägib põhjalikumalt erinevate gaasigeneraatorite omadustest.

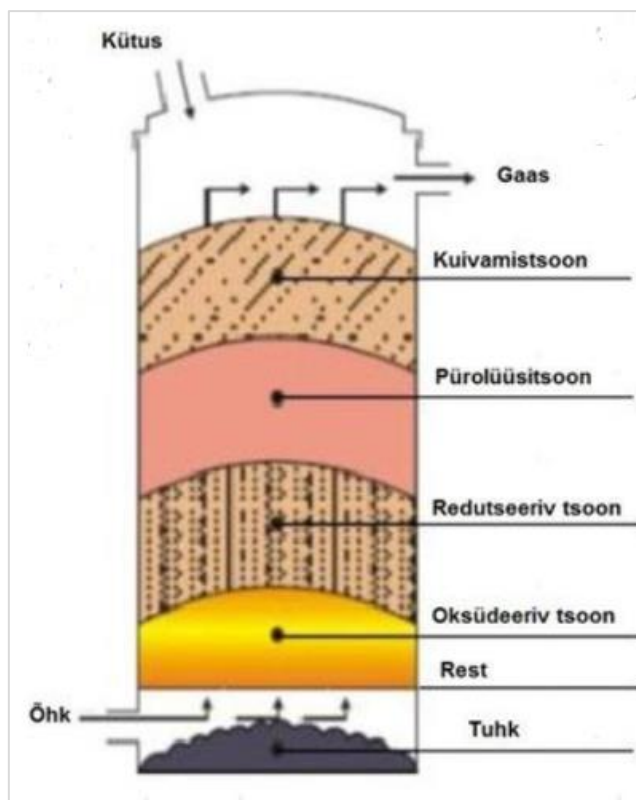
2.3 Gaasigeneraatorite tüübid

Biomassi gaasistamise tehnoloogiaid on mitmesuguseid, kuid enamus neist on mõeldud soojuse- ja elektri koostootmiseks. Tehnoloogiad erinevad üksteisest kõikvõimalike erinevate parameetrite poolest: kasutatava kütus, kütuse etteandesüsteem, töötemperatuuri, töö rõhk. Kõikide gaasigeneraatorite põhielemendiks on konteiner ehk reaktor, kus toimub kütuse muundamine gaasiks. [34] Levinud on kolm peamist tüüpi: liikumatu kihiga reaktorid, keevkihtreaktorid ning pneumotransport- ehk läbivoolureaktorid. Liikumatu kihiga reaktorid on olnud kasutuses kõige kauem ning oma ehituselt on need ka kõige lihtsamad. Väikeste süsteemide korral peetakse selliseid reaktoreid kõige kuluefektiivsemateks. Keskmiste ning suurte süsteemide korral leiavad kasutust keevkihtreaktorid, mis on lihtsamini kontrollitavad, ühtlasema temperatuuriga ning väiksema tundlikkusega kütuse karakteristika suhtes. Suurte süsteemide korral leiab kasutust ka pneumotransport- ehk läbivoolureaktor. Selle eeliseks on generaatorgaasi väike tõrvasisaldus, kuid miinusteks keeruline konstruktsioon, kõrged investeerimiskulud ning keeruline ekspluatatsioon. [35]

2.3.1 Liikumatu kihiga vastuoolu ehk ülesvoolu gaasigeneraator

Vastuoolu reaktoris toimub kütuse etteanne ülevalt ning õhu etteanne alt ehk nimetatud elemendid liiguvad üksteise suhtes vastassuunas. Ehituselt on reaktor üks lihtsamaid, kuid selgitamiseks selle olemust on reaktor jagatud erinevateks tsoonideks, mida biokütus peab läbima (Joonis 2.4). Esimeses tsoonis toimub reaktoris antava kütuse kuivatamine ning järgmises tsoonis ehk pürolüüsitsoonis lendosade eraldamine ja tekib koks. Redutseerimistsoonis toimuvad reaktsioonid tahke ja gaasi faaside vahel ning koksi reageerimisel gaasidega tekib CO ja H₂. Põlemistsoonis toimub koksi põlemine, mille tulemusena saadakse soojust gaasistamisprotsessi läbiviimiseks. Tekkivad gaasid väljuvad reaktori ülaosast, seega osa saadava generaatorgaasi soojusest kasutatakse ära etteantud kütuse kuivatamiseks ning soojendamiseks, mis tagab protsessi kõrge efektiivsuse ning kasuteguri. [35] [26]

Liikumatu kihiga vastuoolu gaasigeneraator annab võimaluse vähenõudliku biomassi kasutamiseks – lubatud niiskusesisaldus kuni 60% ning osakeste suurus vahemikus 5 – 100 mm. Vaatamata seadme lihtsusele, efektiivsusele ning madalale gaasi väljumistemperatuurile (200 – 400 °C) leiab seade kasutamist vähe, kuna generaatorgaasis tekib suurel hulgal tõrvaühendeid, tahma ja tuhka. [35] Tõrva sisaldus generaatorgaasis võib ulatuda 30 – 150 g/nm³. [25] See on tingitud sellest, et pürolüüsitsoonis tekkivad tõrvaühendid suunatakse gaasivooluga ülemisse jahedamasse tsooni ning need ei läbi põlemistsooni, mistõttu ei ole võimalik ühendeid gaasistada. [35] Saadud gaasi on võimalik kasutada otse gaasipõletis. Mootorites kasutamiseks tuleb seda eelnevalt puhastada ning jahutada. [35] Vastuoolureaktorite võimsus jääb vahemikku 1 – 10 MW. [25]

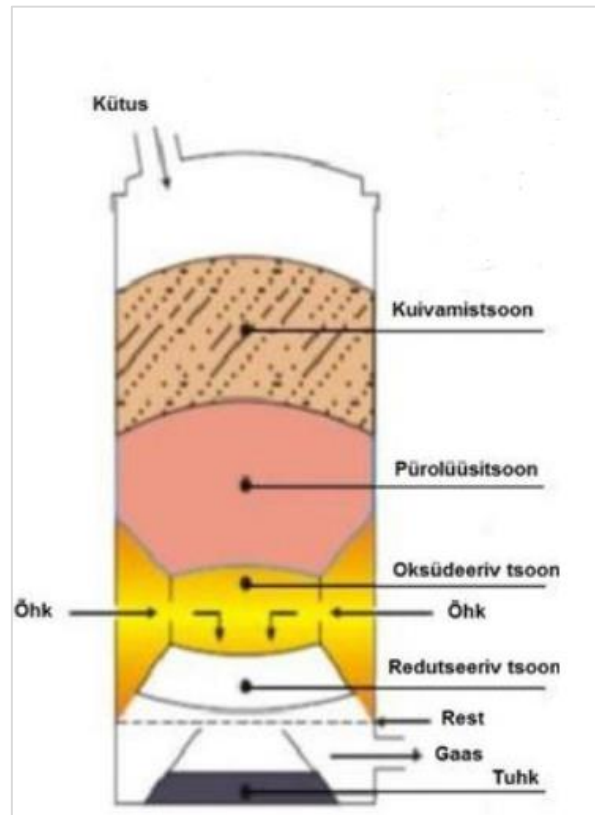


Joonis 2.4 Ülesvoolu gaasigeneraator [36]

2.3.2 Liikumatu kihiga pikivoolu ehk allavoolu gaasigeneraator

Liikumatu kihiga pikivoolu reaktoris toimub kütuse etteanne ülevalt, kuid õhu lisamine protsessi toimub kas reaktori ülaosast või külgedelt. Ehituselt on see analoogne liikumatu kihiga vastuvoolu gaasigeneraatoriga, erinedes mõnevõrra vaid tsoonide asukoha poolest (Joonis 2.5). Kuna pürolüüsitsoonis tekkivad gaasid läbivad koksi põlemistsooni, siis antud meetod tagab heade omadustega generaatorgaasi, mis sisaldab vähe tõrva. [35] [26] Soojusülekanne erinevate tsoonide vahel on aga väga madal, mistõttu tuleb seadmes kasutada kütust, mille niiskusesisaldus on alla 30%. Rangemad nõuded on seatud ka kütuste osakeste mõõtmetele, et vältida ummistumist ning osakeste allapoole liikumist. Osakesed peavad olema ühtlase suurusega, vahemikus 40 – 100 mm. Seadmed sobivad väikestele süsteemidele, elektrilise võimsusega 10 kW – 1 MW. [35] Vaatamata praktiliselt puhtale generaatorgaasile võib puudusteks pidada väikest efektiivsust ning tundlikust kütuste omaduste suhtes. [15] Väljuva gaasi temperatuur on tunduvalt kõrgem, kui ülesvoolu reaktoris, jäädes 700 – 750 °C vahele, mistõttu on gaasistamise kasutegur madalam. Toodetud gaasi on võimalik peale jahutamist ning puhastamist kasutada sisepõlemismootorites. [35] Tõrva

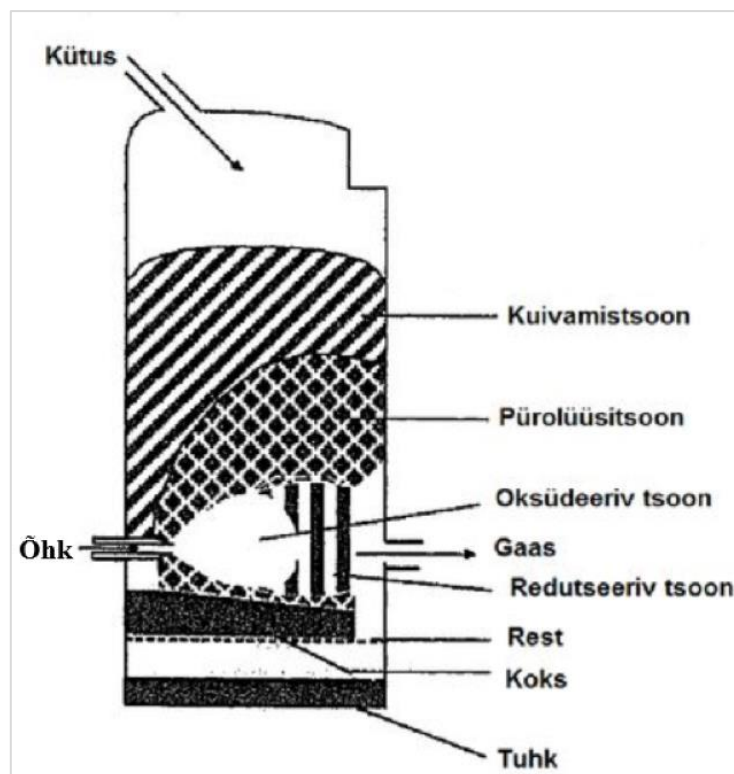
sisaldus generaatorgaasis on hinnanguliselt 0,015 – 3 g/nm³. Pärioolureaktorite võimsus jääb vahemikku 0,1 – 1 MW. [25] Järgmistes peatükkides vaadeldavas GFE45 koostootmisseadmes on kasutusel liikuva kihiga allavoolu gaasigeneraator.



Joonis 2.5 Allavoolu gaasigeneraator [36]

2.3.3 Liikumatu kihiga ristivoolu gaasigeneraator

Liikumatu kihiga reaktoritest leiab kõige vähem kasutust ristivoolu gaasigeneraator. Antud generaatori tüüp arendati koksi gaasistamiseks, mistõttu see sobib ideaalselt puidu ning ka muude madala tuhasisaldusega kütuste gaasistamiseks. Protsessis on tagatud tõrvasisalduse vähesus ning eraldada tuleb ainult gaasivooluses olevad tahked osakesed. Tõrva sisaldus generaatorgaasis on hinnanguliselt 0,001 – 0,1 g/nm. Kuna oksüdeerimistsoonis ulatuvad temperatuurid kuni 1500 °C, siis võib puudusena välja tuua ka suhteliselt kõrge väljuvate gaaside temperatuuri ning probleemide tekkimise sobiva gaasisti materjali valimisel. Tehnoloogia on levinud pigem kivisöe gaasistamiseks ning sobib kasutamiseks väikestes energiasüsteemides. [26] [25]



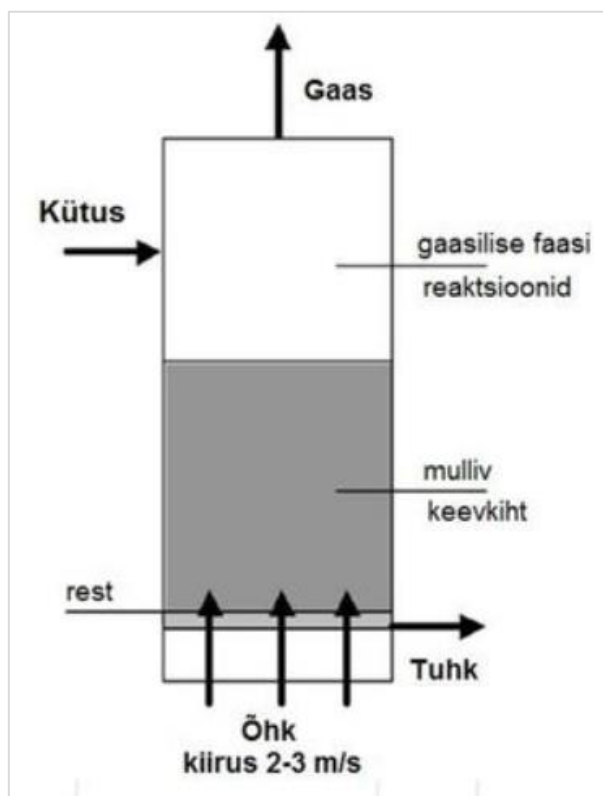
Joonis 2.6 Ristivoolu gaasigeneraator [37]

2.3.4 Mulliv keevkihtreaktor

Keevkiht on keemiliselt inertsete tahkeosakeste hõljum gaasivooluses. Mulliva keevkihi tekkimiseks peab ühelt poolt olema tagatud keevkihi minimaalne tekkekiirus ning teiselt poolt ei tohi see üle minna turbulentseks režiimiks. Keevkihtreaktoris puuduvad reaktsioonitsoonid nagu eelnevalt vaadeldud reaktoritel, vaid see jaguneb kaheks tsooniks – kiht ning kihipealne tsoon (Joonis 2.7). Reaktori üheks olulisemaks komponendiks on kolderest, mille kaudu siseneb kihti läbiv primaarõhk. Kolderesti eesmärgiks on ka õhu jaotumise reguleerimine kolde ristlõikes. [38] Mulliv keevkiht paikneb reaktori alaosas ning kihimaterjal ega ka kihis olevad kütuseosakesed reaktorist ei välju [26] Keevkiht tekitatakse reaktorisse suunatava kütusega, õhuga ning inertse materjaliga, milleks on peamiselt kvartslüü, kuna esiteks on see odav ning teiseks suure soojusmahtuvusega. Mulliva keevkihiga reaktoris on reaktorisse suunatava gaasivoolu kiirus väiksem kui tsirkuleeriva keevkihiga reaktoris, jäädes alla 5 m/s. [35]

Tänu keevkihi materjali suurele soojusmahtuvusele ning intensiivsele soojusülekandele biomassi ning gaasistatava aine vahel saavutatakse seadmes ühtlane gaasistamise temperatuur 800 – 1000 °C. [35]

Keevkihttehnoloogia madala temperatuuri tõttu väheneb kahjulike atmosfääriheitmete hulk ning samas koldes saab kasutada lisaks biokütustele erinevaid madala kvaliteediga kütuseid. Madala temperatuuri tõttu pole karta ka tuha sulamist ning kolde šlakkumist. [17] Mulliv keevkihtreaktor sobib kasutamiseks keskmise suurusega energiasüsteemides. Seade võimaldab edukalt kasutada erineva koostisega kütuseid, protsessis on madal tõrva tootmine, gaasi kvaliteet on ühtlane ning seadme kasutegur on kõrge. [35] Madala temperatuuri tõttu on lämmastikoksiidide emissioon seotud peamiselt kütuse lämmastiku oksiidideks konverteerumisega. [38] Seadmete võimsused on 1 – 100 MW. [25]

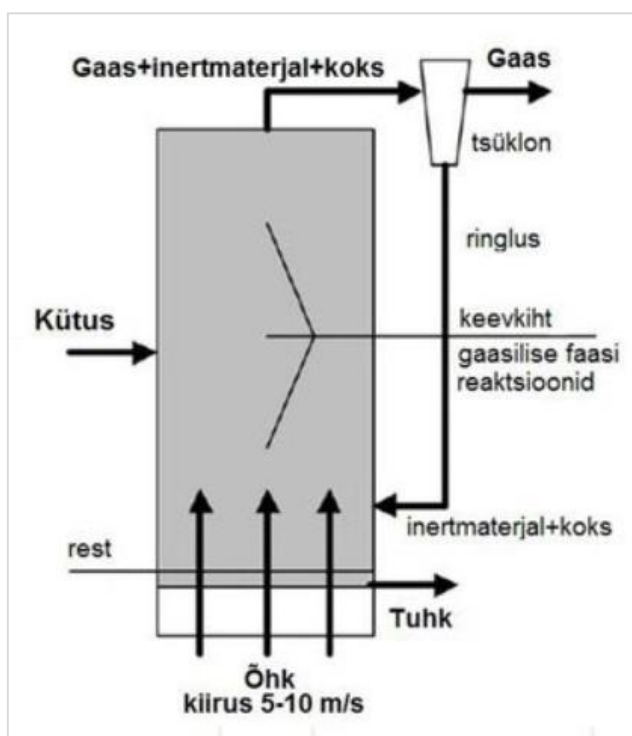


Joonis 2.7 Mulliv keevkihtreaktor [39]

2.3.5 Tsirkuleeriv keevkihtreaktor

Tsirkuleerivas keevkihtreaktoris on üks suur tsoon, mis hõlmab koht kogu reaktorit. Oluliseks komponendiks on ka tsüklon, kuna osa kihimaterjalist ning kütuseosakestest kantakse suure pindkiiruse tõttu gaasivoolusega reaktorist välja, mis küll püütakse kinni tsüklonis ning suunatakse tagasi reaktorisse (Joonis 2.8). [26] Tsirkuleeriva keevkihiga reaktoris on reaktorisse suunatava gaasivoolu kiirus kolm kuni viis korda suurem kui mulliva keevkihiga reaktoris. [35] Põlevad kütuseosakesed viiakse seetõttu

õhuvoolusega kaasa ning tsüklon-separaatoris toimub tahkete osakeste eraldamine õhu-gaasi voolusest, kus see suunatakse omakorda tagasi koldesse. [17] Protsessis on tagatud biomassi ning keevkihi intensiivsem segunemine lühema koldes viibimise juures. Tänu sellele on seadmel kõrgem kasutegur, kui mullival keevkihil. Samuti tekib seetõttu vähem tõrva. Antud seade sobib kasutamiseks suuremahulistes süsteemides, kuna ehitamine on keeruline, nõuab suuri investeeringud ning käitamiskulusi. Seade võimaldab edukalt kasutada erineva koostisega kütuseid, protsessis on madal tõrva tootmine, gaasi kvaliteet on ühtlane ning seadme kasutegur on kõrge. [35] Madala temperatuuri tõttu ei ole termiliste lämmastikoksiidide moodustumise tõenäosus suur. [38] Seadmete võimsused on 1 – 100 MW. [25]

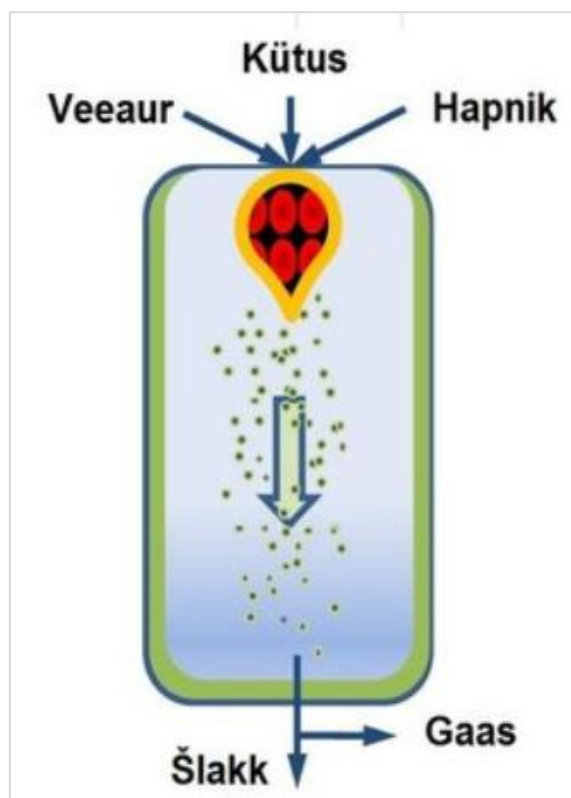


Joonis 2.8 Tsirkuleeriv keevkihtreaktor [39]

2.3.6 Pneumotransport- ehk läbivoolureaktor

Läbivoolureaktori tehnoloogia erineb oluliselt eelnevalt vaadeldud tehnoloogiatest. [26] Reaktori ülaossa suunatakse peenestatud biomass (75 – 100 μm) koos hapnikuga ning veeauruga, kus toimub gaasistamine väga kõrgel rõhul (kuni 100 bar) ning temperatuurivahemikul 1400 – 1800 °C. Kiire gaasistamise protsessi tõttu on reaktorist väljuv generaatorigaas väga väikese tõrva- ja metaanisaldusega. [35] [26] Esialgu oli see tehnoloogia mõeldud pigem kivisöe gaasistamiseks, kuid tänapäeval kasutavad

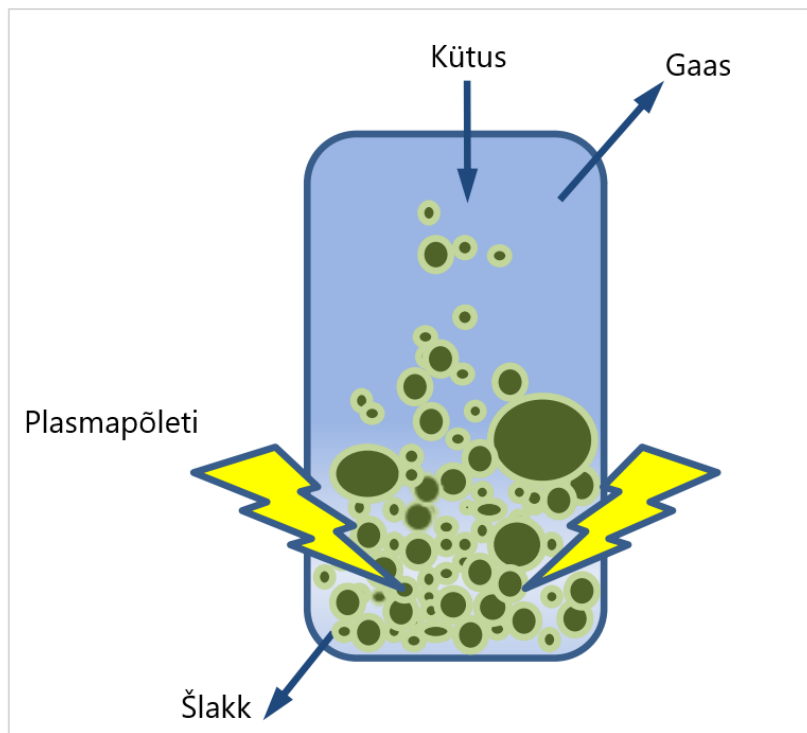
mõned ettevõtted seda tehnoloogiat ka biomassi gaasistamiseks. Meetodi peamiseks eeliseks on generaatorigaasi väikene tõrvasisaldus, kuid puuduseks võib pidada kasutatava kütuse osakeste piiratud suurust ning investeerimis- ja tegevuskulu, mis on tingitud eelkõige kütuse ettevalmistamisest (kuivatamine, peenestamine). Seadmete võimsused on 50 – 1000 MW. [25] [35]



Joonis 2.9 Läbivoolureaktor [34]

2.3.7 Plasmareaktor

Plasmareaktoris kasutatakse kütusena töötlemata biokütust või jäätmeid, mis suunatakse reaktorisse ülevalt, sattudes kontakti elektriliselt genereeritud plasmaga. Protsess toimub peamiselt atmosfäärirõhul ning kõrgetel temperatuuridel 1500 – 5000 °C, mida on lihtne kütuse etteandmisega ning plasmapõleti reguleerimisega kontrollida. Orgaanilisest osast saab väga kõrge kvaliteediga gaas ning anorgaaniline aine klaasistatakse inertseks šlakiks, mis väljub reaktori alumisest osast. Toodetud gaas lahku reaktorist väga kõrgel temperatuuril 1000 – 1200 °C. Reaktor leiab enim reakendust jäätmete gaasistamisel. [34] [25]



Joonis 2.10 Plasmareaktor [34]

3. GFE45 KOOSTOOTMISSEADE NING TARBIIJA

GFE45 koostootmiseseade on Volter OY poolt toodetud seade, mida mujal maailmas tuntakse kui Volter 40. Mikrokoostootmiseseade on koostootmiseseade, mille elektriline väljundvõimsus $P_e < 50\text{kW}$ ning koostoomise käigus toodetakse ühe seadmega nii soojust kui ka elektrit. [40] Koostootmine on termodünaamiliselt parim viis kütuste kasutamise efektiivsuse suurendamiseks: väheneb kütusekogus, väheneb emissioon toodetud energiaühiku kohta, mõlemat energialiiki saab toota nende eraldi tootmisest madalama hinnaga, kasutatavad seadmed on eksploatatsioonis pindlikud ja talituluskindlad. Lisaks on kütuse kasutamise kogukasutegur tavaliselt 85 – 92%, mis on võrreldav tänapäevase lokaalkatlamaja katla kasuteguriga soojuse tootmisel. [41]



Joonis 3.1 Paigaldatud GFE45 koostootmiseseade Scanweld AS tootmisbaasis. Pildi autor: Henry Rebane

3.1 Seadme tehniline kirjeldus

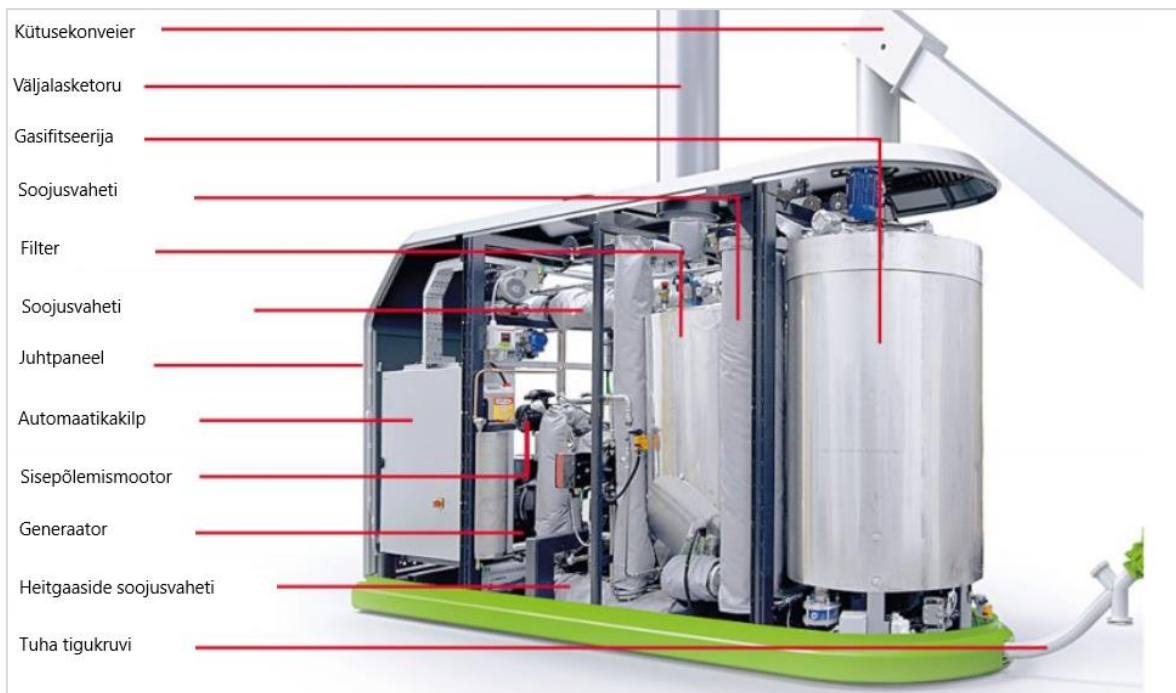
GFE45 koostootmiseseade tarnitakse kliendile kasutusvalmina ning see tuleb vaid ühendada elektritoitega, soojusvarustusega ning kütusemahutiga. Ehituselt on seade kompaktne – mõõtmed on 4,82 x 1,27 x 2,5 m ning ühte korpusesse on paigaldatud kõik olulised komponendid (Joonis 3.2).

Gaasisti protsessi efektiivsuse tõstmiseks kasutatakse pürolüüsi kambri eelkuumutamist seadme enda poolt toodetava kuuma õhuga. Seadmel on automaatselt pöörlev põleti rest. Toodetava puugaasi kütteväärtus on 5,7 MJ/Nm³ ning ligikaudne koostis: 25% süsinikmonoksiidi (CO), 17% vesinikku (H₂), 2,5% metaani (CH₄), 8% süsinikdioksiidi (CO₂), 47,5% lämmastikku (N₂). Seadme täiskoormusel on ideaalne gaasisti ülemine temperatuur 20 – 150 °C ning lõõri temperatuur 950 – 1100 °C. [Seadme hooldusraamat, mitteavalik]

Seadmel on Agco SISU Heavy Duty ülelaadimiseta 8,4 lliitrine ning 6 silindriline turbokiirendita gaasimootor, koos kaasaegse mootori juhtimistehnoloogiaga: otsesüüde, lairiba lambda ja kaugjuhtimine. Puugaasi temperatuur enne mootorit täiskoormusel ning ideaaltingimustel on vahemikus 20 – 60 °C ning gaasirõhk 3000 – 6000 Pa. [Seadme hooldusraamat, mitteavalik]

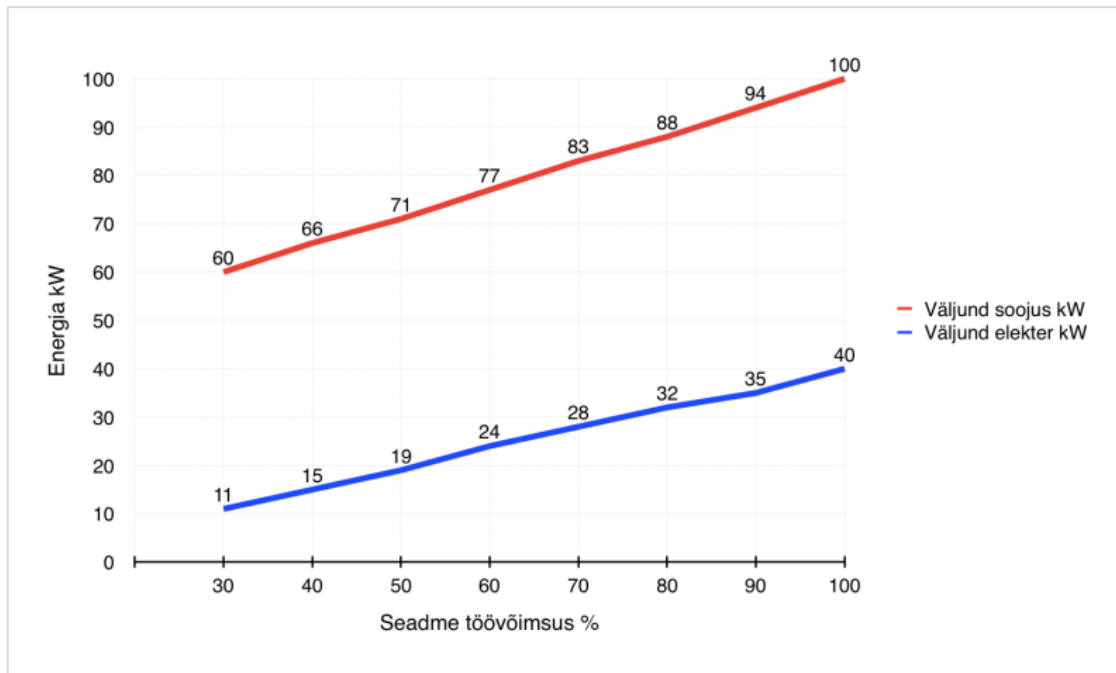
Gaasi jahutamine ning puhastamine toimub läbi automaatselt puhastuva gaasijahuti ja kuivfiltrit. Turvalisuse mõttes on seadmel ka olemas varufilter. Koostootmisseadme täiskoormusel ning ideaaltingimustel on enne peamist soojusvahetit gaasi temperatuur 450 – 640 °C ning peale peamist soojusvahetit ning enne filtrit 150 – 200 °C. Rõhu erinevus filtris on 200 – 2000 Pa. [Seadme hooldusraamat, mitteavalik]

Roostevaba töökeskkonna tõttu puudub korrosioon ning minimiseeritud on gaasi lekke risk, kuna koostootmisjaama osades ei tekitata ülerõhku. Seadme lubatud eluiga on minimaalselt 20 aastat. Suureks plussiks on ka seadme automatiseeritus – puutetundlik juhtpaneel koos kaugjuhtimise võimalusega, kaasaegsed tööstusautomaatika seadmed ning elektroonika komponendid, kaasaegsed võrguvälise tootmist võimaldavad lahendused ning seadme näitajate automaatse andmelogimise võimalus. [Seadme hooldusraamat, mitteavalik]



Joonis 3.2 GFE45 koostootmiseseade [42]

GFE45 koostootmiseseadme elektriline võimsus on 40 kW ning soojusvõimsus 100 kW soe vesi ja 20 kW soe õhk ($10\,000\text{m}^3/\text{h}$, $40\text{-}50\text{ }^\circ\text{C}$). Seadmel endal on madal elektritarbimine, milleks on ligikaudu 1,5-2 kW. Plussiks on seadme väljundvõimsuse reguleerimine vahemikus 30-100% täisvõimsusest. See võimaldab seadet töös hoida ka suvel, kui soojuskoormus on märgatavalt väiksem. [Seadme hooldusraamat, mitteavalik]



Joonis 3.3 GFE45 tööparameetrid [Seadme hooldusraamat, mitteavalik]

3.2 Kütuse spetsifikatsioon

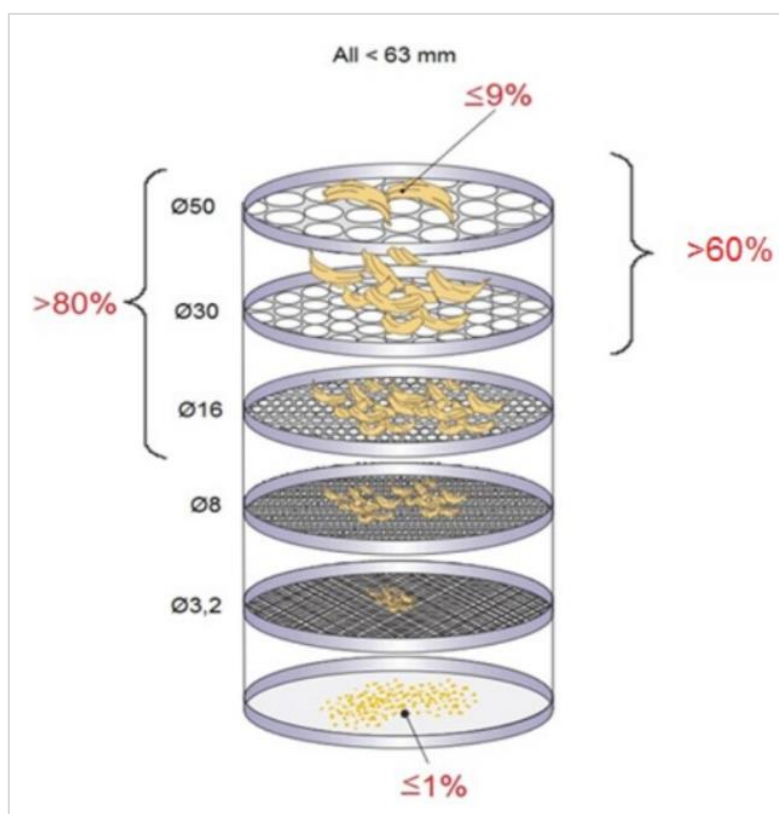
Kütusena on kasutusel hakkepuuit, mida kulub seadmes täiskoormusega töötamisel 4,5 m³/päevas ehk 37,5 kg/h. Kütuse etteandmine toimub pöördsiibriga, mis on oma olemuselt lihtne ja töökindel. Tuhka tekib 500 liitrit nädalas. Täisvõimsusel töötades moodustab see ligikaudu 1-2% kogu hakke mahust. [Seadme hooldusraamat, mitteavalik]

Kütuse kvaliteet on kriitilise tähtsusega. Näiteks on see otseselt seotud seadme hooldusvälbaga ning seadmest välja antava energia hulgaga. Puit peab olema looduslik ning seda võib töödelda ainult tükeldamise, kooretustamise, kuivatamise või niisutamise eesmärgil, see peab olema puhas ning ei tohi sisaldada mittepuidust päritolu lisandeid (muld, liiv, kivid). Väga rangelt on määratud ka hakkepuuidu kvaliteet. Näiteks peab osakeste kuju olema nelinurkne, mitte pulkjas. Varasemad kogemused antud seadmega lubavad parimaid tulemusi kase, männi, kuuse, lepa või haavapuiduga.

Tabel 4.1 Kütuse keemilised ja füüsilised omadused [Seadme hooldusraamat, mitteavalik]

Kütuse keemilised ja füüsilised omadused	
Niiskus (% massist), max	≤ 18%
Niiskus (% massist), soovituslik	≤ 15%
Neto energiaväärtus, Q	18,7 MJ/kg (≥5,2 kWh/kg)
Lämmastikku, N (% kuivast massist)	A1,0 (≤ 1%)
Lämmastikku, N (% kuivast massist)	N0,5 (≤ 0,05%)
Väävlit, S (% kuivast massist)	S0,04 (≤ 0,04%)
Kloori, Cl (% kuivast massist)	Cl0,02 (≤ 0,02%)
Kaaliumit, K (% kuivast massist)	K0,07 (≤ 0,07%)

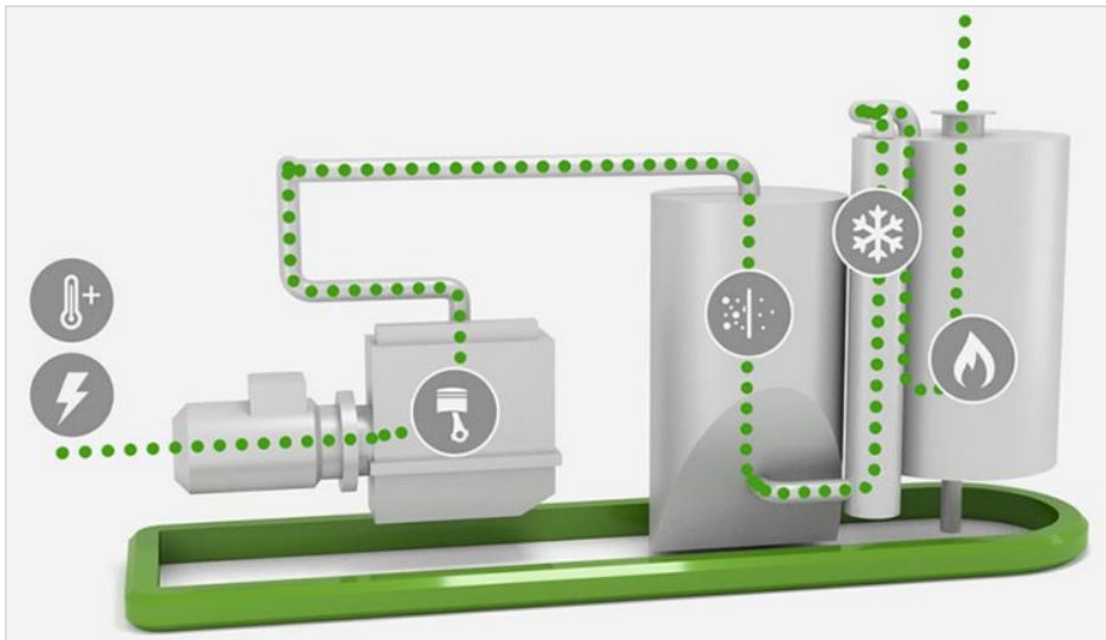
Hakkepuidu osakeste osakaal on määratud järgmiselt: >80% 16-50mm, >60% 30-50mm, ≤9% 50-63mm (kõik alla 63mm) ning <1% 3,2mm



Joonis 3.4 Nõuded laastu mõõtmetele [43]

3.3 Tööprotsessi kirjeldus

Koostootmisseadmes kasutatakse soojust ja elektri tootmiseks hakkepuitu, mis juhitakse gaasistisse, kus madala hapnikusisalduse ning kõrge temperatuuri (950 – 1000 °C) juures toodetakse puhast puugaasi. Tekkinud gaas suunatakse soojusvahetisse, kus see jahutatakse 200 °C-ni ning suunatakse edasi filtrisse, et eemaldada gaasist kõik tahked osakesed. Peale filtrit on järgmine soojusvaheti, mis jahutab gaasi 60 °C-ni. Jahutatud ning puhastatud gaas segatakse õhuga ning viimase etapina suunatakse sise põlemismootorisse, mis on ühendatud elektrigeneraatoriga (Joonis 4.2). [44] Soojust saadakse aga gaasi, mootori ja heitgaaside jahutamisest. Koostootmisseadmel on suletud jahutusüsteem ning toodetud soojust saab peasojusvaheti kaudu kasutada kohapeal. Kui kohapeal soojust ei tarbita, siis võib soojust hajutamiseks kasutada heitsoojuse puhurit.



Joonis 3.5 Seadme tööprotsess [44]

3.4 Tarbija kirjeldus

Tarbijaks on Scanweld AS tootmisbaas, mis asub Tallinnast 25 kilomeetrit idas Jõelähtme vallas ning katusealust tootmispinda on tehases ligikaudu 3000 m². Kogu tehase elektri- ja soojusenergiaga varustamiseks oli plaanis kasutusele võtta üks kuni kaks GFE45 koostootmisseadet ning rekonstrueerida ka tehase soojasüsteem. Seade võimaldab varustada senise ühe tootmishalli asemel kõik tootmishallid soojusenergiaga ning lisandub veel 40 kW elektrienergiat, mida on võimalik kasutada võrku tagasi müüa

või kasutada osaliselt või täielikult omatarbeks. Kaasneva plussina saab soojust, peale kütmise, kasutada ka sooja tarbeveena. Koostootmisseadme paigaldamiseks ning soojussõlme tarvis rajati katlamaja, mille üheks osaks on maa sisse süvendatud eelkuivatussüsteemiga hakkehoidla.

3.4.1 Tänane energiatarbimine

Tänase tarbimise aluseks on võetud eelnevate aastate kommunaalarved ning tehtud sellest kokkuvõtte. Varasemalt on soojusenergia tootmiseks kasutatud amortiseerunud puitpelleti ning diisli katelt. Elektrienergia tarbitakse võrgust. Aastas toodeti soojust 13,44 tonnist puitpelletitest, mille maksumus oli 2101,35 €. Lisaks osteti diiselkütust ligikaudu 500 liitrit 530 € eest. Diisli maksumus on jagatud 5 kuu peale võrdselt.

Tabel 3.2 Tootmisbaasi aastane energiatarbimine

Kuu	Puitgraanulid		Diiselkütus		Soojusenergia tarbimine (kWh)	Soojusenergia lõpphind (€)
	Ost, (t)	Maksumus (€)	Ost, (l)	Maksumus (€)		
Jaanuar	5,76	942,15	100	106	9 348	394,5
Veebruar	-	-	100	106	7 623	321,7
Märts	-	-	100	106	6 391	269,7
Aprill	-	-	-	-	4 189	176,8
Mai	1,92	297,35	-	-	4 107	173,3
Juuni	-	-	-	-	-	-
Juuli	-	-	-	-	-	-
August	-	-	-	-	-	-
September	-	-	-	-	4 107	173,3
Oktoober	5,76	861,85	100	106	6 637	280,1
November	-	-	100	106	8 855	373,7
Detsember	-	-	-	-	11 089	468,0
Kokku	13,44	2 101	500	530	62 346	2 631,4

See teeb soojusenergia kWh maksumuseks olemasoleva süsteemiga 0,042 €/kWh.

Arvutuste koostamisel on arvestatud järgmiste parameetritega: puitpelleti kütteväärtus 4,6 kWh/kg ning katla kasutegur 0,93. Diisli kütteväärtus on 9,7 kWh/l.

Tabel 3.3 Elektrienergia tarbimine

Kuu	Elektrienergia tarbimine	
	Elektrienergia tarbimine (kWh)	Elektrienergia lõpphind (€)
Jaanuar	21 671,0	2 072,64

Veebruar	19 798,0	1 887,50
Märts	34 674,0	3 209,34
Aprill	25 604,0	2 398,16
Mai	28 012,0	2 589,94
Juuni	22 253,0	2 063,97
Juuli	12 203,0	1 199,07
August	11 264,0	1 108,84
September	10 140,0	1 026,41
Oktoober	11 970,0	1 215,25
November	10 909,0	1 079,90
Detsember	25 701,0	2 363,71
Kokku	234 199,0	22 214,73

See teeb elektrienergia kWh maksumuseks olemasoleva süsteemiga 0,095 €/kWh.

3.4.2 Prognoositav energiatarbimine

Koostatud prognoos põhineb eesmärgil varustada kõik neli tootmishalli soojusenergiaga. Elektrienergia ei muutu. Seni kasutati olemasolevat katlamaja ainult ühe soojustatud tootmishalli soojusenergiaga varustamiseks (soojuskadu läbi 100mm kivivilla, välistemperatuuril 4,9 °C ja sisetemperatuuril 10 °C, on ligikaudu 16 kW). Kuna olemasolevatest tootmishallidest on see ainukesena soojustatud, siis ülejäänud kolme tootmishalli soojuskadud on tunduvalt suuremad ning sellest võib eeldada, et talvekuudel tarbitakse GFE45 koostootmisest toodetud soojusenergia ära täies mahus.

Tabel 3.4 Prognoositav energiatarbimine

Kuu	Keskmine temp. (°C)	Soojusenergia prognoositav tarbimine (kWh)	Soojusenergia lõpphind pelletiga tootmisel (€)	GFE45st tarbitud soojus (%)
Jaanuar	-4,9	73 850	3 116,9	100
Veebruar	-5,2	66 800	2 819,3	100
Märts	-1,5	56 738	2 394,6	85
Aprill	3,4	42 960	1 813,1	60
Mai	9,6	13 290	560,9	20
Juuni	14,5	5 676	239,6	8
Juuli	16,6	5 216	220,1	8
August	15,6	5 340	225,4	8
September	10,7	12 888	543,9	18
Oktoober	6,0	26 580	1 121,8	40

November	1,1	56 840	2 399,0	80
Detsember	-2,5	73 150	3 087,3	100
Kokku		439 327,5	18 542,0	

4. GFE45 KOOSTOOTMISSEADME KASUTAMISE OTSTARBEKUSE HINNANG

4.1 Ühe aasta energia tootmise ning käitamiskulu prognoos kulukomponentide lõikes

Leiame kui suures mahus on võimalik ühe aasta jooksul ühe GFE45 koostootmiseseadmega toota elektri- ja soojusenergiat täiskoormusel töötades ning millised ja kui suured on käitamisega seotud kulud.

4.1.1 Toodetav elektri- ja soojusenergia

Seadmega on garanteeritud 100 kW soojusenergiat ning 40 kW elektrienergiat 24 tundi ööpäevas, 28 – 31 päeva kuus. Eelnevatele andmetele tuginedes on tabelis 4.3 arvatud ühes kuus toodetud soojusenergia maht. Sellest on maha arvestatud seadme hooldusaeg, vastavalt tabelile 4.6, millal energiat ei toodeta.

Tabel 4.3 Toodetav elektri- ja soojusenergia

Kuu	Toodetav elektrienergia (kWh)	Toodetav soojusenergia (kWh)
Jaanuar	29 540,0	73 850,0
Veebruar	26 720,0	66 800,0
Märts	26 700,0	66 750,0
Aprill	28 640,0	71 600,0
Mai	26 580,0	66 450,0
Juuni	28 380,0	70 950,0
Juuli	26 080,0	65 200,0
August	26 700,0	66 750,0
September	28 640,0	71 600,0
Oktoober	26 580,0	66 450,0
November	28 420,0	71 050,0
Detsember	29 260,0	73 150,0
Kokku	332 240,0	830 600,0

4.1.2 Hakkepuidu kulu

Üks koostootmisseade tarbib 4,5 m³ hakkepuitu ööpäevas. Ostetava hakkepuidu tegelik kulu on arvestatud 12% suurem, kuna kuivades kaotab hakkepuit mahtu. Sellest tulenevalt on hakkepuidu kulu korrutatud läbi 1,12-ga. Samuti ei tarbi seade hakkepuitu hoolduse ajal (Tabel 4.6). Hakkepuidu maksumuse leidmiseks on küsitud hinnapakkumised vähemalt kolmelt hakkepuidu tootmise ning müügiga tegelevalt ettevõttelt.

Tabel 4.4 Hakkepuidu kulu

Kuu	Hakkepuidu kulu (m ³)	Hakkepuidu maksumus (€/m ³)	Hakkepuidu kogukulu (€)
Jaanuar	155,5	9,9	1 539,5
Veebruar	140,7	9,9	1 392,9
Märts	140,6	9,9	1 391,9
Aprill	150,8	9,9	1 492,7
Mai	140,0	9,9	1 385,7
Juuni	149,8	9,9	1 483,4
Juuli	137,3	9,9	1 359,7
August	140,6	9,9	1 391,9
September	150,8	9,9	1 492,7
Oktoober	140,0	9,9	1 385,7
November	149,6	9,9	1 481,3
Detsember	154,5	9,9	1 529,1
Kokku	1 750,1		17 326,4

4.1.3 Otseliini tulud ja kulud

Otseliin on võrguettevõtja teeninduspiirkonnas asuv liin, millele puudub eraldi võrguühendus võrguga, välja arvatud suletud jaotusvõrguga, kuid mis võib olla võrguga kaudses ühenduses turuosalise elektripaigaldise kaudu ning mis on ette nähtud elektrienergia edastamiseks ühest elektrijaamast teise või teisele turuosalisele kas oma tarbeks kasutamiseks, edasimüügiks või edastamiseks. Elektri tarbimisel ning edastamisel läbi otseliini ei pea tasuma võrguettevõtjale võrgutasusid, kuid iga tarbitud elektrienergia kWh eest makstakse võrguettevõtjale 0,00447 € elektriaktsiisi ning 0,0096 € taastuenergia tasu. Tootjale makstakse iga toodetud elektrienergia kWh eest 0,0537 € taastuenergia toetust. [45] [46]

Otseliini tulude ning kulude leidmiseks on lähtutud toodetud elektrienergia kogustest (Tabel 4.3). Otseliini tulu võrdub toodetud elektrienergia kogus (kWh) korda

taastuenergia tasu. Otseliini kulu võrdub aga toodetud elektrienergia kogus (kWh) korda elektriaktsiisi ja taastuenergia maksumuse summa.

Tabel 4.5 Otseliini tulud ja kulud

Kuu	Otseliini tulu (€)	Otseliini kulu (€)
Jaanuar	1586,298	415,6278
Veebruar	1434,864	375,9504
Märts	1433,79	375,669
Aprill	1537,968	402,9648
Mai	1427,346	373,9806
Juuni	1524,006	399,3066
Juuli	1400,496	366,9456
August	1433,79	375,669
September	1537,968	402,9648
Oktoober	1427,346	373,9806
November	1526,154	399,8694
Detsember	1571,262	411,6882
Kokku	17 841,3	4 674,6

4.1.4 Seadmega seotud hoolduskulud

Töökindluse ja häireteta töö tagamiseks tuleb hooldustööd teostada kehtestatud ajal ning vastavalt tootja juhiste. Kõige sagedasem kliendi poolt teostatav hooldustöö, intervalliga 120 töötundi, sisaldab endas järgmisi töid: mootoriõli taseme kontroll, õhukompressori kontroll või hooldus, jahutusringi rõhu kontroll, kondensatsiooni veepaagi tühjendamine, suruõhuliini vee-eraldi tühjendamine, gaasi puhtuse kontrollelemendi inspekteerimine ning tuhakonteineri täituvuse kontroll. Lisaks eelnevale tuleb iga 600 töötunni järel teostada õlivahetus. Muude hooldustööde intervall on tunduvalt pikem. Summaarne ajaline kulu erinevatele töödele on kuude lõikes esitatud tabelis 4.6, seega üksikhaaval kõiki hooldustöid autor välja tooma ei hakka. Eraldi on esitatud kliendi poolt tehtava jooksva hoolduse aeg ning seadme hoolduse aeg, kui koostootmiseseadme töö on häiritud. Seadme hooldusmaksumuse arvestamisel on võetud kvalifitseeritud isiku tunnihinnaks 40 €/h, kuna see töö tuleb suure tõenäosusega sisse osta. Tarbija jooksev hooldus teostatakse aga oma töötajate poolt, põhitöö kõrvalt, seega seda hooldusmaksumuse arvutamisel eraldi ei arvestata. Hoolduskulud sisaldavad veel ka biosöe utiliseerimist, mida tekib seadme täiskoormusel töötamisel 2 m³ kuus. Tabelis 4.6 on näha, et mõned hooldustööd on võimalik teostada ainult seadme seisutamisel. Oluline punkt siin on see, et enne gaasisti kaane avamist peab

koostootmisseadme seisma vähemalt 72 tundi ning gaasisti peab jahtuma toatemperatuurile. Lisaks tuleb arvestada, et isegi seadme mitmepäevasel seismisel, võib süsteemi olla jäänud veel puugaasi, mis on äärmiselt tuleohtlik ning sissehingamisel ka mürgine. [Seadme hooldusraamat, mitteavalik]

Tabel 4.6 Seadmega seotud hoolduskulud

Kuu	Tarbija hooldus (h)	Seadme hooldus (h)	Seadme jahtumine (h)	Seadme hoolduse maksumus (€)	Seadme hooldustarvikud (€)	Biosöe äravedu (€)
Jaauar	5,00	3,50	0,0	140,0	857,84	35,00
Veebruar	5,00	2,00	0,0	80,0	857,84	35,00
Märts	5,00	2,50	72,0	100,0	857,84	35,00
Aprill	5,00	2,00	0,0	80,0	857,84	35,00
Mai	5,00	5,50	72,0	220,0	980,34	35,00
Juuni	7,00	2,50	4,0	100,0	857,84	35,00
Juuli	5,00	18,00	72,0	720,0	957,84	35,00
August	5,00	2,50	72,0	100,0	857,84	35,00
September	5,00	2,00	0,0	80,0	857,84	35,00
Oktoober	5,00	5,50	72,0	220,0	980,34	35,00
November	5,00	3,50	4,0	140,0	857,84	35,00
Detsember	7,00	4,50	4,0	180,0	857,84	35,00
Kokku	64,00	54,00	372,0	2 160,0	10 639,08	420,00

4.1.5 Energia tootmise kogukulu

Energiatootmise kogukulu saame eelnevates alapeatükkides leitud kulude ja tulude summeerimisel: hakkepuidu kulu, otseliini tulu, otseliini kulu, seadme hooldusmaksumus, seadme hooldustarvikud ning biosöe äravedu. Ühe aasta energia tootmise kogukulu on nendele andmetele tuginedes 17 378,79 €.

Tabel 4.7 Energia tootmise kogukulu

Kuu	Energia tootmise kogukulu (€)
Jaauar	1 401,7
Veebruar	1 306,9
Märts	1 326,6
Aprill	1 330,6
Mai	1 567,6
Juuni	1 351,5
Juuli	2 039,0

August	1 326,6
September	1 330,6
Oktoober	1 567,6
November	1 387,8
Detsember	1 442,4
Kokku	17 378,79

4.2 GFE45 energialahendus võrreldes vana süsteemiga

Kuna tootmisbaasi elektrienergia tarbimine ei muutu, kuid GFE45 koostootmiseadme elektrienergia toodang on valdavalt kõrgem, kui tootmisbaasi tarbimine, siis toimub pidev üleliigse elektrienergia võrku müümine. Vastavalt tabelile 4.9 on energia kogukulu GFE45 lahendusega võrdne energia tootmismaksumus miinus elektrienergia ostmine võrgust pluss elektrienergia müümine võrku. See teeb kogukuluks 14 708,9 € ühes aastas. Esimese variandi korral säästab GFE45 koostootmiseadmega võrreldes esialgse süsteemiga kokku 7 509,9 € aastas.

Tabel 4.9 GFE45 energialahendus võrreldes vana süsteemiga

Kuu	Energia tootmis-maksumus (€)	Toodetud elektrienergia (kWh)	Toodetud ja tarbitava elektrienergia vahe (kWh)	Elektrienergia ostmine võrgust (€)	Elektrienergia müümine võrku 0.03295€
Jaanuar	1 401,7	29 540,0	7 869,0	0,0	259,3
Veebruar	1 306,9	26 720,0	6 922,0	0,0	228,1
Märts	1 326,6	26 700,0	-7 974,0	738,1	0,0
Aprill	1 330,6	28 640,0	3 036,0	0,0	100,0
Mai	1 567,6	26 580,0	-1 432,0	132,4	0,0
Juuni	1 351,5	28 380,0	6 127,0	0,0	201,9
Juuli	2 039,0	26 080,0	13 877,0	0,0	457,2
August	1 326,6	26 700,0	15 436,0	0,0	508,6
September	1 330,6	28 640,0	18 500,0	0,0	609,6
Oktoober	1 567,6	26 580,0	14 610,0	0,0	481,4
November	1 387,8	28 420,0	17 511,0	0,0	577,0
Detsember	1 442,4	29 260,0	3 559,0	0,0	117,3
Kokku	17 378,8	332 240,0	98 041,0	870,5	3 540,4

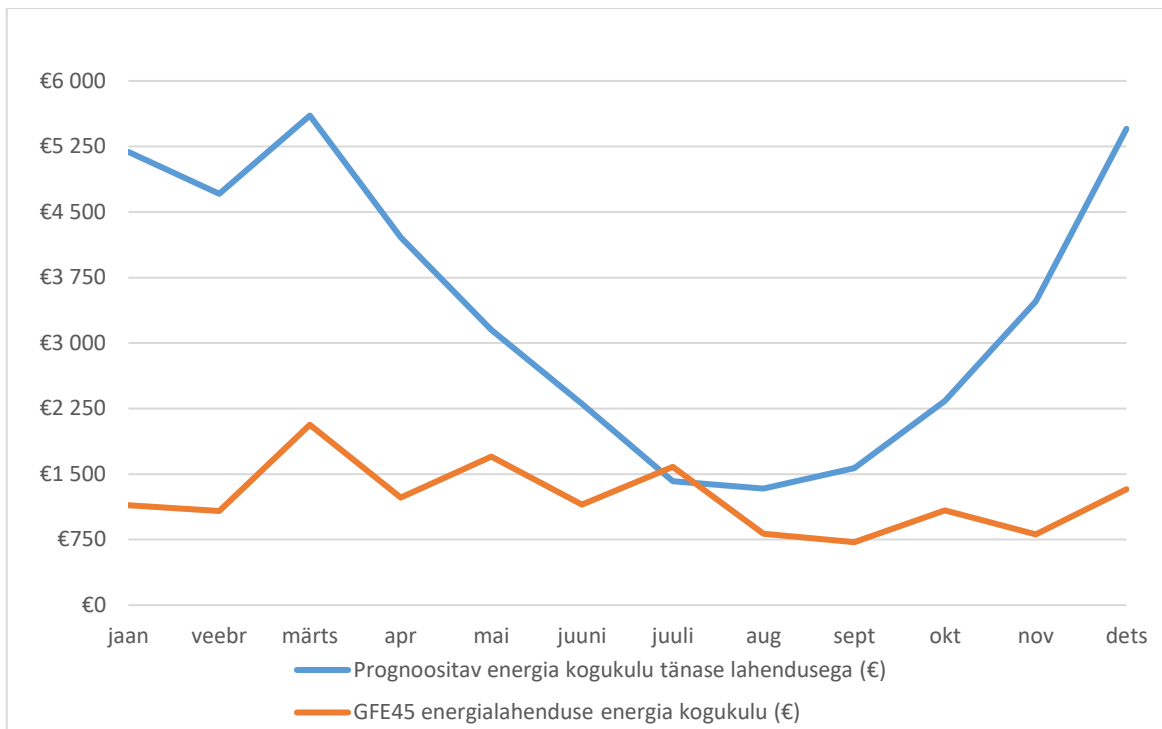
Kui tabelis 4.9 selgitasime elektrienergia andmeid, siis tabel 4.10 keskendub soojusenergiale. Kuna energia kogukulu GFE45 koostootmiseadmega on väiksem, kui varasemat ainult elektrienergia maksumus, siis võib ka väita, et kogu soojusenergia on

kaasnev nähtus, mille saame tarbimiseks tasuta. See tähendab, et soojusenergia kuludelt õnnestub vastavalt tabelile 3.4 kokku hoida kogunisti 18 524 € aastas ning vastavalt tabelile 4.10 jääb ligikaudu 47% toodetud soojusenergiast veel kasutamata.

Tabel 4.10 GFE45 energialahendus võrreldes olemasolevaga

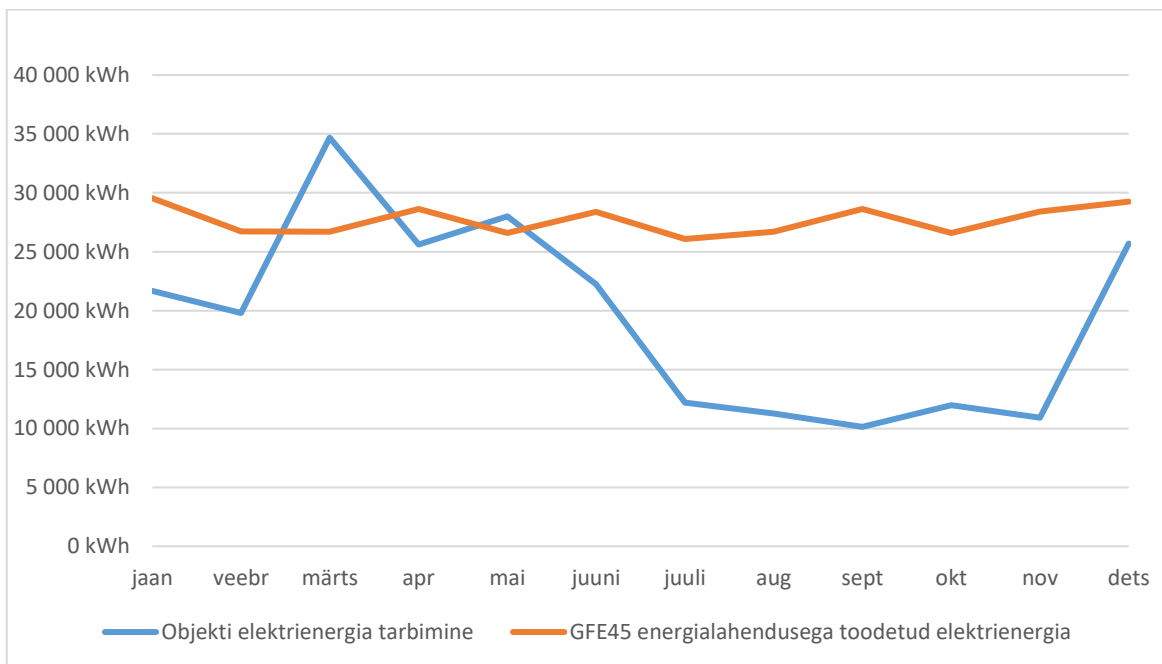
Kuu	Toodetud soojusenergia (kWh)	Toodetud ja tarbitava soojusenergia vahe (kWh)
Jaanuar	73 850,0	0,0
Veebruar	66 800,0	0,0
Märts	66 750,0	10 012,5
Aprill	71 600,0	28 640,0
Mai	66 450,0	53 160,0
Juuni	70 950,0	65 274,0
Juuli	65 200,0	59 984,0
August	66 750,0	61 410,0
September	71 600,0	58 712,0
Oktoober	66 450,0	39 870,0
November	71 050,0	14 210,0
Detsember	73 150,0	0,0
Kokku	830 600,0	391 272,5

Summeerides elektrikulude kokkuhoiu ning soojusenergia kulude kokkuhoiu, leiame, et kogu kokkuhoid ja lisatulu energiamüügist on 26 047,7 €. Kui GFE45 koostootmiseseade paigaldada tänasese soojus- ja elektrienergia koormuste juurde, siis hoiaksime kokku võrreldes tänasega 10 137,2 € aastas. Nii esimese kui teise variandi korral on GFE45 koostootmiseseadme kasutamine pealtnäha õigustatud.



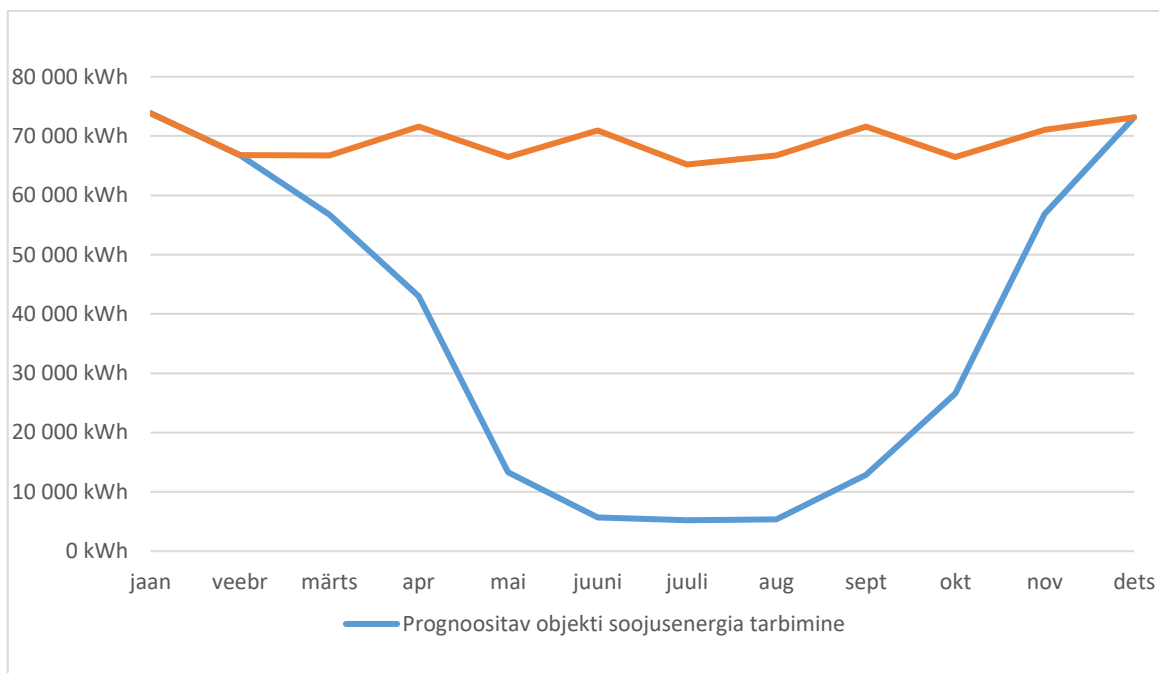
Joonis 4.1 Proгноositav energia kogukulu

Momendil kui sinine joon on oranžist joonest kõrgemal, ostetakse elektrienergiat võrgust juurde. Vatupidisel olukorral müüakse elektrit võrku ning teenitakse tulu. Koostootmisseedme võib tööle panna ka täisautomaatselt, et see reguleeriks oma töövõimsust vastavalt elektrienergia vajadusele.



Joonis 4.2 Elektrienergia

GFE45 koostootmiseseadmega toodetud soojusenergia õnnestub tootmisbaasis tarbida täielikult ainult talvekuudel. Muul ajal tekib ülejääk, millele tuleks veel optimaalne lahendus leida. Tekkinud soojusenergiat kasutatakse uue lahendusena kaarhallide õhkkütteks ja sooja tarbevee kuumutamiseks ning olemasolevates süsteemides lisaks veel pörandakütteks, radiaatorkütteks ning ventilatsioonikalorifeeris. Üks võimalus on tootmisbaasi edasiarendus ning teine võimalus võrku müümine.



Joonis 4.3 Soojusenergia

4.3 Investeering

Eelnevas peatükis oleme välja arvanud seadme ühe aasta energia tootmise ning käitamise kulud, millele tuleb lisada veel põhiseadmete maksumus ning paigaldamine, soojussõlme ehitamine, katlahoone ehitamine ning hakkehoidla ehitamise maksumus. Ükshaaval ei hakka autor kõiki hindu välja tooma, kuid meie ettevõtte investeeringud energialahendusse olid kokku 322 744,3 €, kusjuures lõviosa sellest moodustas seadme maksumus, milleks oli 210 000 €. Otsesele investeeringule on täiendava kuluna juurde arvestatud veel igakuise kapitaalremondi kulu, mis on arvestatud lisaks seadme tavapärasele hooldusele. Vastavalt tabelitele 5.2 – 5.4 on investeering hajutatud võrdsete osamaksetega seitsmeks aastaks, välja arvatud esmane suurem sissemakse 57 000 €, et luua esmane valmisolek energia tootmiseks. Esimene aasta kulub sisuliselt ettevalmistuste tegemiseks ning seadme töövalmiduse saavutamiseks. Esimesed 12. aastat on arvestatud ka taastuenergiatoetusega vastavalt toodetud elektrienergia

kogusele (Tabel 4.5). Peale antud perioodi muutub energia tootmine küll märkimisväärselt kallimaks, kuid see jääb siiski madalamale tasemele, kui see oleks olnud vana süsteemiga (energia tootmise kogukulu aastas 40756,71 €). Summeerides tabelite 5.2 – 5.5 investeerimiskulud, siis saame GFE45 koostootmiseseade tasuvusajaks on 15,02 aastat.

Alternatiivsetes energialahendustes mängib olulist rolli teotuste osakaal ning see saab tihti ka otsustavaks argumendiks seadme paigaldamisel. Näiteks toetavad taastuvenergialahenduste finantseerimist sellised ettevõtted nagu PRIA, KIK ning Kredex. Keskkonnainvesteeringute Keskus KIK toetab atmosfääriõhu kaitse programmi raames kuni 50% ulatuses jaama ostu neile edukaile taotlejaile, kes seni on kasutanud fossiilsetel kütustel energiatootmist, kuid soovivad seda välja vahetada. Samuti on võimalik toetus taotleda PRIA-st maapiirkondade mitmekesistamise programmi raames, mille eesmärgiks on olnud põllumajandusettevõtja tegevuse mitmekesistamine mittepõllumajandusliku tegevuse suunas, näiteks hakkepuidust taastuvenergia tootmise suunas. Lõpetuseks käendab ka KredEx seesuguse seadme ostmist, et sisseseadet ning energialahendust uuendada. [47] [48]

Tabel 5.2 Investeering 1. aasta

Kuu	Energia tootmine (€)	Elektrienergia ostmine (€)	Elektrienergia müümine 0.03295€/kWh	Investeering seadmetesse	Kapitaalamont	KOKKU
Jaanuar	1 401,7	0,0	0,0	60 164,0	86,9	61 652,5
Veebruar	1 306,9	0,0	0,0	3 164,0	86,9	4 557,7
Märts	1 326,6	0,0	0,0	3 164,0	86,9	4 577,5
Aprill	1 330,6	0,0	0,0	3 164,0	86,9	4 581,4
Mai	1 567,6	0,0	0,0	3 164,0	86,9	4 818,5
Juuni	1 351,5	0,0	0,0	3 164,0	86,9	4 602,4
Juuli	2 039,0	0,0	0,0	3 164,0	86,9	5 289,8
August	1 326,6	0,0	0,0	3 164,0	86,9	4 577,5
September	1 330,6	0,0	0,0	3 164,0	86,9	4 581,4
Oktoober	1 567,6	0,0	0,0	3 164,0	86,9	4 818,5
November	1 387,8	0,0	0,0	3 164,0	86,9	4 638,7
Detsember	1 442,4	0,0	0,0	3 164,0	86,9	4 693,3
Kokku	17 378,8	0,0	0,0	94 967,8	1042,8	113 389,4

Tabel 5.3 Investeering 2 – 7. aasta

Kuu	Energia tootmis- maksumus (€)	Elektrienergia ostmine võrgust (€)	Elektrienerg ia müümine võrku 0.03295€/k Wh	Investee ring seadmet esse	Kapitaalar emont	KOKKU
Jaanuar	1 401,7	0,0	259,3	3 164,0	86,9	4 393,3
Veebruar	1 306,9	0,0	228,1	3 164,0	86,9	4 329,7
Märts	1 326,6	738,1	0,0	3 164,0	86,9	5 315,5
Aprill	1 330,6	0,0	100,0	3 164,0	86,9	4 481,4
Mai	1 567,6	132,4	0,0	3 164,0	86,9	4 950,9
Juuni	1 351,5	0,0	201,9	3 164,0	86,9	4 400,5
Juuli	2 039,0	0,0	457,2	3 164,0	86,9	4 832,6
August	1 326,6	0,0	508,6	3 164,0	86,9	4 068,9
September	1 330,6	0,0	609,6	3 164,0	86,9	3 971,9
Oktoober	1 567,6	0,0	481,4	3 164,0	86,9	4 337,1
November	1 387,8	0,0	577,0	3 164,0	86,9	4 061,7
Detsember	1 442,4	0,0	117,3	3 164,0	86,9	4 576,0
Kokku	17 378,8	870,5	3 540,4	37 967,8	1042,8	53 719,4

Tabel 5.4 Investeering 8 – 12. aasta

Kuu	Energia tootmine (€)	Elektrienergia ostmine (€)	Elektrienerg ia müümine 0.03295€/k Wh	Investee ring seadmet esse	Kapitaalar emont	KOKKU
Jaanuar	1 401,7	0,0	259,3	0,0	86,9	1 229,3
Veebruar	1 306,9	0,0	228,1	0,0	86,9	1 165,7
Märts	1 326,6	738,1	0,0	0,0	86,9	2 151,6
Aprill	1 330,6	0,0	100,0	0,0	86,9	1 317,4
Mai	1 567,6	132,4	0,0	0,0	86,9	1 786,9
Juuni	1 351,5	0,0	201,9	0,0	86,9	1 236,5
Juuli	2 039,0	0,0	457,2	0,0	86,9	1 668,6
August	1 326,6	0,0	508,6	0,0	86,9	904,9
September	1 330,6	0,0	609,6	0,0	86,9	807,9
Oktoober	1 567,6	0,0	481,4	0,0	86,9	1 173,1
November	1 387,8	0,0	577,0	0,0	86,9	897,8
Detsember	1 442,4	0,0	117,3	0,0	86,9	1 412,0
Kokku	17 378,8	870,5	3 540,4	0,0	1042,8	15 751,7

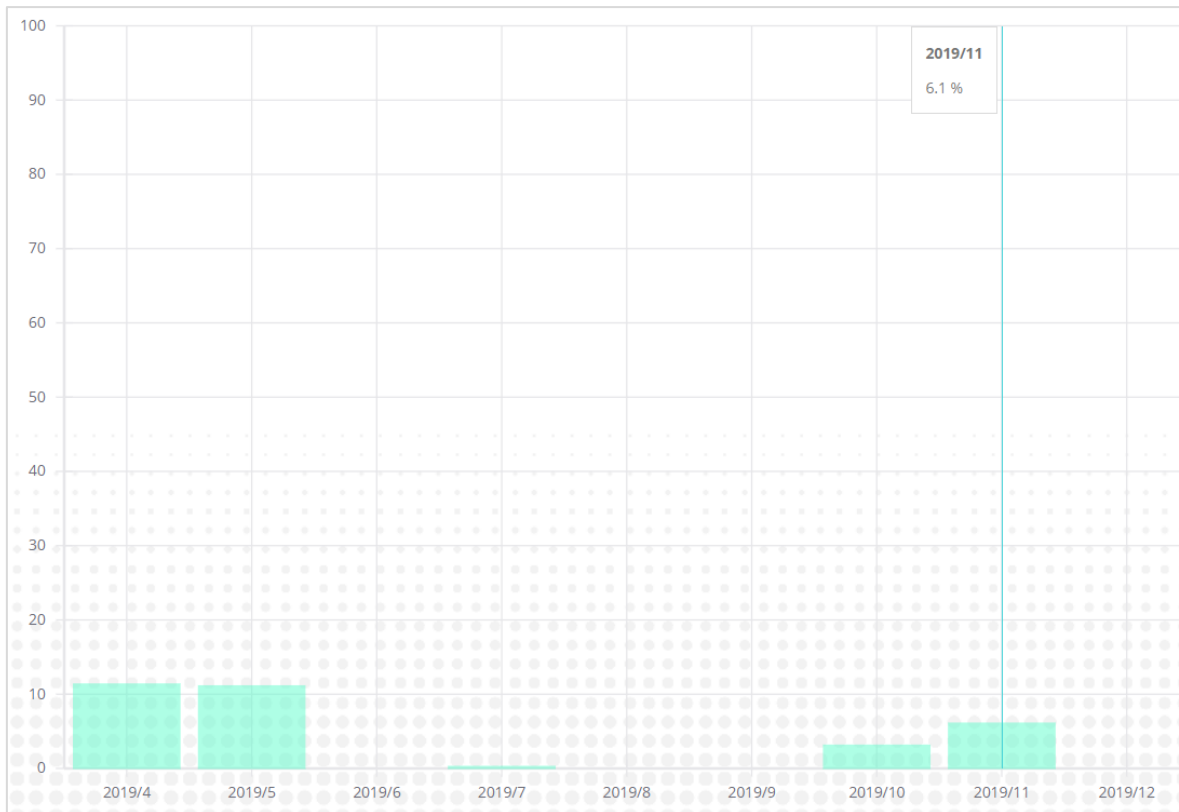
Tabel 5.5 Investeering 13 – 24. aasta

Kuu	Energia tootmine (€)	Elektrienergia ostmise (€)	Elektrienergia müümine 0.03295€/kWh	Investeering seadmetesse	Kapitaalarv	KOKKU
Jaauar	2 572,3	0,0	0,0	0,0	86,9	2 659,2
Veebruar	2 365,8	0,0	0,0	0,0	86,9	2 452,7
Märts	2 384,7	738,1	0,0	0,0	86,9	3 209,7
Aprill	2 465,6	0,0	0,0	0,0	86,9	2 552,5
Mai	2 621,0	132,4	0,0	0,0	86,9	2 840,3
Juuni	2 476,2	0,0	0,0	0,0	86,9	2 563,1
Juuli	3 072,5	0,0	0,0	0,0	86,9	3 159,4
August	2 384,7	0,0	0,0	0,0	86,9	2 471,6
September	2 465,6	0,0	0,0	0,0	86,9	2 552,5
Oktoober	2 621,0	0,0	0,0	0,0	86,9	2 707,9
November	2 514,1	0,0	0,0	0,0	86,9	2 601,0
Detsember	2 601,9	0,0	0,0	0,0	86,9	2 688,8
Kokku	30 545,5	870,5	0,0	0,0	1042,8	32 458,7

4.4 Käiduandmed

Kuna seade on varustatud automaatse andmelogimise võimalusega, siis on võimalik kõik olulised andmed leida seadme valmistaja kodulehelt – Volter Space. Seade on töös olnud kõigest 1141 töötundi ning kogu toodetud elektrienergia kogus on 17 814,9 kWh. Sellest 2 822,8 kWh on kulunud omatarbeks. Soojusenergia kohta info puudub, kuna seadme komplektist puudub seade, mis seda salvestaks ning mõõdaks.

GFE45 koostoomisseadme esmane käivitamine leidis aset 13.02.2018 ning selle käigus testiti vaakumit, hädaseiskumist, fääsijärjestust ning seadmest väljuvad 24V DC signaale. Nimetatud parameetrid olid korras, kuid poolteist tundi kestnud katsetus lõppes seadme seiskumisega. Ilmnesid probleemid hakkepuidu etteandesüsteemiga ning hakkehoidlas olev kütus oli liiga niiske. Käivitamise hetkest kuni antud töö koostamise hetkeni on seadme tundide ning töötundide suhe kõigest 6,3% ehk siis seade on seisnud ligikaudu 17 000 tundi ning töös olnud 1141 tundi. Joonisel 4.4 on esitatud 2019. aasta 10 kuu seadme kasutamise näide. 100% eeldus on, et ühes kuus töötab seade kõik päevad 24 tundi ööpäevas.



Joonis 4.4 Koostootmiseseadme kasutamine 04.2019 – 12.2019

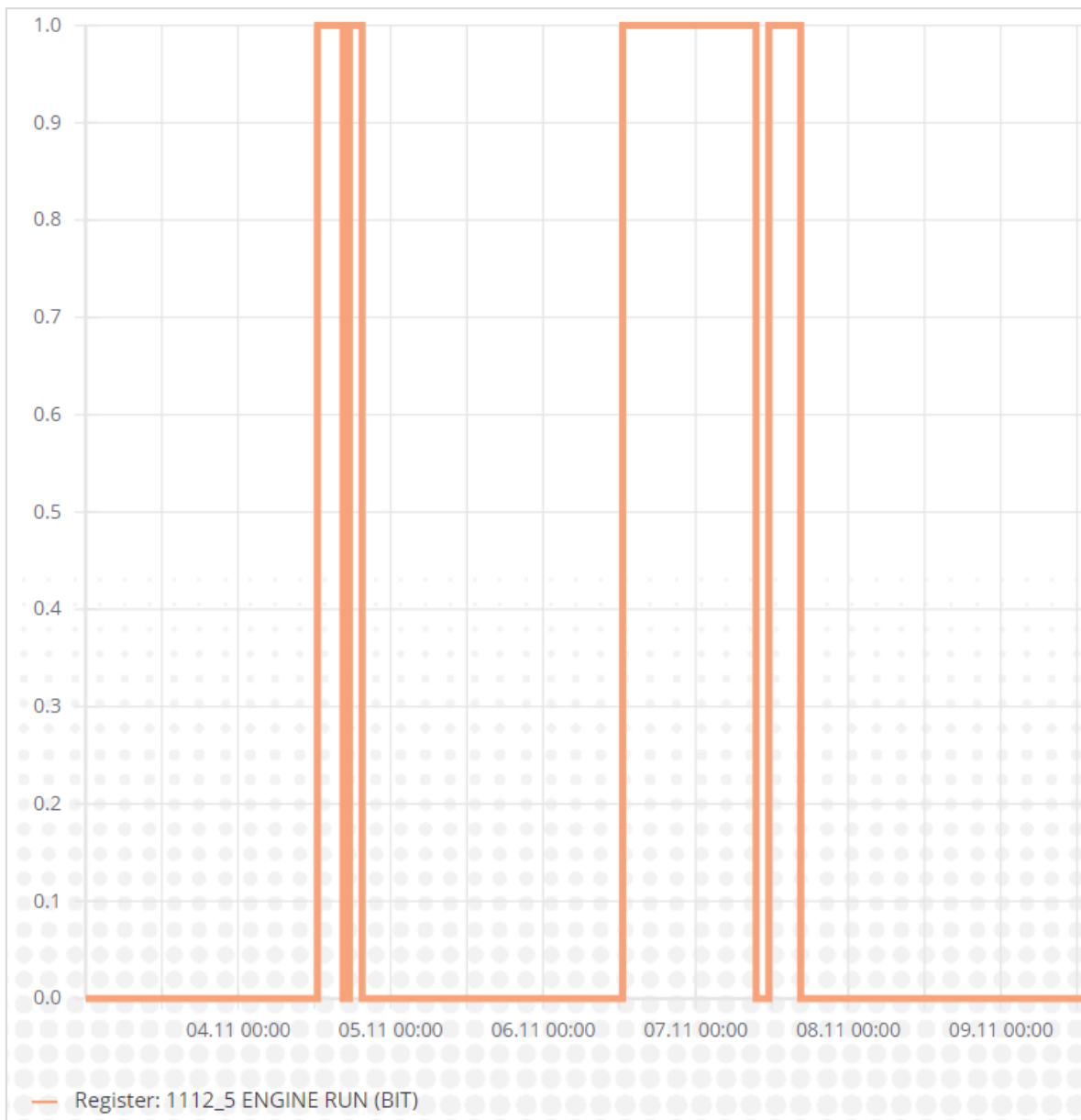
Järgmisena vaatame tüüpilist olukorda, kui seade töötab. Konkreetne situatsioon on möödunud novembrist. Häirelogi, koos kuupäeva, kellaja ning häire kirjeldusega on nähtaval logist, kuna see salvestatakse hilisemaks kontrollimiseks. Vastavalt olemasolevatele andmetele on 07.11.2019 seadmel esinenud ajavahemikul 06:00 – 17:00 seitse mootori seiskumist. Koostootmiseseade seiskub automaatselt, kui ta töötab automaatrežiimis ning kui mõni sündmus käivitab lukustuse. Selleks võib olla näiteks kolbmootori liiga kõrge temperatuur või tühi kütusepunker, mootori temperatuur tõuseb üle ülemise piiri või tagastatava jahutusvee temperatuur kasvab üle seatud piirmäära. Üheks tüüpilisemaks seiskumise põhjuseks on üldiselt öeldes kütuse etteandesüsteem. Näiteks lihtne tigukruvide kiilumine või tigukruvide kiilumine, mille tõttu ei jõua ühe minuti jooksul piisavalt hakkepuitu seadmesse. Või siis liikuvpõranda sõrme purunemine, mille tõttu ei jõua puiduhake transpordikruvile ning edasi seadmesse. Kui lukustamise põhjus on leitud ja viga parandatud, peab enne uut käivitamist lukustuse lähtestama. Nüüd kui uuesti seadet käivitada, tuleb gaasistis olnud hakkepuit ning tuhk kogu gaasisti ulatuses puhastada. Protsessi käigus tuleb eemaldada pöörsiber, imeda tuhk välja, panna tagasi pöörsiber ning teha vaakumtest, selgitamaks, kas süsteemis on lekkeid. Alles seejärel on lubatud seadme taaskäivitamine. Teine võimalus gaasisti

puhastamiseks on läbi automaatse režiimi, kus seade annab gaasistise õhku ning toimub hakke aeglane põletamine. Lisaks töötab tuhaemaldussüsteem. See protsess võtab ligikaudu 20 tundi ning seejärel saab seadme uuesti normaalselt käivitada, seda muidugi eeldusel, et probleemid, mis seadme seiskumise põhjustasid on lahendatud.

Seadme töövõimsust on võimalik ka automaatselt reguleerida, kuna seade jälgib ettemääratud võimsuse seadeväärtust. Kui mingi protsess läheneb häirepiirile, vähendab koostootmisseade töövõimsust, millega üritatakse ära hoida väljalülitamist. Koormuse vähendamise põhjusteks võib olla gaasi temperatuur pärast gaasistit, gaasi temperatuur peale primaarset soojusvahetit ning gaasi temperatuur enne mootorit. Seadet on võimalik hoida ka ooterežiimis. Sellel ajal elektrit ega soojust ei toodeta, vaid hoitakse gaasisti lõõri temperatuuri vahemikus 400 – 1000 °C.

Järgnevalt vaatame, kuidas kajastub koostootmisseadme töö erinevatel graafikutel (väljavõtte on tehtud erinevatest komponentidest kindlal ajavahemikul).

Esimesel graafikul on näidatud mootri töö. Mootori töötamist tähistab 1 ning seiskumist 0. Ideaalsetel tingimustel mootor töötaks pidevalt ning selliseid sisse ning välja lülitamisi ei toimuks.



Joonis 4.5 Mootori töö

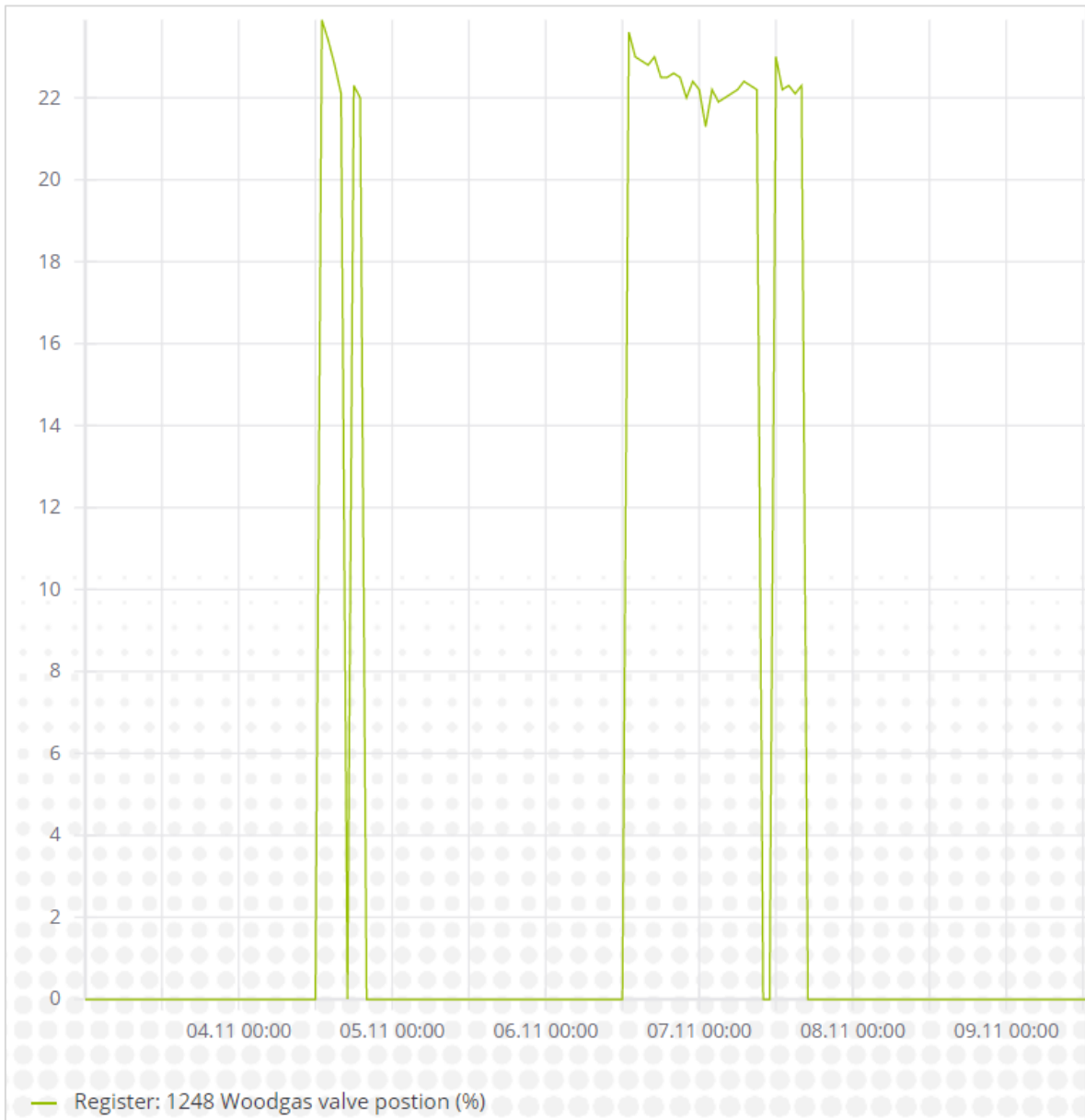
Järgmisel graafikul on esitatud gaasisti ning elektritarbimise andmed. 04.11.2019 on seade enne mootori seiskumist mõned tunnid töös olnud. Seadme elektriline võimsus töötamise ajal oli 13,5 kW. Graafikult on näha, et gaasisti temperatuur on langenud ning õhu peaventiil on sulgunud. Uuesti on proovitud seadet käivitada 06.11.2019. Juhul kui gaasisti lõõri temperatuur on alla 150 °C, siis teostab koostootmiseadme automaatika külmstardi. Kui temperatuur on üle selle, siis käivitub seade ilma külmstardita ning küünla ventiil läheb tööle, et süüdata gaasistis olevat hakkepuitu. Taaskäivitamisel on seade töötanud ilma tõrgeteta peaaegu 24 tundi järjest. Õhuventiili asend gaasisti all on reguleeritav. See vähendab kõrget vaakumit gaasistamise protsessil. Kui gaasirõhk peale gaasistit on pidevalt kõrge (üle 3500 Pa), siis tuleb

õhuventiil avada korraga 10%. Õhuventiili asend võib põhjustada liiga kõrge gaasi temperatuuri peale gaasistit. Kui gaasisti ülemine temperatuur läheb üle 150 °C, siis annab seade häiret. Kui gaasisti ülemine temperatuur läheb üle 250 °C, siis lülitab seade ennast täielikult välja ning kraanid suletakse, õhku peale ei anta ning toodetud puugaas lastakse taevasse.



Joonis 4.6 Gaasisti lõõri temperatuur, gaasi temperatuur peale gaasistit, elektri tootmise võimsus ning õhu peaventiili asend

Viimasel graafikul on näidatud puugaasiventili töö. Ventiiil reguleerib oma tööd automaatselt, sõltuvalt gaasitoodangust.

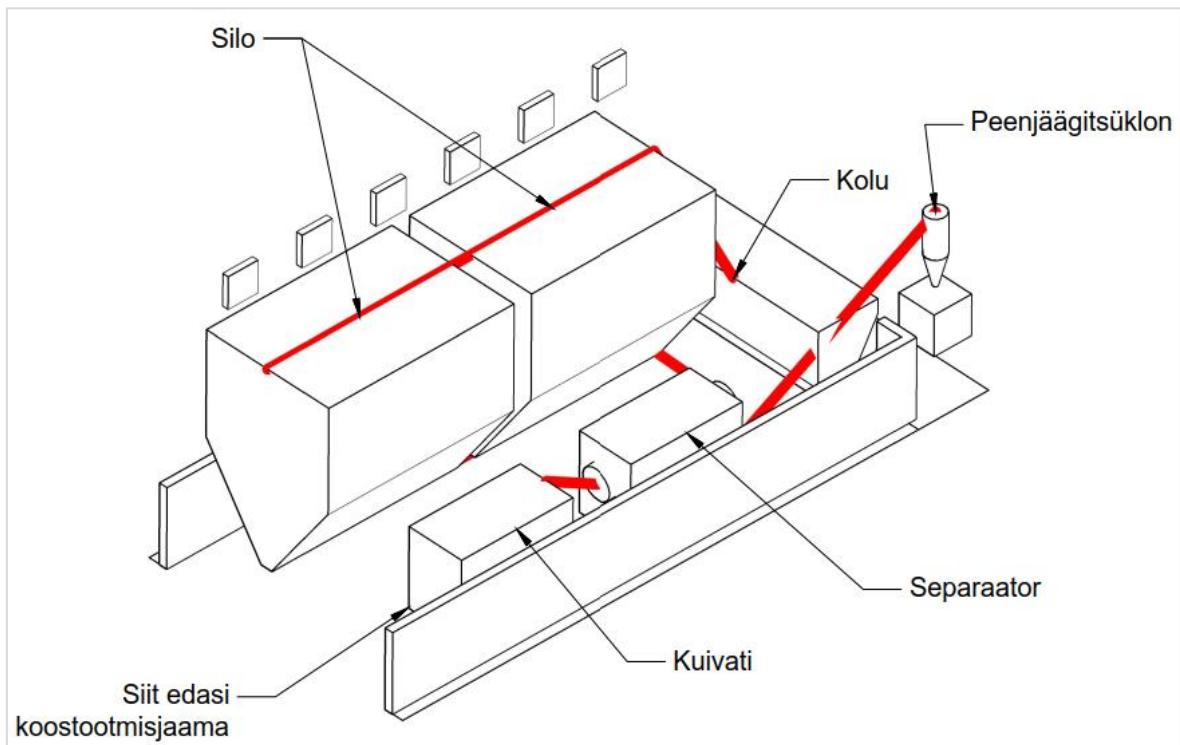


Joonis 4.7 Puugaasiventili positsioon (%)

4.5 Järeldused

Ei ole alust arvata, et probleemid on seotud otseselt GFE45 seadmega. Probleemide põhjuseks on eelkõige puiduhake ning hakkehoidla projekteerimisel ja ehitamisel tehtud vead. Süsteemist puuduvad sellised olulised komponendid nagu kütuse separaator ning kuivati, kuna ei olnud arvestatud sellega, et hakkepuidu hankimisel võiks sellega

probleeme esineda. Järgnevad alapeatükid kinnitavad, et nende olemasolu on seadme töökindluse tagamiseks kriitilise tähtsusega.



Joonis 4.8 Perspektiivne edasiarendus

Tarnitud puiduhakke kvaliteedivigadeks on kõrge niiskusesisaldus ning nõuetele mitte vastavate puiduosakeste sisaldus. Liigniiskus vähendab hakke kütteväärtust ja suurendab elektritarbimist, põhjustab hallitust või hakke jäätumist ning tekitab põletamisel rohkem tuhka. Lubatust väiksemate, suuremate või pikemate osakeste kasutamisel võib aga tekkida etteandeseadmete ummistus. GFE45 seadmel on väga kõrged hakkepuidu kvaliteedi nõuded (Tabel 4.2). See on kogunisti nii tähtis, et seadme valmistaja on märkinud, et see on eelduseks koostootmisseadme tõrgeteta tööks ning spetsifikatsioonile mitte vastava küttematerjali kasutamine toimub seadme ostja vastutusel ning toob kaasa garantii katkemise. Kuna spetsifikatsioonile vastava hakkepuidu saamine Eesti turult on raskendatud, siis on liiga optimistlik oodata, et seade töötaks nii nagu peab. Tuleb nentida, et Eestis küll leidub selliseid puidutööstusi, kes on võimelised kõrge kvaliteediga ning nõutud fraktsiooni ja niiskusesisaldusega haket tarnima, kuid väikese nõudluse tõttu ei hakata tootmist ümber seadistama. Ainuke mõistlik võimalus on seega teha lisainvesteering, et luua paremad tingimused kohapeal nii separaatori kui kuivati näol.

4.5.1 Puiduhakke separaator

Kasutatava puiduhakke osakeste osakaal on puugaasi tootmisel väga oluline. Esiteks sõltub sellest seadme tootlikus ning teiseks viib ebakvaliteetse hakke kasutamine hakkehoidla tühjendusseadmete kiilumiseni ja koostootmiseseadme tõrgeteni. Etteruttavalt võib öelda, et küttehoidla tühjendusseadmete projekteerimisel on tehtud mõned põhimõttelised vead. Nimelt on kraapide liikuva osa ning põranda vahe liiga kõrge ning sellest on tingitud põranda kiilumine. Lisaks sellele on kütuse sekundaarse transportimisena kasutusel tigukruvi, mis peenendab teisaldatavat materjali. Nõudlikule puiduhakkele sobiks kasutamiseks paremini linttransportöör.

Selgitamaks, kui palju sõltub seadme töö kütuse fraktsioonist, sai valmistatud üks minimalistlik trummelseparaator. Olgu öeldud, et antud viisil nõutud mahus kütuse separeerimine on väga ajamahukas ning kulukas. Pikas perspektiivis ei ole see kindlasti majanduslikult mõistlik lahendus, kuid kontrollimaks, kuidas see mõjutab seadme üldist tööd, on see piisav. Valmistatud separaator aitab eelkõige vabaneda peenest purust, mis paratamatult hakkega kaasa tuleb ning kõige tõenäolisemalt süsteemis ummistusi tekitab. Separatori kasutamine näitas selgelt, et peene fraktsiooni osakaal tarnitud puiduhakkes on väga kõrge (ligikaudu 40% kütusest sõeluti välja). Olgugi, et antud separatori kasutamine ei taga ideaalse fraktsiooniga kütust, siis tulemused näitasid, et seade töötab tunduvalt paremini, kui kasutada kõrgema kvaliteediga kütust. Seega võib väita, et üks korralik automatiseeritud separaator on oluline komponent seadme tõrgeteta töö tagamiseks, eriti Eesti tingimustes. Separatorist alles jäänud kütuse perspektiivse lahendusena on ette nähtud väike puidukatel või mõni muu alternatiivne lahendus.



Joonis 4.9 Hakkepuidu separaator. Pildi autor: Henry Rebane

4.5.2 Puiduhakke kuivati

Hakkekuivatid on oma tööpõhimõttelt kõik sarnased, erinedes üksteisest peamiselt vaid põranda ehituse poolest. Olenemata hakkekuivati konstruktsioonist, tuleb seadme valikul esimesena selgeks teha vajaliku õhu kogus kuivatatava hakke mahuühiku kohta ning õhu liikumise optimaalne kiirus. Kuivati eesmärgiks on suunata kuivatusõhk ventilaatorite abil suunaga alt üles hakkekihti. Kuiavtusõhk võib olla eelsoojendatud või eelsoojendamata. Eelsoojendatud õhuna sobib ideaalselt kütteseadmetelt kiirgav soojus, mis muidu jääks kasutamata. [49] Näiteks on GFE45 seadmel on täiskoormusel töötades tagatud 20 kW sooja õhku (10 000m³/h, 40-50 °C).

Eesmärgiks oli valmistada lihtne ning väike topletpõhjaga konteinerkuivati, mis on ühendatud ventilaatorist tuleva õhukanaliga, et saavutada hakkepuidu soovituslik niiskus, milleks on vähemalt 15%. Protsessi käigus suunatakse õhk konteineri põhja ning sealt omakorda mööda düüse ühtlaselt hakke pinnale. Hakke kuivatamine oli efektiivne ning koos separeerimisega andis see häid tulemusi, mis kajastusid ka koostootmisseadme töös. Kuivatiga saadi kütuse niiskusesisaldus alla 10%. Nii nagu separeerimise näite puhul on ka see protsess liiga ajamahukas, et selle juurde pidama jääda. Kuna reaalselt tarniti metsamärga puiduhaket, mille niiskusesisaldus on üle 50%,

siis võib kindlalt väita, et üks korralik automatiseeritud kuivati on oluline komponent seadme tõrgeteta töö tagamiseks, eriti Eesti tingimustes.



Joonis 4.10 Hakkepuidu kuivati. Pildi autor: Henry Rebane

4.6 Näiteid puugaasi kasutuselevõtu projektidest

Nii nagu eelnevalt sai mainitud, siis GFE45 seade on Eestis paigaldatud kahes kodumaises ettevõttes (Kodumaja AS ning PAKRI Teadus- ja Tööstuspark OÜ). Lisaks GFE45 seadmetele on Eestis ehitatud ka üks suurem puugaasil töötav koostootmisjaam, mis asub Võhmas. Etteruttavalt võib öelda, et nii GFE45 koostootmisseadmete edasimüügiga tegelenud ettevõtte Green Fuel Energy OÜ kui ka Võhmasse puugaasil

töötava koostootmisjaama ehitanud ettevõtte Alternatiivenergia Grupp on pankrotistunud. Kõik nimetatud seadmed hetkel ei igapäevaselt ei tööta.

4.6.1 GFE45 koostootmiseseade Paldiskis PAKRI Teadus- ja Tööstuspark OÜ-s

2017. aastal paigaldati GFE45 koostootmiseseade PAKRI Teadus- ja tööstusparkis. Pakri tegevjuhi andmetel on tänaseks päevaks seadmest loobutud, kuna seda ei õnnestunud tõrgeteta tööle saada. Tegemist ei olnud otseselt seadme probleemiga, vaid kogu süsteemi probleemiga (hakkepuut, hakkehoilda ning seadme paigaldusviis). Täiendava kasutuskogemuse jagamine seetõttu puudub ning võib väita, et investering seadmesse ei olnud majanduslikult otstarbekas. [50]

4.6.2 GFE45 koostootmiseseade Tartus Kodumaja AS-is

2017. aastal paigaldati kaks GFE45 koostootmiseseadet Tartus Kodumaja AS-is. Täna sel päeval seade igapäevas kasutuses ei ole. [50]

4.6.3 Võhma koostootmisjaam

2013. aastal valmis AS Alternatiivenergia Grupi poolt Võhmas keskkonnasõbralik hakkepuutu kasutatav, puugaasi tehnoloogial põhinev koostootmisjaam, mille elektriline võimsus on 0,6 MW ning soojusvõimsus 1 MW. Varasemalt ei ole Eestis pürolüüsi põhimõttel toimivat tehnoloogiat soojus- ja elektrienergia koostootmiseks kasutatud. Seade otsustati paigaldada, kuna teostat uuring, mille tulemusena on gaasimootoriga koostootmisjaamas on elektri- ja soojusenergia suhe parim, mis elektrienergia kõrgema hinna tõttu võimaldab saada ligikaudu 17 – 20% suuremat tulu, võrreldes ükskõik milliste teiste puutu kütusena kasutatavate elektritootmise tehnoloogiatega. Olenemata sellest, et koostootmisjaam sai täielikult valmis ehitatud ning katsetused läbitud, ei õnnestunud turult saada nõutud niiskuse ning fraktsiooniga hakkepuutu. Üheks lahenduseks oleks olnud puidukuivati ning hakkepurusti soetamine, kuid lisaraha selleks ei leitud. Jaama koguinvesteringuks oli ligikaudu 700 000 € ning seda rahastas KredEx

investeeringislaenu käendusega (ligikaudu 200 000 €) ja Keskkonnainvesteeringute Keskus toetas kvoodimüügist saadud vahenditest (291 513 €). Kuna koostootmisjaam ei hakanud määratud tähtajaks tõrgeteta tööle, austati arendaja vastu panktroimenetlust ning see läks enampakkumisele. [51] [52]

4.6.4 GFE45 koostootmisseade Soomes Nurmes Kuittila talus

2012 aastal paigaldati GFE45 koostootmisseade Soomes Kuittila talus. Esmane eesmärk oli majanduslik ehk üleüldine energiakulude kokkuhoid. Lisaks eelnevale suureneb ka varustuskindlus ning energiasõltumatus, rääkimata positiivsest mõjust keskkonnale. Tegemist on esimese mikrokoostootmisseadmega antud regioonis. Tänapäevaks on seade väidetavalt 8 aastat edukalt töös olnud. Tehnoloogia on tõestanud ennast usaldusväärse ning töökindla lahendusena, kui kõik eeltingimused on täidetud. Esialgne lahendus nõudis operatiivseks kasutamiseks mõningaid muudatusi, seega kogu esimene aasta möödus erinevaid tehnilisi modifikatsioone ning süsteemi parendusi tehes. Esimestel kuudel piirduti proovikäivitustega, kuna saadaval ei olnud spetsifikatsioonile vastavat kvaliteetset hakkepuitu, mis osutus ootamatult oluliseks. Kütuse kvaliteedi probleemile leiti lahendus koos tarnijaga, täiustades puiduhakke tootmisprotsessi. Lisainvesteering tehti ka 1000 m³ kütusekuivatisse, millega tagati nõuetele vastav niiskusesisaldus. Kogu projekti maksumuseks kujunes 402 000 €, millest 35% finantseeris kohalik omavalitsus. Tasuvusanalüüs andis mõistlikud tulemused ka 15% toetusega, kuid suurema toetuse saamist peeti väga oluliseks, kuna risk on siin suurem, kui tavapäraste tehnoloogiatega. Miinusena on välja toodud kõrged investeeringukulud, suhteliselt pikk tasuvusaeg (üle 10 aasta ning seda ka eeldusel, et seade töötab probleemideta) ning kõrge kütuse kvaliteet, millest on tingitud kõrgem kütuse hind. Protsessis eraldunud tuhka on võimalik kasutada metsaväetisena. Süsteemi kulutõhusus sõltub suuresti soojustarbimisest ning ilmastikutingimustest, kuid liigset soojust saab kasutada puitkütuse kuivatamiseks ning potentsiaalselt ka muudes põllumajandustegevustes, et raiskamist vältida. [53] [54]

KOKKUVÕTE

Praegusel hetkel moodustab ülekaaluka osa elektrienergia tootmisest põlevkivi, kuid Eesti riigi energiatarbimise eesmärgiks on üle minna vähese süsinikuheitega majandusele. Nimelt on plaan vähendada KHG hulka ligikaudu 70% aastaks 2030 ning 80% aastaks 2050 võrreldes 1990. aastaga. Püstitatud eesmärk ning põlevkivi mahukas tarbimine ei sobi aga omavahel kokku, seega tuleb suurendada taastuvate energiaallikate osakaalu. Antud töös on fossiilkütuste võimaliku alternatiivina analüüsitud väärindatud puitkütuse (puugaasi) kasutamist. Puugaasil töötavad seadmed kasutavad kütusena puitu. Eesti metsamaa moodustab kogupindalast 51,4%, seega puitu kui toorainet on meil piisavalt. Eelnevate aastate statistika kinnitab, et raiemahud on läbi aastate püsinud lubatud tasemest madalamal, mis annab alust puidu kui taastuva energiaallika osakaalu suurendamisele. Metsaressursside mittetäielikul kasutamisel on tegemist ebamõistliku taastuenergia raiskamisega. Selleks, et suurendada puitkütuste osakaalu, kuid püsida lubatud piirides on aeg hakata puitkütust väärindama ning eesmärgipärasemalt kasutama.

Üheks võimalikuks kütuste tootmise ehk väärindamise viisiks on termokeemiline muundamine. Kogu tehnoloogiline protsess iseenesest on lihtne – toimub aine lagundamine kõrgel temperatuuril ning selle käigus saadakse tahketest kütustest suurema kütteväärtusega tahked, vedelad või gaasilised kütused. Termokeemilise muundamise protsessist huvitab antud töös meid gaasistamine, mille käigus muudetakse tahke kütus lihtsasti ja laiemalt kasutatavaks gaasiliseks energiakandjaks. Selleks, et protsess aset leiaks, peab olema loodud sobilik keskkond: kõrge temperatuur (kuni 1000 °C) ning vähem hapniku, kui oleks vaja kütuse täielikuks põletamiseks (maksimum 60%). Puugaasil töötavate koostootmiseseadmete valik on mitmekesine ning paigaldatava seadme valik sõltub eelkõige tarbija eesmärkidest. Tehnoloogiad erinevad üksteisest kõikvõimalike erinevate parameetrite poolest: kasutatav kütus, kütuse etteandesüsteem, töötemperatuur, tööõhk. Süsteemi põhielemendiks on konteiner ehk reaktor, kuhu biomass ning piiratud koguses õhku suunatakse. Kõige enam leiavad kasutust kolme tüüpi generaatorid: liikumatu kihiga reaktorid, keevkihtreaktorid ning pneumotransport- ehk läbivoolureaktorid. Liikumatu kihiga reaktorid on olnud kasutuses kõige kauem ning oma ehituselt on need ka kõige lihtsamad. Väikeste süsteemide korral peetakse selliseid reaktoreid kõige kuluefektiivsemateks. Nendel ja ka muudel töös esitatud põhjustel sai paigaldatud Scanweld AS tootmisbaasi GFE45 mikrokoostootmiseseade, kus on kasutusel vastuvoolu ehk ülesvoolureaktori. Seadme valimise hetkel ootasid kolm GFE45 seadet paigaldamist ning käivitamist veel kahes kodumaises ettevõttes (Kodumaja AS ning PAKRI Teadus-

ja Tööstuspark OÜ). Autorile teada oleva informatsiooni kohaselt on tänaseks päevaks PAKRI Teadus- ja Tööstuspark OÜ-s paigaldatud GFE45 seade demonteeritud, kuna seda ei saadud tööle ning Kodumaja AS kaks GFE45 seadet ei ole tehniliste probleemide tõttu igapäevases kasutuses. Soomes Nurmes Kuittila talus töötab samasugune seade väidetavalt ilma igasuguste probleemideta.

Analüüsi tulemusena võime väita, et GFE45 seadme paigaldamisel tootmisbaasi, on energiatarbimise kogukulu tunduvalt väiksem, kui vana süsteemiga jätkates. Arvutused on koostatud eeldusel, et seade töötab täiskoormusel ning ilma probleemideta. Seadme tasuvusajaks etteantud tingimustel on 15,02 aastat, mis on tegelikult ünsa pikk aeg, arvestades, et seadme minimaalne eluiga on 20 aastat. Suurte investeerimiskulude ning ebaühtlaste aastaste koormuste tõttu võib analoogsete seadme paigaldamisel majanduslik tasuvus ka üldse puududa. Siin on lahenduseks investeerimistoetused. Reaalsed käiduandmed ning koostatud prognoos üksteist ei toeta, kuna seadme käitamisel ilmnesid probleemid, millega varasemalt ei arvestatud. Kõige suuremaks murekohaks osutus seadmes kasutatava kütuse kvaliteet, kuna seade nõuab kõrge kvaliteediga hakkepuitu ning nõuetele mitte vastava kütuse kasutamisel võivad tekkida probleemid ning seadme tootlikkuse vähenemine. Eesti turult on raske leida sobivat kütust. Teoreetiliselt leidub puidutööstusi, kes on võimelised kõrge kvaliteediga haket tarnima, kuid see eeldab tootmiste ümber seadistamist, mida väikese nõudluse tõttu ei tehta või kui tehakse siis on hind ebamõistlikult kõrge, mis muudab seadme käitamise küsitavaks. Üheks võimalikuks lahenduseks on kogu ahela täitmine ettevõttesiseselt. Teiseks võimaluseks oleks puugaasigeneraatorite koguarvu suurendamine, mis tõstaks kvaliteetse hakkepuudu nõudlust. Probleemid kerkisid esile ehitatud hakkehoidlaga ning kütuse etteandesüsteemiga. Ilmnenud probleemidele on pakutud võimalikud lahendused kuivati ja separaatori näol. Käesoleva töö raames on läbi viidud proovikatsetused, mis kinnitavad, et seadme võiks edukalt toimima saada, kui olemasolev süsteem vastavalt pakutud lahendusele ümber ehitada. Olgu öeldud, et see toob kaasa ka märkimisväärsed lisainvesteeringud.

Magistritöö võib lugeda õnnestunuks, kuna suutsin täita püstitatud eesmärgid ning sain piisava ülevaate puugaasil töötavatest seadmetest. Analüüsisin ning andsin hinnangu reaalselt paigaldatud GFE45 koostootmiseseadmele ning hindasin üleüldiselt puugaasil töötavate mikrokoostootmiseseadmete kasutusvõimalusi ning kasutamist piiravaid tegureid Eestis. Lõputöö tulemusena võib järeldada, et vaatamata mõnele ebaõnnestunud projektile on puugaasigeneraatoritel Eesti energiatarbimises oma koht olemas, vaadates eelkõige püstitatud energiatarbimise eesmäärke ning Eesti metsamaa rohkust, kuid tehnoloogia osatähtsuse suurenemisele energeetikasektoris aitaks kaasa

inimeste teadlikkuse tõstmine, mõne kohaliku projekti edulugu, investeerimiskulude vähenemine, toetuste suurenemine, tehnoloogia areng ning fossiilsete kütuste hinnatõus.

SUMMARY

Estonia's goal is to become a low emission economy even though currently most of our electricity is produced from oil shale. The objective is to reduce greenhouse gas (GHG) emissions approximately 70% by 2030 and 80% by 2050 compared to 1990 levels. However this goal and oil shale excessive use are not compatible. Only option to achieve this is to increase renewable energy production. In this thesis wood gas usage has been analysed as a possible alternative to fossil fuels. Wood gas generators use wood as a fuel and forests cover 51,4% of the territory of Estonia which means we have a plenty of wood as a raw fuel material available. Statistics from previous years confirm that logging volumes have been below the permitted levels which enables more large-scale logging. Failure to use the forest resources would be unreasonable waste of the renewable energy. In order to increase wood usage and stay within bounds we must increase valorisation of wood and usage it purposefully.

One possible way to produce fuels is thermochemical conversion. Process itself is quite simple – material is break down into smaller molecules at high temperatures with controlled oxygen levels to produce solids, liquids and gases with higher calorific value. Out of all thermochemical processes we are interested in gasification process where solid fuel is converted into widely and simply used gas. For the process to take place suitable environment must be achieved: high temperature (up to 1000 °C) and very low oxygen level (maximum 60%). There are large number of different micro combined heat and power wood gas plants available. The final decision is made by consumer and it depends solely on purpose. Technologies differ in terms of fuel, fuel supply system, gasifiers, working temperature and pressure. Main element of the system is still a reactor in which biomass and limited amount of oxygen is inserted. There are three main generator types that are widely applied: fixed bed gasifier, fluidized bed gasifier and entrained flow gasifier. Fixed bed or moving bed gasifier is oldest yet simplest gasification system. In small scale gasification process they are also most suitable and economic. Because of these and other reasons presented in this thesis GFE45 micro CHP was installed in Scanweld AS workshop. In this CHP current thesis we analyze GFE45 CHP technology uses fixed bed updraft gasifier. At the time this device was chosen three other GFE45 devices were waiting to be installed and put into operation at two other local companies (Kodumaja AS ning PAKRI Teadus- ja Tööstuspark OÜ). According to information known to author, the GFE45 device installed in PAKRI Teadus- ja Tööstuspark OÜ has been dismantled as it could not be put into operation and Kodumaja AS two devices are not in daily use due to technical problems. In Finland Nurmes Kuitila farm the same device works today without any problems.

As a result of the analysis we can state that GFE45 CHP installation in our workshop is cost efficient since total energy consumption is significantly lower than continuing with the old system. The calculations have been made supposing that device works on maximum load and without any problems. The payback period under the given conditions is 16 years which is quite long in consideration of device minimum lifespan 20 years. Actual operating data and prediction does not coincide due to problems which were not previously considered. The biggest concern is the quality of the fuel since device requires high quality wood chips with certain parameters and moisture level. Using non-complaint fuel can cause problems and reduce output capacity. It is difficult to find suitable fuel from Estonian market. Theoretically there are some companies that are able to supply high quality wood chips but due to low demand they will not adjust their production or if they do then the price would be unreasonably high which would make the operation of the plant questionable. One possible solution is to complete the entire chain by ourselves. Another option would be to increase the total number of wood gas generators, which would increase the demand for high quality wood chips. In addition there are problems with wood chip storage and fuel feed system. Possible solutions like wood chip dryer and wood chip separator have been made and pilot tests have been already carried out. Tests confirmed that device could be put into operation as needed but upgrading existing system will involve significant investments.

This master thesis can be considered successful since I was able to achieve the goals I set and got sufficient overview of the equipments running on wood gas. I also analysed and appraised actually installed GFE45 micro CHP and estimated generally wood gas CHP possibilities and limits in Estonia. As a result of the master thesis it can be concluded that even though there are some failed projects wood gas generators definitely have a place in Estonian energy consumption especially considering the future goals and abundance of forest land. In order to increase it we need to rise public awareness, we need some local success stories, lower investment costs, increase in support rates, continue development of technology, increase in efficiency and rising fossil fuel prices.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Eesti Statistika, „KE033: Elektri ja energia tootmiseks tarbitud kütus,“ 03 09 2019 [Võrgumaterjal]. Available: <http://andmebaas.stat.ee/?lang=et#> [Kasutatud 05 04 2020].
- [2] Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, „ Eesti riiklik energia- ja kliimakava aastani 2030 (REKK 2030),“ 19 12 2019. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.mkm.ee/sites/default/files/teatis_eesti_riiklik_energia-_ja_kliimakava_aastani_2030.pdf. [Kasutatud 15 02 2020].
- [3] Eurostat, „Share of renewable energy in gross final energy consumption,“ 17 08 2018. [Võrgumaterjal]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&plugin=1&language=en&pcode=t2020_31. [Kasutatud 27 02 2020].
- [4] Eesti Statistika, KK51: Metsavaru riikliku metsainventeerimise (SMI) hinnangul, 13 06 2019 [Võrgumaterjal]. Available: <http://andmebaas.stat.ee/?lang=et> [Kasutatud 02 03 2020].
- [5] Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, „RIIGI ÜLDINE ENERGIATÕHUSUSKOHUSTUS AASTATEL 2021-2030 NING TAASTUVENERGIA EESMÄRKIDE TÄITMINE,“ 09 2019. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.mkm.ee/sites/default/files/180917_energiatohusus_2030_aruanne.pdf. [Kasutatud 27 02 2020].
- [6] Eesti Statistika, KK07: Maismaa pindala maakasutuse järgi kliimaaruannetes, 13 06 2019 [Võrgumaterjal]. Available: <http://andmebaas.stat.ee/?lang=et> [Kasutatud 02 03 2020].
- [7] Keskkonnaministeerium, „Metsandus,“ 06 06 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.envir.ee/et/konventsioon-metsandus>. [Kasutatud 07 05 2020].
- [8] Riigiteataja, „Eesti metsanduse arengukava aastani 2020,“ 2010 [Võrgumaterjal]. Available: https://www.riigiteataja.ee/aktiiv/3180/2201/1003/Eesti_%20metsanduse_arengukava.pdf. [Kasutatud 05 05 2020].
- [9] Eesti Statistika, „MM03: Metsaraie riikliku metsainventeerimise (SMI) hinnangul,“ 13 06 2019 [Võrgumaterjal]. Available: <http://andmebaas.stat.ee/Index.aspx?lang=et&DataSetCode=MM03>. [Kasutatud 07 05 2020].
- [10] Eesti Statistika, „EV100: mets ja metsarahvas,“ 09 01 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://blog.stat.ee/2018/01/09/ev100-mets-ja-metsarahvas/>. [Kasutatud 08 05 2020].

- [11] Eesti Statistika, „KE043: Katlad ja nende toodetud soojus katla liigi järgi,“ 12 09 2018 [Võrgumaterjal]. Available: <http://andmebaas.stat.ee/Index.aspx?lang=et&DataSetCode=KE043>. [Kasutatud 07 04 2020].
- [12] Eesti Statistika, „KE034: Koostootmisjaamade võimsus ja toodang,“ 03 09 2019 [Võrgumaterjal]. Available: <http://andmebaas.stat.ee/Index.aspx?lang=et&DataSetCode=KE035>. [Kasutatud 07 04 2020].
- [13] Eesti Statistika, „KE035: Koostootmisjaamades kasutatud kütus,“ 03 09 2019 [Võrgumaterjal]. Available: <http://andmebaas.stat.ee/Index.aspx?lang=et&DataSetCode=KE035>. [Kasutatud 07 04 2020].
- [14] Eesti Statistika, „KE034: Koostootmisjaamade võimsus ja toodang,“ 03 09 2019 [Võrgumaterjal]. Available: <http://andmebaas.stat.ee/Index.aspx?lang=et&DataSetCode=KE034>. [Kasutatud 09 04 2020].
- [15] A. Paist, A. Poobus, A. Küppas, O. Kiipsaar, A. Koppel, O. Lugus, J. Viik, R. Reiska, Biomassi energeetilise kasutamise võimalused Eestis. Tallinn 1992.
- [16] A. Paist, A. Poobus, Soojusgeneraatorid. Tallinn: TTÜ KIRJASTUS 2009.
- [17] V. Vares, Ü. Kask, P. Muiste, T. Pihu, S. Soosaar, Biokütuse kasutaja käsiraamat. Tallinn: TTÜ KIRJASTUS 1992.
- [18] Wood Energy eXtension CoP, „Woody Biomass Properties,“ 05 09 2019 [Võrgumaterjal]. Available: <https://wood-energy.extension.org/woody-biomass-properties/>. [Kasutatud 14 04 2020].
- [19] Scielo, „Elemental Chemical Composition of Forest Biomass at Different Ages for Energy Purposes,“ 29 06 2019 [Võrgumaterjal]. Available: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2179-80872019000400110. [Kasutatud 17 04 2020].
- [20] Bioenergyprof, „04-01: Ligno-cellulose – Properties and processes ,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.bioenergyprof.eu/handbooks/bisyplan/html-files-en/04-01.html>. [Kasutatud 17 04 2020].
- [21] Energiatalgud, „Koostootmine,“ 24 03 2016. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.energiatalgud.ee/index.php?title=Termokeemiline_muundamine&menu-127. [Kasutatud 12 02 2020].
- [22] Canvas, „BBE 1002 (001) Biorenewable Resources (Fall 2018),“ 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://canvas.umn.edu/courses/84688/pages/l21-pathways-to-products-thermochemical>. [Kasutatud 15 02 2020].

- [23] Build A Gasifier, „Wood Gasification,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.build-a-gasifier.com/PDF/Wood%20GasificationPP.pdf>. [Kasutatud 15 05 2020].
- [24] Allpowerlabs, „Gasification as incomplete combustion,” [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.allpowerlabs.com/gasification-explained>. [Kasutatud 04 05 2020].
- [25] P.Basu, Biomass Gasification, Purolysis and Torrefication. UK: Elsevier Inc 2013. [Kasutatud 16 03 2020].
- [26] IEA Bioenergy, „Status report on thermal biomass gasification in countries participating in IEA Bioenergy Task 33,” 04 2016 [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ieabioenergy.com/publications/status-report-on-thermal-biomass-gasification-in-countries-participating-in-iea-bioenergy-task-33/>. [Kasutatud 24 03 2020].
- [27] IEA Bioenergy, „Gasification facilities for CHP production – operational, under construction, under commissioning,” 2019 [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ieabioenergy.com/publications/new-publication-2019-status-report-on-thermal-gasification-of-biomass-and-waste/>. [Kasutatud 16 05 2020].
- [28] IEA Bioenergy, „ 2019 Status report on thermal gasification of biomass and waste,” 10 2019 [Võrgumaterjal]. Available: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2019/11/IEABioenergyT33_2pageSummary_StatusReport.pdf. [Kasutatud 22 04 2020].
- [29] IEA Bioenergy, „Status report on thermal gasification of biomass and waste 2019,” 10 2019 [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ieabioenergy.com/publications/new-publication-2019-status-report-on-thermal-gasification-of-biomass-and-waste/>. [Kasutatud 27 03 2020].
- [30] European Bioenergy Day, „The world’s largest biomass gasifier can be found in Europe,” [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.europeanbioenergyday.eu/the-worlds-largest-biomass-gasifier-can-be-found-in-europe/>. [Kasutatud 02 03 2020].
- [31] Power Technology, „Vaasa Bio-gasification Plant,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.power-technology.com/projects/vaasa-plant/>. [Kasutatud 03 05 2020].
- [32] Valmet, „Vaskiluoto - The world’s largest biomass gasifier exceeds expectations,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.valmet.com/media/articles/all-articles/vaskiluoto---the-worlds-largest-biomass-gasifier-exceeds-expectations/>. [Kasutatud 28 04 2020].
- [33] Bioenergy International, „Fuel handling solution reduces costs for world’s largest biomass gasification plant,” 26 02 2017 [Võrgumaterjal]. Available: <https://bioenergyinternational.com/heat-power/fuel-handling-solution-reduces-costs-worlds-largest-biomass-gasification-plant>. [Kasutatud 01 05 2020].

- [34] GEK Wiki, „Review of Technologies for Gasification of Biomass and Wastes. Final Report. NNFCC project 09/008,” 06 2009 [Võrgumaterjal]. Available: <http://wiki.gekgasifier.com/f/Review+of+Biomass+Gasification+Technologies.NNFCC.Jun09.pdf>. [Kasutatud 04 05 2020].
- [35] ScienceDirect, „Small-scale biomass gasification systems for power generation (<200 kW class): A review,” 01 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S136403211930694X?token=193E03DD3917FFA4DC56498B9F6F6F97034374F646F934186D9EF70520E3B99302A6B326AEF4F9877A52713894CE94D0>. [Kasutatud 04 04 2020].
- [36] The Energy and Resources Institute, „Biomass Gasifier for Thermal and Power applications,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.teriin.org/technology/biomass-gasifier-for-thermal-and-power-applications>. [Kasutatud 22 04 2020].
- [37] P. Quaak, H. Knoef, H. Stassen, Energy from Biomass: A Review of Combustion and Gasification Technologies. World Bank Technical Paper No. 442. World Bank, 1999.
- [38] A. Ots, Tahkekütuse keevkihtpõletustehnika. Tallinn: TTÜ KIRJASTUS 2016.
- [39] ScienceDirect, „Influence of the biomass gasification processes on the final composition of syngas,” 2013 [Võrgumaterjal]. Available: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1876610213011545?token=D207B1CA5E594116BA6F04D01239543348375F780701A7D8C9788F056B0C20FEE6C72B441A5BCD0135C62963A44A687B>. [Kasutatud 29 04 2020].
- [40] Energiatalgud, „Koostootmine,” 24 03 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <https://energiatalgud.ee/index.php/Koostootmine>. [Kasutatud 12 02 2020]
- [41] Eesti Biokütuste Ühing, „Eesti põlevloodusvarad ja -jätmed,” 2013 [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.eby.ee/ajakiri2013.pdf>. [Kasutatud 07 05 2020].
- [42] BKV AB, „Volter 40 indoor,” [Võrgumaterjal]. Available: http://www.bkvab.se/downloads/Volter%2040%20Indoor_Datasheet.pdf. [Kasutatud 01 05 2020].
- [43] Uue-Põltsamaa mõis, „Green Fuel Energy,” [Võrgumaterjal]. Available: <http://uuepoltsamaamois.ee/konverents/saat.pdf>. [Kasutatud 02 05 2020].
- [44] Volter Oy, „Products,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://volter.fi/technology/>. [Kasutatud 20 05 2020].
- [45] Riigi Teataja, „Elektrituruseadus¹,” 11 02 2003. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/113032019045>. [Kasutatud 18 05 2020].
- [46] Riigi Teataja, „Alkoholi-, tubaka-, kütuse- ja elektriaktsiisi seadus¹,” 01 04 2003. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/117122015017?leiaKehtiv>. [Kasutatud 09 05 2020].

- [47] Keskkonnainvesteeringute Keskus, „Atmosfääriõhu kaitse programm, sh korteriühistute Kütteseadmed,“ 25 03 2020 [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.kik.ee/et/toetatav-tegevus/atmosfaariohu-kaitse-programm-sh-korteriuhistute-kutteseadmed>. [Kasutatud 11 05 2020].
- [48] PRIA, „Maapiirkondades alternatiivse majandusliku tegevuse arendamise ja mitmekesistamise investeeringutoetus,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://web.pria.ee/SAPARD/Est/ES_measures.htm#m3. [Kasutatud 24 04 2020].
- [49] A. Mölder, A. Rallmann, Puiduhakke vihik. Tallinn: SA Erametsakeskus.
- [50] Pealinn, „Rene Tammist: ligi 800 Eesti majapidamist kasutab juba päikeseenergiat,“ 29 04 2017 [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.pealinn.ee/tagid/koik/rene-tammist-ligi-800-eesti-majapidamist-kasutab-juba-paikeseenergiat-n192508>
- [51] [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.aripaev.ee/uudised/2015/05/05/vohma-koostootmisjaama-pankrot>. [Kasutatud 03 05 2020].
- [52] Erametsakeskus, „Võhmas valmis ainulaadne koostootmisjaam,“ 25 06 2013 [Võrgumaterjal]. Available: https://www.eramets.ee/metsandusuudised/vohmas_valmis_ainulaadne_koostootmisjaam_/. [Kasutatud 04 05 2020].
- [53] Volter Oy, „Kuittila Farm,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://volter.fi/references/kuittila-farm/>. [Kasutatud 15 05 2020].
- [54] GREBE, „ Kuittila Power Small Scale Biomass CHP,“ 09 2017 [Võrgumaterjal]. Available: <http://grebeproject.eu/wp-content/uploads/2017/09/Small-Scale-Biomass-CHP-Kuittila-Power-Finland.pdf>. [Kasutatud 25 04 2020].