



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
ELEKTROENERGEETIKA INSTITUUT

www.emu.ee



Eesti Maaülikool

Estonian University of Life Sciences

Puugaasi kasutus koostootmisel

Hajaenergeetika õppekava

Magistritöö

Juhendaja

insener Eduard Latõšov

Lõpetaja

Liina Mürk

Tallinn 2016

Autorideklaratsioon

Deklareerin, et käesolev lõputöö, mis on minu iseseisva töö tulemus, on esitatud Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika instituudile haridusastme lõpudiplomi taotlemiseks hajaenergeetika erialal. Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Lõpetaja (allkiri ja kuupäev) _____

Lõputöö kokkuvõte

<i>Autor:</i> Liina Mürk	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> Puugaasi kasutus koostootmisel	
<i>Kuupäev:</i> 27.05.2016	78 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool <i>Teaduskond:</i> Mehaanikateaduskond <i>Instituut:</i> Soojustehnika instituut <i>Õppetool:</i> Soojusjõuseadmete õppetool	
<i>Töö juhendaja(d):</i> insener Eduard Latõšov	
<i>Sisu kirjeldus:</i> <p>Käesoleva töö eesmärgiks on selgitada välja biomassi, eelkõige hakkepuidu, gaasistamise võimalused ja tõhusus koostootmisel. Selleks vaadeldakse nimetatud süsteemide sobivust ja tasuvust Eesti tingimustes.</p> <p>Töö esimeses osas antakse ülevaade koostootmisest Eestis ning tehnilistest võimalustest biomassi gaasistamisel. Seejärel analüüsitakse tehnoloogia kasutust Euroopas, keskendudes gaasimootoreid kasutavatele koostootmisjaamadele.</p> <p>Analüüsi teostamiseks on koostatud andmebaas, kuhu on kogutud andmeid erinevatest teadustöödest ja uuringutest, seeriatootmises olevatest kui ka praktikas kasutatavate suuremate koostootmisjaamade kohta, mis kasutavad energia saamisel gaasistatud biomassi, valdavalt puiduhaket.</p> <p>Töö viimaseks osaks on tasuvusanalüüs kolme erineva suuruse ja soojustarbimisega teoreetilisele Eesti asulale, kus kasutatakse andmebaasi analüüsi tulemusena leitud keskendatud väärtusi erinevate parameetrite kohta.</p> <p>Töö peamine eesmärk on hinnata gaasistamistehnoloogia rakendamise otstarbekust gaasimootoritel põhineval koostootmisel erineva suurusega asulates ning hindamise otstarbeks koguda ja süstematiseerida seadmete tehnilised ja majanduslikud näitajad.</p>	
<i>Märksõnad:</i> koostootmine, biomass, puiduhake, gaasistamine, tasuvusanalüüs.	

Summary of the Diploma work

<i>Author:</i> Liina Mürk	<i>Kind of the work:</i> Master's Thesis
<i>Title:</i> Woodgas in Cogeneration of Heat and Power	
<i>Date:</i> 27.05.2016	78 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology <i>Faculty:</i> Faculty of Mechanical Engineering <i>Department:</i> Thermal Engineering <i>Chair:</i> Thermal Power Equipment	
<i>Tutor(s) of the work:</i> Engineer Eduard Latõšov	
<i>Abstract:</i> The aim of the thesis is to identify the biomass, mainly woodchips, gasification options and cogeneration efficiency. To determine results, system compatibility and cost effectiveness in Estonia is analyzed. The first section of the thesis provides an overview of cogeneration in Estonia and the technical feasibility for biomass gasification. Thereafter the usage of technology in Europe is examined, focusing mainly on cogeneration plants using gas power engines. By analyzing different scientific works and researches, a database was created by collecting data from various scientific studies and researches and giving an overview of the largest cogeneration stations (in use or in serial production) that use gasified biomass, mainly woodchips, for producing energy. The last section of the thesis covers the cost-benefit analysis that was created for three theoretical Estonian settlements in different sizes and heat consumptions by using concentrated values of various parameters received from the database. The main purpose of the thesis is to evaluate the expedience of the gasification technology in the gas engine based cogeneration plants in settlements with different sizes and to collect and systematize equipment technical and economic indicators for evaluation.	
<i>Key words:</i> cogeneration, biomass, woodchips, gasification, cost-benefit analysis.	

Sisukord

Lõputöö ülesanne	6
Teema põhjendus:	6
Töö eesmärk:.....	6
Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:.....	6
Lähteandmed:.....	6
Eessõna	8
Sissejuhatus	9
1. Koostootmine Eestis	12
1.1. Koostootmise olemus ja tehnoloogiad	12
1.2. Koostootmise eelised	12
1.3. Koostootmise areng Eestis	14
2. Puugaasi tootmise tehnoloogiad ja kasutus Euroopas	17
2.1. Puidugaasistamise alused	18
2.2. Gaasistamisseadmed ja tehnoloogiad	19
2.3. Energia bilanss	22
2.4. Tooraine iseloomustus	23
2.5. Puugaasi kasutuse omapärad võrreldes teiste tehnoloogiatega	25
2.5.1 Puidu gaasistamine võrreldes puidu otsese põletamisega	25
2.5.2 Gaasimootorid võrreldes gaasiturbiinidega	25
2.5.3 Gasifitseerimisseadmed võrreldes teiste tehnoloogiatega	26
2.6. Puugaasil töötavad koostootmisjaamad Euroopas	27
2.6.1 Gaasigeneraatorite tootjad	30
2.7. Puugaasi kasutatavate koostootmisjaamade näitajad	33
2.7.1 Tehnilised parameetrid	33
2.7.2 Majanduslikud parameetrid	36
3. Puugaasi tehnoloogia kasutamise otstarbekuse hinnang Eestis	40
3.1. Referentstarbijate määramine ja tehnilised näitajad	40
3.1.1 Tehnilised lähteandmed	41
3.2. Majandusarvutused	43
3.2.1 Eeldused ja meetodika	43
3.2.2 Tasuvusanalüüsi arvutustulemused	44
3.3. Järeldused	46
Lõputöö kokkuvõte	48
Kirjandus	52
Lisad	60

Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema:	Puugaasi kasutamine koostootmisel
Üliõpilane:	Liina Mürk 143986AAHM
Lõputöö juhendaja:	Eduard Latõšov
Õppetool:	Soojusjõuseadmete õppetool
Lõputöö esitamise tähtaeg:	27.05.2016.a

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Teema põhjendus:

Puugaasi kasutamise võimalikkuse uurimist alustasin väga praktilisel põhjusel, kuna selles valdkonnas on uusi tootjaid, kes teevad väga tugevat turunduskampaaniat, tekitades huvi puidust gaasi tootmise võimalikkuse vastu. Teema on oluline, sest puugaasi koostootmiseseadmetega on võimalik katta energiavajadust nii väga väikestes piirkondades kui ka suurtes asulates. Samuti on Eestis teravalt päevakorral kohaliku puidu võimalikult suure väärtusega ära kasutamine. Nimetatud põhjendustele tuginedes ongi käesolev töö koostatud.

Töö eesmärk:

Töö eesmärgiks on analüüsida ja jõuda tulemuseni, kas puugaasi tootmisel põhinevaid koostootmiseseadmeid on võimalik Eesti tingimustes kasumlikult rakendada.

Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Anda ülevaade Euroopas kasutatavatest puugaasistamise seadmetest. Määrata ja hinnata puugaasistamise tehnoloogiate ja seadmete tehnilisi ning majanduslikke parameetreid, samuti kasutamise otstarbekust Eestis erineva suurusega teoreetilistes asulates.

Lähteandmed:

Kõige täpsemad andmed põhinevad seadmete müüjatelt ja paigaldajatelt. Tavaliselt nende poolt pakutakse üldtehnilised näitajaid, kuid informatsiooni projekti realiseerimise üldinvesteeringute, käidukulude ja tasuvuse kohta kahjuks üldreeglina mitte.

Seetõttu lisaks tootjate kodulehekülgedel pakutud informatsioonile on kasutusel peamiste allikadena erinevad teadusartiklid, raamatud ja puidugaasi kasutamisele suunatud veebilehed. Praktikas töötavate jaamade kohta on koostatud mitmeid uuringuid, mis sisaldavad informatsiooni ka investeeringute, opereerimise ja käidukulude kohta.

Nende allikate alusel on koostatud andmebaas, mis on aluseks tehnilis-majanduslike näitajate ja nende seoste väljatoomiseks.

Eessõna

Käesoleva lõputöö teema on välja arenenud huvist, kas väikese võimsusega biomassi kasutatavad koostootmisjaamad Eesti tingimustes on mõistliku tasuvusajaga energia tootmise viis või mitte. Antud lõputöö näol on tegemist teoreetilise tööga, kus on koostatud andmebaas erinevate tootjate ja praktikas kasutatavate koostootmisjaamade kohta, kus biomassi gaasistamisel saadud gaasi kasutatakse koostootmises gaasimootorite baasil. Vastavalt andmebaasi tulemusena saadud keskendatud väärtustele on koostatud tasuvusarvutused erineva suurusega näitlikele asulatele.

Kõige suurem tänu töö koostamisel kuulub kindlasti juhendajale Eduard Latõšovile, kuid ka soojustehnika magistrandile, kes on juba aastaid käesoleva temaga süvitsi tegelenud, Ain Laidojale.

Lõputöö koostaja kontaktid:

Nimi- Liina Mürk

e-mail: liina44@hotmail.com

tel: 56466840

Sissejuhatus

Käesoleval ajal on üheks kasvavaks prioriteediks Euroopa Liidus energiatõhusus ja keskkonna jätkusuutlikkus. Euroopa probleemid energiavaldkonnas on kasvav sõltuvus impordist, vähene mitmekesisus, kõrged ja kõikuvad energiahinnad, ülemaailmne energianõudluse kasv, tootmis- ja transiidiriike mõjutavad julgeolekuriskid, kliimamuutusega seotud ohtude suurenemine, energiatõhususe edendamise aeglus, taastuvenergia kasvavast osakaalust tulenevad probleemid ning vajadus muuta energiaturud läbipaistvamaks ja ühtsemaks ning need omavahel paremini siduda. Euroopa energiapoliitika keskmes on mitmesugused energiaturu integreerimisele, energia varustuskindlusele ja energiasektori säästvusele suunatud meetmed. [1]

Sellest tulenevalt on Euroopa Liidu energeetika poliitikas välja kujunenud kolm peamist eesmärki:

- Turvaline energiajulgeolek;
- Konkurents võimelisus;
- Jätkusuutlikkus. [2]

Kuid nimetatul taustal on Eesti jätkuvalt olukorras, kus suur osa kasutatavast energiast pärineb põlevkivist, mis ei ole pikemas perspektiivis jätkusuutlik ja keskkonnasõbralik energia saamise viis. Kuid tänu erinevate rohetehnoloogiate arengule ja ka elanike keskkonnateadlikkuse suurenemisele, on tugevalt kasvamas taastuvenergeetika osakaal.

Eesti on metsariik ja meie suureks väärtuseks on metsade suur osakaal riigi pindalast, mis 2010.a ulatus 2,2 miljon hektarini ehk ligikaudu pooleni Eesti maismaast [3]. Samuti on viimastel aegadel olnud väga päevakajaline teema puidu kasutamisel võimalikult suure lisaväärtuse loomine ehk väärimine. Siiani ei ole Eestis väga laialdast kasutust leidnud puidu gaasistamise tehnoloogia- on asjaarmastajaid, kes on ise kodus valmistanud vastavaid seadmeid ning on olnud ka suuremaid jaamu, kus osa protsessist energia saamiseks, on olnud hakkepuidu gaasistamine (näiteks Võhma koostootmisjaam), kuid tegemist on siiski üksikute näidetega. Samas on tänu uutele tehnilistele lahendustele turule sisenenud uusi pakkujaid ka väikestele võimsustele.

Erinevaid võimalusi biomassi gaasistamise kaudu energiat toota on mitmeid, kuid kogu küsimus on kas ja millistel tingimustel on selline tegevus ka majanduslikult tasuv. Viimasele küsimusele vastust otsides tutvusin erinevate teadustöödega ja uuringutega, kogusin informatsiooni seeriatootmises olevate kui ka praktikas kasutatavate suuremate

koostootmisjaamade kohta, mis kasutavad energia saamisel gaasistatud biomassi, valdavalt puiduhaket.

Eelpool nimetatud ongi põhjuseks käesoleva magistritöö „Puugaasi kasutamine koostootmisel“ koostamisel. Esimeses peatükis antakse ülevaade koostootmise eelistest ning kasutusest Eestis. Teine peatükk keskendub juba konkreetsemalt gaasistamisele, tutvustades gaasistamise erinevaid tehnoloogilisi võimalusi, nende erinevusi ja sobivust erinevatesse tingimustesse. Samuti gaasistamise erinevusi/eeliseid põletamise ees. Peatüki teine pool annab ülevaate gaasistamistehnoloogiate kasutusest Euroopas, laiemalt kasutatavatest seadmetest. Kuid kuna ametlikku avalikku statistikat olemasolevate jaamade ja nende omaduste üle ei peeta, siis ei ole tegemist kindlasti mitte lõplike andmetega, vaid konkreetsetele viidetele tuginedes leitud materjalidega. Saksamaa näol on tegemist Euroopa, kui mitte kogu maailma, kõige eesrindlikuma taastuvenergeetikat kasutava riigiga, seetõttu on sealt kasvanud välja mitmed edukad ettevõtted, kes toodavad laialt kasutatavaid hakkepuidu gaasistamisel põhinevaid koostootmisjaamasid seeriatootmises. Näiteks Burkhardt GmbH ja Spanner Re². Vaatamata laialdasele müügile ei ole investeeringute suurus avalik info. Samas peatükis on toodud ülevaade ka Rootsis ja Taanis kasutusel olevatest suurematest koostootmisjaamadest, mis kasutavad gaasistamise tehnoloogiat. Erinevates teadusartiklites on uuritud gaasigeneraatorite tehnilisi parameetreid, samuti võrreldud teiste tehnoloogiatega, millest antakse peatükis ka lühiülevaade.

Töö üheks peamiseks väljundiks on kindlasti läbitöötatud materjalide põhjal koostatud andmebaas erinevatest seeriatootmises olevatest gaasistamisprotsessi kasutatavatest koostootmisjaamadest, praktikas kasutusel olevates suure võimsusega jaamadest kui ka andmed erinevatest teadusartiklitest, kus ei ole alati võimalik seostada esitatud materjali konkreetse jaamaga.

Andmebaasi alusel koostatakse iseloomulike näitajate kohta graafikud, mille põhjal on võimalik teha üldistusi ja selgitada välja keskendatud näitajad vastavalt jaama elektrilisele või soojuslikule võimsusele.

Töö viimane osa on teoreetiline arvutus kolme erineva suurusega asulale, kus soojustarbimine on 500 MWh, 5000 MWh ja 15 000 MWh. Tasuvusanalüüsis arvestatakse ka taastuvenergia toetust esimeseks 12.aastaks vastavalt toodetud elektri kogusele. Kõik tehnilised näitajad koostootmisjaama parameetrite kohta saadakse andmebaasi töötlemisel saadud sõltuvustest. .

Käesoleva magistritöö põhieesmärkideks on hinnata gaasistamistehnoloogia rakendamise otstarbekust gaasimootoritel põhineval koostootmisel erineva suurusega asulates ning hindamise otstarbeks koguda ja süstematiseerida seadmete tehnilised ja majanduslikud näitajad.

1. Koostootmine Eestis

1.1. Koostootmise olemus ja tehnoloogiad

Soojuse ja elektri koostootmine (*CHP – combined heat and power*) on protsess, mille käigus väljastatakse ühest seadmest kaht liiki energiat – soojust ja mehaanilist energiat:

- soojust saab kasutada tehnoloogilistes protsessides, tarbevee soojendamiseks ja ruumide kütteks või absorptsioonil põhinevate jahutusprotsesside käitamiseks kaugjahutussüsteemides;
- mehaaniline energia muudetakse tavaliselt elektriks, kuid seda saab kasutada ka pumpade, kompressorite ja ventilaatorite otseseks käitamiseks. [4]

Majandus- ja kommunikatsiooniministri poolt on koostatud määrus nr 30 „Tõhusa koostootmise nõuded“, kus §4 tuuakse välja erinevad koostootmistehnoloogiad:

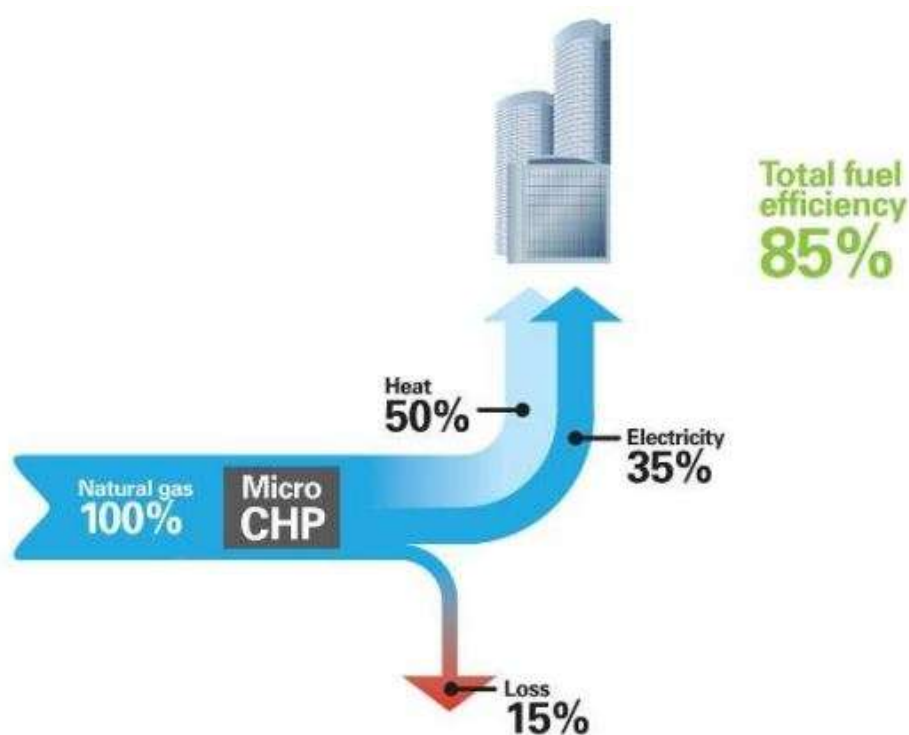
- kombineeritud tsükliga gaasiturbiin koos utilisaatorkatlagaga,
- vasturõhu auruturbiiniga koostootmiseseade,
- vaheltvõttudega auruturbiiniga koostootmiseseade,
- gaasiturbiin koos utilisaatorkatlagaga,
- sisepõlemismootor,
- mikroturbiin,
- stirlingmootor,
- kütuseelement,
- aurumootor,
- orgaanilisel Rankine'i ringprotsessil põhinev koostootmiseseade,
- muud tehnoloogiad või nende kombinatsioonid, mis vastavad koostootmise mõistele.

[5]

1.2. Koostootmise eelised

Koostootmine on termodünaamiliselt parim viis kütuse kasutamise efektiivsuse suurendamiseks: väheneb kütusekogus, väheneb emissioon toodetud energiaühiku kohta, mõlemat energialiiki saab toota nende eraldi tootmisest madalama hinnaga, kasutatavad seadmed on eksploatatsioonis paindlikud ja talitluskindlad. [4]

Elektrienergia ja soojuse koostootmisel on kütuse kasutamise kogukasutegur tavaliselt 85–92% (vt Joonis 1), seega on see võrreldav tänapäevase lokaalkatlamaja katla kasuteguriga soojuse tootmisel. [4]



Joonis 1 Koostootmise eelised [6]

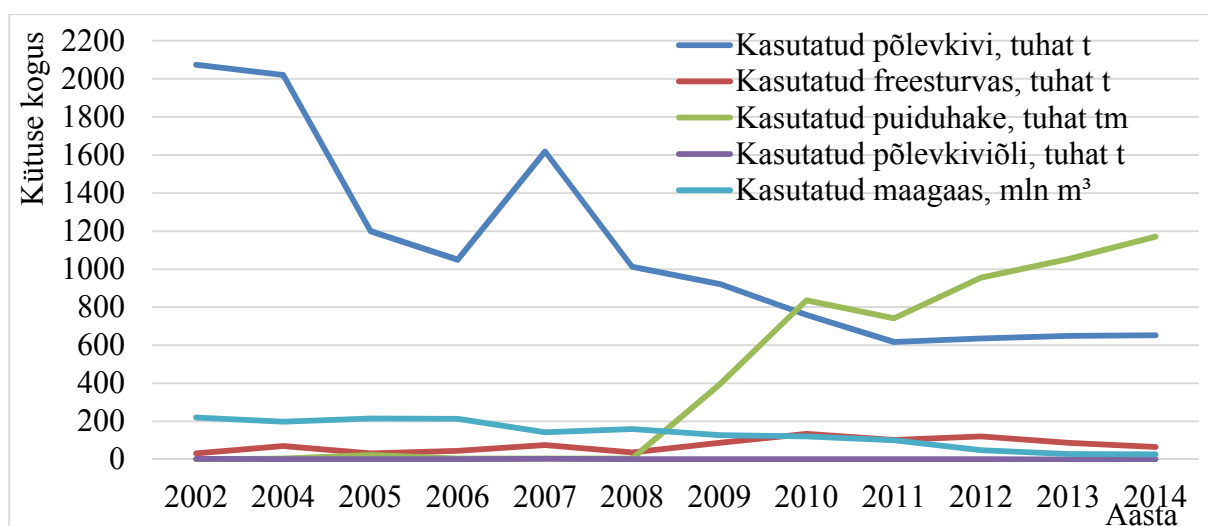
Soojuse ja elektri koostootmise eelised:

- energia muundamise suurem kasutegur (15–40% suurem kui elektri ja soojuse eraldi tootmisel);
- väiksem keskkonna saastamine, eriti CO₂ osas;
- kulude kokkuhoid, lisanduv konkurentsivõimelisus tööstus- ja äritarbijatele, pakkudes vastuvõetava hinnaga soojust kodutarbijale;
- elektritootmise detsentraliseerimine, vähendades ülekandekadusid ja suurendades süsteemi paindlikkust;
- varustuskindluse parandamine – kohalik koostootmine vähendab riski, et tarbija jääb ilma elektrita;
- väheneb kütusekulu ning riigi sõltuvus kütuseimpordist; suureneb tööhõive kohalike kütuste kasutamisel, uued töökohad maapiirkondades.[4]

1.3. Koostootmise areng Eestis

Võrreldes omavahel Statistikaametist leitavaid vanemad ja värskemad andmeid (2002.a ja 2014.a vastavalt) kütteallika järgi, siis on koostootmises kasutatavad kütuste liigid muutunud väga oluliselt.

Jooniselt 2 on näha, et aastal 2008.a hakkas oluliselt langema põlevkivi osakaal (2002.a 2075 tuhat t, 2014.a 652 tuhat t) ja kasvama puiduhakke kogus, mis 2014.a ulatus 1170 tm-ni. Põhjuseks, et alates 2008.a alustasid tööd erinevad puiduhaket kasutavad jaamad, näiteks Tallinna elektrijaam, Tartu, Pärnu, Paide ja Rakvere koostootmisjaamad ning Iru prügipõletusjaam. Stabiilselt väikeses languses on olnud maagaasi kasutus koostootmises, freesturvas ja põlevkiviõli on püsinud stabiilsena.



Joonis 2 Eesti koostootmisjaamades kasutatud kütus 2002-2014, va 2003.a [7]

Eestis kasutusel olevatest koostootmisjaamadest on ühendatud kaugküttevõrku (Tabel 1) esitatud jaamad.

Tabel 1 Koostootmisjaamad Eesti kaugküttevõrkudes [8]

Asukoht	Kütus	Tarbimine, GWh	Seadme nimetus	Soojuslik võimsus, MW	Elektriline võimsus, MW
Tallinn	hakkepuit, turvas	1 785	Tallinna SEJ	68	24
	maagaas		Iru SEJ	190	380
	olmejäätmed		Iru SEJ (jäätmeenergiaplokk)	50	17
Tartu	hakkepuit, turvas	456	Tartu SEJ	60	25
Pärnu	hakkepuit, turvas	174	Pärnu SEJ	46	24
Narva	põlevkivi	436	Balti SEJ 11. plokk	160	215
		294	VKG Põhja SEJ;	70	27

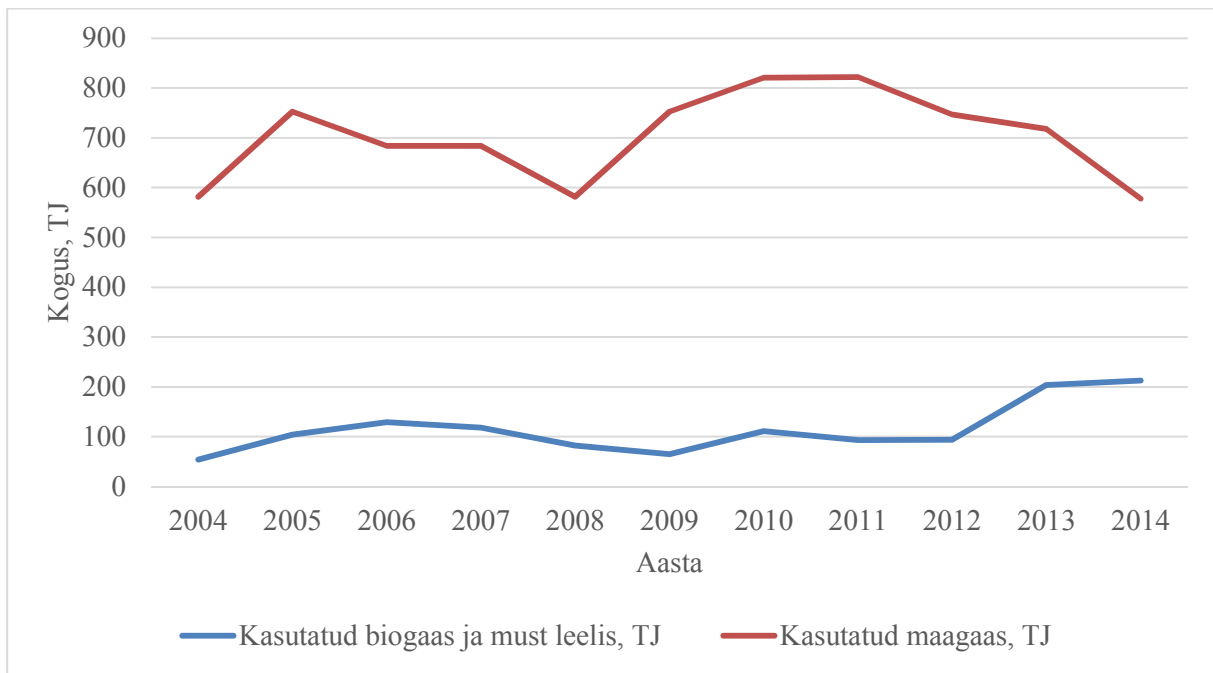
Kohtla-Järve; Jõhvi	põlevkivi, generaatorigaas		VKG Lõuna SEJ		
Kiviõli	põlevkivi, generaatorigaas	34	Kiviõli Keemiatööstuse SEJ	20	10 (töös olev: 4 MW)
Sillamäe	põlevkivi, maagaas	182	Sillamäe SEJ	94	18
Kuressaare	hakkepuut	66	Kuressaare SEJ	9,6	2,4
Paide	hakkepuut	51	Pogi SEJ	8	2
Põlva	maagaas	28	Põlva gaasimootor	1,25	0,9
Viljandi	maagaas	83	Viljandi gaasimootor	2	2
Võhma ¹	puugaas	5	Võhma gaasimootor	0,46	0,2
KOKKU				779,3	741,5

Märkused: ¹ - pankrotistunud, pole töös

Statistikaameti poolt avaldatud andmetest (vt Tabel 2 ja Joonis 3) Eesti koostootmisjaamade kohta, kus kasutusel oli kütusena gaas, on näha, et 11 aastaga on kasvanud mootorite arv 42% ja toodetud elektrienergia kogus 29%. Seejuures on kasvanud kasutatud biogaasi ja musta leelise kogus neli korda, maagaasi kogus on jäänud praktiliselt samale tasemele.

Tabel 2 Statistika Eesti koostootmisjaamade kohta, kus kasutusel sisepõlemismootorid [7]

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Mootorite arv	11	11	14	14	14	14	14	12	13	15	19
Maksimaalne elektrivõimsus, MW	18	18	19	19	19	17	20	18	17	19	23
Maksimaalne soojuse väljundvõimsus, MW	20	21	22	22	22	20	21	19	17	20	24
Toodetud elekter, GWh	65	90	84	81	71	86	96	103	97	98	92
Toodetud soojus, GWh	67	97	99	95	78	95	114	103	90	108	87
Kasutatud maagaas, mln m ³	17	22	20	20	17	22	24	24	22	21	17
Kasutatud biogaas ja must leelis, TJ	54	104	129	118	82	65	111	93	94	204	213
Kasutatud maagaas, TJ	..	..	..	..	..	..	..	822	747	718	578



Joonis 3 Koostootmisjaamades kasutatud biogaasi ja musta leelise ning maagaasi kogused[7]

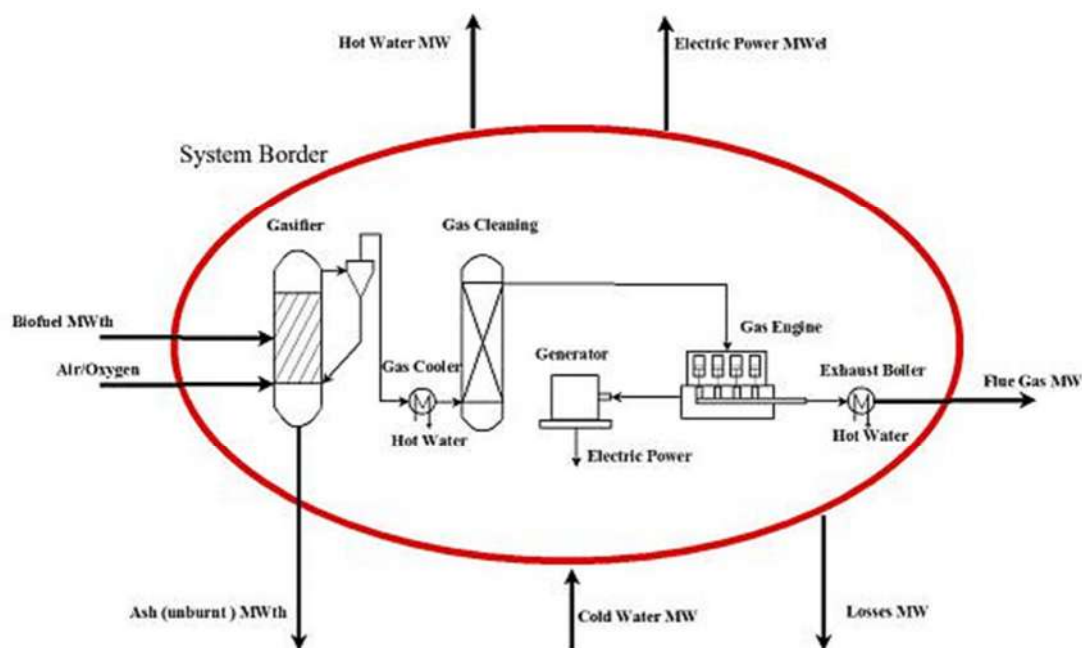
2. Puugaasi tootmise tehnoloogiad ja kasutus

Euroopas

Biomassi gaasistamisel on olnud väga pikk ajalugu- II maailmasõja ajal ja järel olid puugaasikütusel sõitvad autod mitmes Euroopa riigis tavalised. [9] Kahjuks stabiilsematel aegadel ei ole biomassi gaasistamistehnoloogiatel märkimisväärset arendustegevust toimunud ja ka kaasajal on puudus teadmistest ja edukast praktikast. Samas on arendustegevus mõnevõrra hoogustunud, sest on kasvanud surve energia koostootmisele taastuvatest allikatest.

Töötav biomassi gaasistamisprotsess tagaks ressursside parema ja efektiivsema kasutamise, sest gaasistamisprotsessiga tekib võimalus kasutada biomassi energiaallikana seadmetes, kus muidu ei ole võimalik kasutada tahkeid kütuseid, näiteks sise põlemismootorites.

Tänu hajaenergeetika järjest kasvavale arengule ja populaarsusele on kasvanud ka vajadus väiksema võimsusega koostootmisjaamade ning energia ressursside parima kasutuse järele.



Joonis 4 Biomassi gaasistamist kasutava koostootmisjaama skeem [10] Tõlge: Biofuel- biokütus; Air/Oxygen- õhk/hapnik; Gasifier- gaasigeneraator; Gas Cooler- gaasi jahuti; Hot Water- kuum vesi; Gas Cleaning- gaaside puhastamine; Gas Engine- gaasi mootor; Exhaust gas boiler –heitgaaside soojusvaheti; Hot Water- kuum vesi; Flue Gas- suitsugaasid; Losses- kaod; Cold Water- külm vesi; Ash- tuhk; System Border- süsteemi piir; Electric Power- elektriline võimsus;

Joonis 4 on esitatud koostootmisjaama põhimõtteline skeem, kus väga lihtsustatult biomass gaasistatakse gaasistamisseadmes, seejärel gaas jahutatakse ja puhastatakse. Toodetud gaas juhitakse gaasimootorisse, kus see muudetakse generaatori abil elektrienergiaks. Mootori ja mootoriõli jahutamisel tekkinud jääksoojust kasutatakse küttsüsteemides.

2.1. Puidugaasistamise alused

Puugaas tekib puidu kuumutamisel (üle 700°C), puidu termokeemilisel lagundamisel ehk pürolüüsi toimel. Puugaasi põlevosa koosneb peamiselt süsinikoksiidist ehk vingugaasist (CO), vesinikust (H₂) ja metaanist (CH₄). [12]

850⁰ C juures auruga konversioonil saadud gaasi koostis mahuliselt on: H₂=51,8%, CO=45,1%, CO₂=2,7% ja CH₄=0,4%. Saadud gaasi saab kasutada kütusena gaasimootorites, gaasiturbiinides, kateldes aga ka majapidamises toidu valmistamisel.[6]

Kütuse gaasistamise protsess koosneb järgmistest etappidest:

- kütuse kuivamine, millele järgneb kütuse pürolüüs (tahke kütuse muundamine gaasiks, kondenseeritavateks aurudeks ja tõrvaks ning vaikudeks);
- järgneb aurude termiline krakkimine veeauru või süsinikdioksiidi toimel gaasiks ja tõrvaks ning vaikudeks;
- tõrva ning vaikude gaasistamine veeauru või süsinikdioksiidi toimel;
- põletatava gaasi, aurude ja tõrva ning vaikude osaline oksüdeerumine.[14]

Pürolüüsietapp on kergelt endotermiline ja temperatuuridel üle 500 °C saadakse 75–90 massiprotsenti lendainetest. Saadava gaasi saagised, kondenseerimisvõimelise auru (sh tõrvad ja vaigud) ja järele jääva tahke jäägi kogused sõltuvad peamiselt kuumutamise määrast ja lõpptemperatuurist.[14]

Protsessi kõrge temperatuur on sõltuvalt reaktori tüübist saavutatav mitmeti:

- osa toodetud gaasist suunatakse tagasi reaktorisse ja põletatakse koos ligilähedaselt stöhhiomeetrilise koguse hapnikuga;
- pürolüüsil jäägina saadud tõrvad ning vaigud põletatakse kohapeal või eraldi;
- lähtematerjal osaliselt põletatakse.[14]

Gaasistamise käigus juhitakse protsessi vähem hapnikku kui täielikuks põletamiseks vaja (liigõhutegur on 0,2-0,4, st antakse kuni 60% täielikuks põlemiseks vajalikust õhuhulgast). Maksimaalne energia muundatakse gaasi energiaks. [12]

Gaasistamisprotsessi eesmärk on muuta tahke kütus maksimaalselt ära kasutatavaks gaasiks-
H₂ ja CO (biomassi gaasistamisel tekkivad peamised ühendid on toodu Tabel 3).

Tabel 3 Biomassi gaasistamisel tekkivad peamised ühendid[13]

Soovitud ühendid	CO, H ₂ , CH ₄ , C ₂ H _x , C ₃ H _x
"Inert" mittepõlevad ühendid	CO ₂ , H ₂ O, (N ₂)
Saasteained	NH ₃ , HCN, teised lämmastiku ühendid H ₂ S, COS, CS ₂ , teised väävli ühendid HCl, NaCl ja KCl aerosoolid
Kondenseeruvad ühendid	Benseen, toluen, xüleen (BTX), tõrv, hetero- orgaanilised ained, vesi
Osakesed	Tolm, mineraalsed ained/soolad, süsi, aerosoolid

Biomassi gaasistamisel saadav gaas on nn keskmise kvaliteediga gaas, mille kütteväärtus on piires 10-18 MJ/m³. See gaas on otse põletatav sisepõlemismootorites (otto ja diisel mootorites), mis käitavad soojuse ja elektri koostootmisjaamasid, soojuspumpade kompressoreid või liiklusvahendeid. See on puhastatav juhtimiseks gaasivõrku või muundatav metanooliks.[12]

Kasutusel on järgnevad gaasi kütusena kasutatavad tehnoloogiad:

- Auruturbiinid;
- Aurumasinad, aurumootorid;
- Orgaaniline Rankine'i ringprotsessiga seadmed;
- Gaasimootorid.[6]

Järgnevas töös keskendutakse eelkõige gaasimootoriga tehnoloogiatele.

2.2. Gaasistamise seadmed ja tehnoloogiad

Kasutusel on mitmesugused biomassi gaasistamise võimalused:

Liikumatu kihiga (*fixed bed*):

- Vastuvoolu (*updraft gasifier*)
- Päri voolu (*downdraft gasifier*)
- Ristivoolu (*side draft gasifier*)

Keevkihtreaktorid (*fluidized bed*):

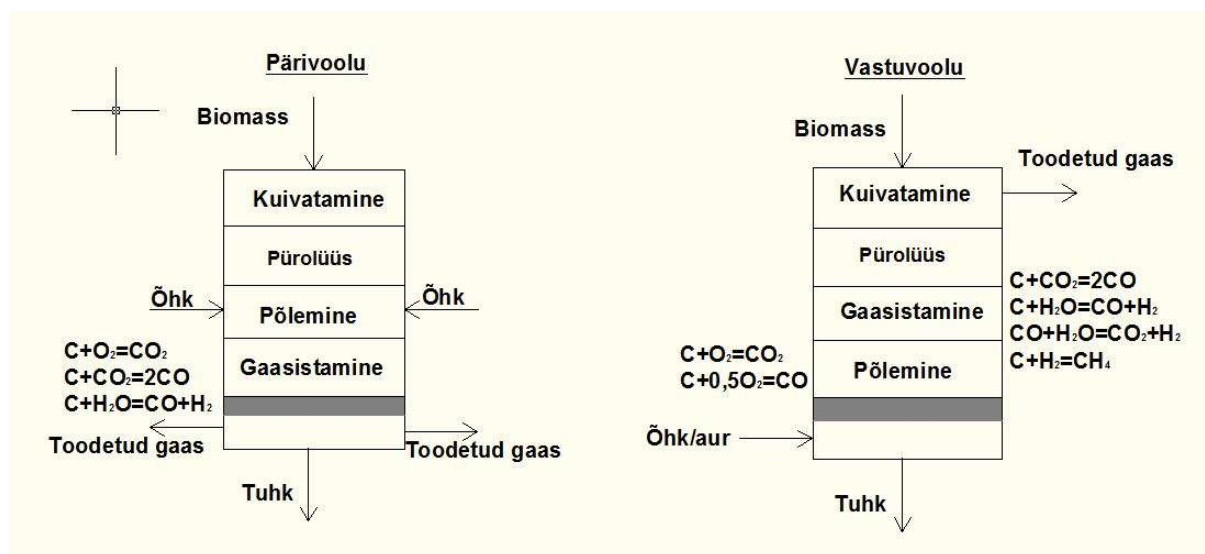
- Mulliv keevkihtreaktor (*bubbling fluidized bed gasifier*)
- Tsirkuleeriv keevkihtreaktor (*circulating fluidized bed gasifier*)

Läbivoolu reaktor (*entrade flow gasifier*). [14]

Liikumatu kihiga reaktorite korral toimub kütuse etteanne reaktori pealt. Kütus liigub reaktoris raskusjõu mõjul aeglaselt alla, reageerides samal ajal õhuga. Keerukate keemiliste gaasistamisreaktsioonide tulemusena saadakse generaatorgaas. Reaktori põhja koguneb tuhk, mis eemaldatakse. [14]

Vastuvoolu reaktorist väljuv generaatorgaas (300–600 °C), mis sisaldab suurel määral tõrvaühendeid, tahma ja tuhka, on sobilik otse gaasipõletis kasutamiseks. Mootorites kasutamiseks peab generaatorgaasi eelnevalt jahutama ja puhastama. Selle reaktori eelis seisneb seadme lihtsuses, efektiivsuses, võimaluses kasutada eri tüüpi kütuseid ning madalas generaatorgaasi väljumistemperatuuris. Puudused on eelkõige seotud tõrvaühendite eemaldamise vajadusega generaatorgaasist. [14]

Pärivoolu reaktor võimaldab toota generaatorgaasi (700–750 °C) mis ei sisalda tõrva, küll aga tahma ja tuhaosakesi. Pärast jahutamist ja puhastamist on generaatorgaas sobilik kasutamiseks sisepõlemismootorites. Pärivoolureaktori peamine eelis ongi tõrvavaba generaatorgaasi tootmine ja selle kasutusvõimalus sisepõlemismootorites. Puuduseks on reaktori väike efektiivsus ja selle tundlikkus kütuse omaduste suhtes. [14]



Joonis 5 Liikumatu kihiga pärivoolu ja vastuvoolu gaasigeneraator [18] [15]

Liikumatu kihiga gaasigeneraatorid on lihtsa ülesehitusega ja kergesti opereeritavad, sobides kasutuseks väikeste, kuni mõne kW_{th} soojuskoormusega piirkondades. Võimalik on seadmed tööle panna tsükliliselt või ka pideval režiimil. [19]

Järgnevalt (Tabel 4) on toodud nii vastu-, päri-, kui ka ristvoolu gaasigeneraatori põhilised omadused.

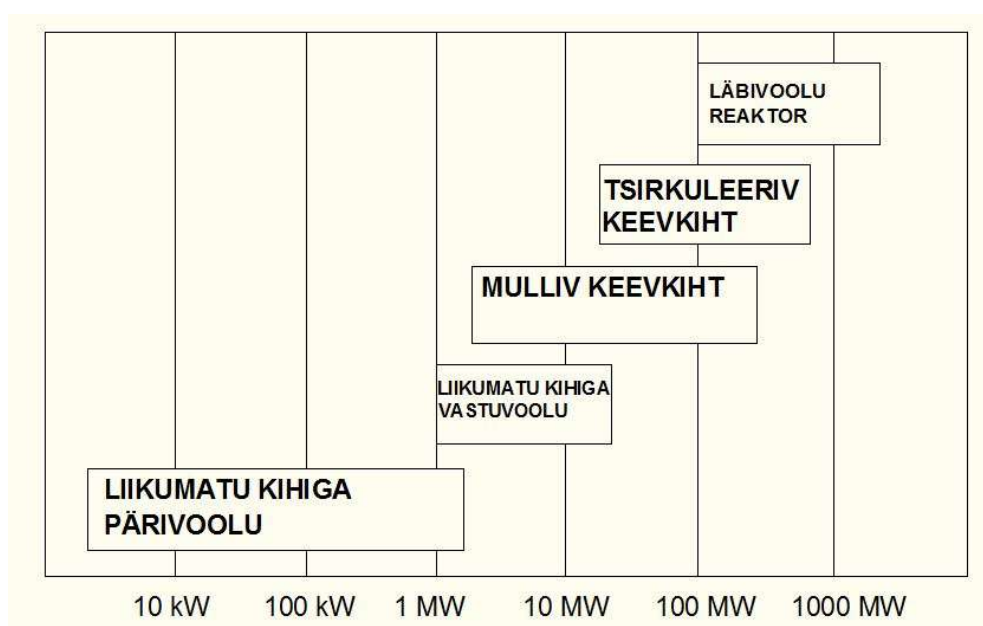
Tabel 4 Vastu-, päri- ja ristvoolu reaktorite erinevad omadused [19]

Kütus (puit)	Pärivoolu	Vastuvoolu	Ristivoolu
Niiskussisaldus, %	12 (max 25)	43 (max 60)	10-20
Tuhk, % kuivainest	0,5 (max 6)	1,4 (max25)	0,5-1,0
Kütuse suurus, mm	20-100	5-100	5-20
Gaasi temp (0C)	700	200-400	1250
Tõrvad (g/Nm ³)	0,015-0,5	30-150	0,01-0,1
LHV (MJ/Nm ³)	4,5-5,0	5.0-6.0	4,0-4,5
Võimsus , MWth	<5	<20	madal (~10 kW)

Ristivoolureaktor on tehnoloogilise lahenduse poolest üks lihtsamaid reaktoreid. Sellest väljuv generaatorgaas (1500 °C ja kõrgema temperatuuriga) on väikese tõrvasisaldusega (eeldusel, et kasutatakse nõutava kvaliteediga kütust). Reaktori eeliseks on lühike käivitusae ja kiire seadme koormuse muutmine. Peamised puudused on seotud väljuva generaatorgaasi kõrge temperatuuri ja suure voolukiirusega ning tundlikkusega kütuse omaduste suhtes. [14]

Keevkihiga reaktorites antakse reaktori alt nii õhk (aur ja/või hapnik on samuti kasutatavad), mis tekitab inertsest materjalist (nt liiv) keevkihi, kui ka peened kütuseosakesed, mis suunatakse otse keevkihi peale. Tänu reaktoris tekkivale heale soojuse- ja massilevile on seadmes temperatuur ühtlasem ja keemilised gaasistamisreaktsioonid kiiremad. Toodetav generaatorgaas suunatakse tsüklonisse, kus eemaldatakse lendtuhk ja inertsed osakesed. Keevkihiga reaktoreid on kahte tüüpi: mulliva ja tsirkuleeriva keevkihiga reaktorid. [14]

Erinevatele võimsustele vastavalt valitakse ka sobiv gaasistamise tehnoloogia (vt Joonis 6).

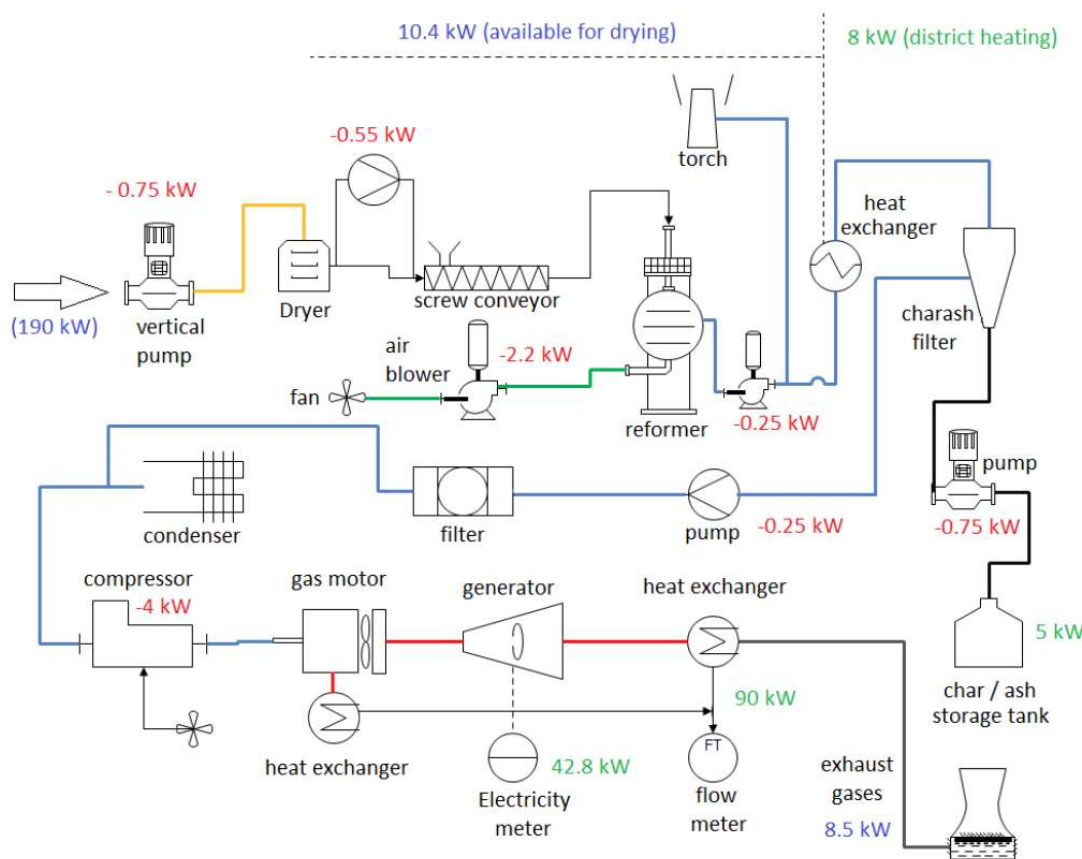


Joonis 6 Erinevate gaasistamistehnoloogiate sobivus vastavalt võimsusele [18]

2.3. Energia bilanss

Itaalias, Lõuna-Tirolis on teostatud uuring väikeste puugaasistamise tehnoloogial põhinevate koostootmisjaamade kohta, et hinnata nende tulemuslikkust. Vaadeldi kahe pärivoolu gaasigeneraatori tööd, mis on ühendatud gaasi kütusena kasutava koostootmisjaamaga. Kasutatakse puiduhaket, mille niiskussisaldus on alla 10%, see juhitakse läbi õhukindla tigukonveieri põhireaktorisse.[20]

Koostootmisjaamas toodetakse elektrilist võimsust $42,8 \text{ kW}_e$ ja soojuslikku 98 kW_{th} . Võttes arvesse biomassi omadused, on elektriline kasutegur 23% ja üldine kasutegur 74%. Sellele tuginevalt on 1 kWh elektri tootmiseks vajalik $0,93 \text{ kg}$ hakkepuitu. Läbi soojusvaheti saadakse $18,4 \text{ kW}$ soojust, kuid suur osa sellest on vajalik ära kasutada puiduhakke eelnevaks kuivatamiseks. [20]



Joonis 7 Energiabilanss puitu gaasistavas koostootmisjaamas [20] Tõlge: vertical pump-vertikaalpump; dryer-kuivati; screw conveyor-tigukonveier; reformer-gaasigeneraator; air blower-õhupuhur; fan-ventilaator; torch-tõrvik; heat exchanger-soojusvaheti; charash süsi/tuha tsüklon; condenser-kondensaator; compressor-kompressor; gas motor-gaasi mootor; electricity meter-elektrimõõtur; flow meter-vooluhulga mõõtja; exhaust gases-heitgaasid; char/ash tank-sõe/tuha mahuti

Joonis 7 on näha, et peamised energiat tarbivad seadmed on õhupuhur ja kompressor, pumpade poolt tarbitakse energiat oluliselt väiksemas mahus. Üldine kasutegur on kokku 74%.

Protsessi sisenevast 190 kW saadakse kokku 140,8 kW kasulikku energiat, ülejäänud 49,2 kW on kadu.

2.4. Tooraine iseloomustus

Hakkepuidu vajadus puidu gaasistamisel on keskmiselt 1 kW elektrilise võimsuse kohta umbes 1 kg tunnis ning seejuures eraldub ka ligikaudu 2 kWh soojust. [12]

Gaasistamisel kasutatava hakkepuidu niiskussisaldus mõjutab otseselt jaama efektiivsust- mida suurem niiskussisaldus, seda väiksem kasutegur. Soovitatav suhtelise niiskuse vahemik on puugaasi koostootmisjaamade toorainel vahemikus 10-15%, võrdluseks kasvava puu niiskussisaldus on vahemikus 40-60%.

Puidu kuivamisel saavutab puit sõltuvalt kuivamistingimustest küllastusolukorra, st püsiva niiskuse taseme. Väliitingimustes kuivavad halupuud umbes 20 – 25 % niiskuseni ja sellise niiskusega puid nimetatakse õhukuivaks. Toatingimustes kuivaksid puud umbes 8 – 15 % niiskuseni ja selleni kuivatatud puid nimetatakse mõnikord toakuivaks.[21]

Gaasisti normaalse toimimise ja efektiivsuse tagamiseks peavad olema kütusel teatud omadused. Gaasistamisprotsessi mõjutavad eelkõige kasutatava kütuse omadused: [14]

niiskus – suur niiskusesisaldus põhjustab toodetava generaatorgaasi madalat kütteväärtust ja probleeme tõrvasisaldusega,

tuhasus ja tuha keemiline koostis – võib põhjustada reaktori šlakkumist,

lendainesisaldus – suur lendainesisaldus halvendab generaatorgaasi kvaliteeti ja tekib vajadus generaatorgaasi puhastamiseks enne mootorites kasutamist,

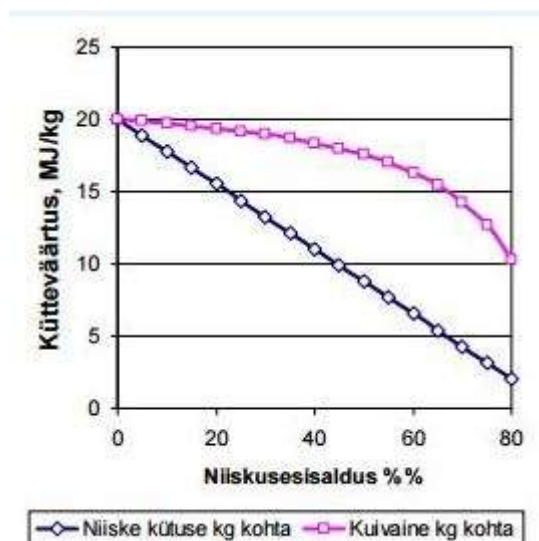
põlevainete elementkoostis ja muud olulisemad komponendid (nt N, S, Cl, leelismetallid, raskmetallid) mõjutavad gaasistamisreaktsiooni kulgemist,

morfoloogia ja mahukaal – võib tekkida probleeme kütuse etteandmisel (ummistused), see võib mõjutada gaasistamisreaktsiooni kulgemist ja toodetava generaatorgaasi kvaliteeti ning energeetilisi omadusi.[14]

Kütteväärtuseks nimetatakse kütuse massiühiku põlemisel vabanevat soojushulka. Ülemise kütteväärtuse arvutamisel eeldatakse, et nii kütuse niiskusest kui vesiniku põlemisproduktina suitsugaasidesse sattunud veeaur täielikult kondenseerub. Alumises kütteväärtuses

suitsugaasides sisalduva veeauru kondenseerumissoojust ei arvestata. Mida suurem on kütuse niiskus- ja vesinikusisaldus, seda suurem on erinevus ülemise ja alumise kütteväärtuse vahel. [21]

Vastavalt järgnevale joonisele (Joonis 8) on puidu niiskussisalduse ja kütteväärtuse vahel otsene seos- mida suurem niiskus, seda väiksem on kütteväärtus.



Joonis 8 Seos puiduhakke niiskussisalduse ja kütteväärtuste vahel [21]

Puitkütuste elementaarkoostises on valdavad kolm keemilist komponenti: süsinik (C), vesinik (H) ja hapnik (O), mis kokku moodustavad kuivainest umbes 99%. Lämmastikusisaldus (N) jääb tavaliselt alla 0,2 % ja väävlisisaldus (S) alla 0,05 % kuivainest. Väävlisisaldus pakub kütuses huvi eelkõige väävliheitmete tekkimise seisukohalt, kuid kõrgema väävlisisalduse korral võib mõjutada ka madalatemperatuurilist korrosiooni suitsukäikudes ja korstnas. Kuna kloor võib samuti põhjustada küttepinde korrosiooni, siis on oluline teada ka kütuse kloorisisaldust. Kloorisisaldus võib probleeme põhjustada näiteks okaspuu hakke põletamisel, kui okaste osatähtsus kütuses on suur. [21]

Tabel 5 Puidu elementaarkoostis[21]

Element, % kuivaines	Puit	Koor
C	48-50	51-66
H	6,0-6,5	5,9-8,4
O	38-42	24,3-40,2
N	0,5-2,3	0,3-0,8

S	0,05	0,05
Cl	<0,01	0,01-0,03

2.5. Puugaasi kasutuse omapärad võrreldes teiste tehnoloogiatega

2.5.1 Puidu gaasistamine võrreldes puidu otsese põletamisega

Puitu on efektiivsem ära kasutada põletamisel, kuna põlemisel energiakaod on suhteliselt minimaalsed, mis tekitab küsimuse- miks peaks üldse seejuures väga keerulise tehnoloogiaga püüdma puitu gaasistada.

Gaasistamine on paljulubav ja oluline biomassi muundamise viis. Peamine eelis seisneb võimaluses toota odavamatest kütustest, nagu biomass, süsi ja naftakoks, kõrgema energiaväärtusega gaasi või vedelkütust. Biomassil on kõrge potentsiaal energiasektoris, sellest mõned näited:

- Gaasimootorite kasutamisel on võimalik saavutada kõrgemat kasutegurit kui Rankini ringprotsessiga auruturbiinides;
- Maagaasi kasutavas jaamas on võimalik kasutada toorainena ka biomassist või orgaanilistest jäätmetest toodetud gaasi maagaasi asemel ning seeläbi vähendada sõltuvust imporditavast maagaasist, mis on tuntud väga suure varustuskindluse ja hinna volatiivsusega;
- Vett kasutatakse gaasistamisjaamades tunduvalt väiksemates kogustes kui tavalistes elektrijaamades. Kõik null-emissiooniga jaamad kasutavad gaasistamise tehnoloogiat.
- Gaasistamisjaamadest eraldub tunduvalt väiksemas koguses saasteaineid nagu SO₂ ja NO_x ning tahkeid osakesi. Saasteainete emissioon gaasistamisjaamadest on sarnane maagaasi kasutavate jaamadega;
- Gaasistamisjaamad toodavad vähem CO₂-te MWh kohta kui põlemisel põhinev aurujõul töötav elektrijaam;
- Tahkete jääkainete kontsentratsioon suitsugaasides on väiksem kui põletamissüsteemides. [15]

2.5.2 Gaasimootorid võrreldes gaasiturbiinidega

Itaalias teostatud uuringus vaadeldi biomassi energiaks muundamise võimalusi vahemikus 100-600 kW_e. Uuringus selgus, et kõrgeim efektiivsus (28%) saavutatakse gaasimootoriga

süsteemis. Selline süsteem pakub mitmeid eeliseid nagu kõrge elektriline efektiivsus väikeste võimsustega jaamades, samuti töökindlus ja hea funktsioneerimine isegi madalate koormuste juures. Peamiseks puuduseks on, et mootor võib kokku puutuda söövitavate põlemisproduktidega, millega kaasneb lühike hooldusintervall ja suuremad kulutused, mis võib kaasa tuua väiksema kasutatavuse. [10]

Gaasimootoriga süsteem töötab kõrgema efektiivsusega- 27,1% kui turbiinid. Kogu jaama maksumus on 6000 eur/kW_e gaasimootori puhul, kui gaasiturbiinide puhul on tegemist 7600 eur/kW_e kohta. Opereerimiskulud on seevastu kõrgemad gaasimootorite puhul (gaasimootoril 940 eur/a/kW_e, turbiinil 690 eur/a/kW_e), põhjustades ligikaudu sama kogumaksumuse kahel süsteemil. [10]

Gaasiturbiinide madalamad opereerimiskulud ei suuda kompenseerida kõrgemaid investeringukulutusi ning IRR on parim gaasimootoritel alates võimsusest 200 kW_e. [10]

2.5.3 Gasifitseerimisseadmed võrreldes teiste tehnoloogiatega

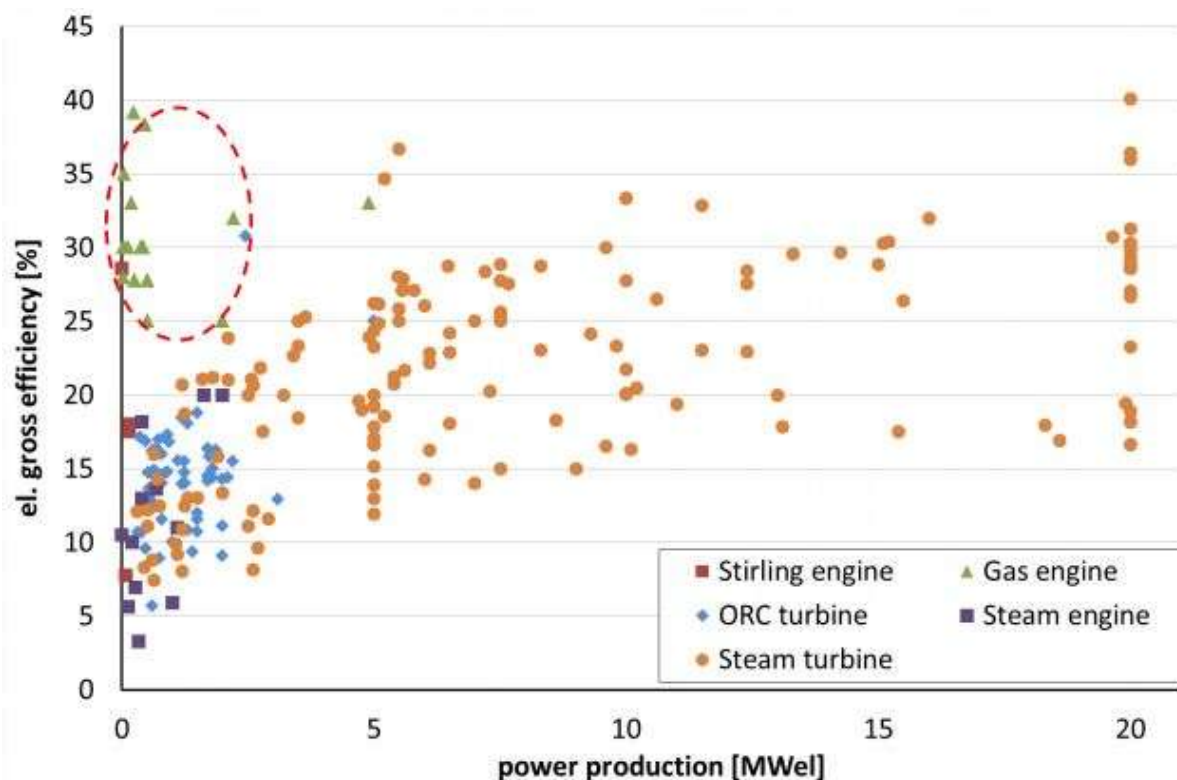
Biomassi kasutavate gaasigeneraatorite eelised:

- Kõrge elektriline efektiivsus, samuti kõrge kogukasutegur koostootmisjaamas;
- Elektri tootmine võimalik ka väikeste võimsuste juures;
- Madalad nõuded vastuvoolu ja keevkiht gaasistite puhul;
- Niiskuse protsent kütuses kuni 50% sõltuvalt gaasisti tüübist;
- Paindlik kütuste osas (hakkepuu ja pelletid);
- Madalad kütuse kulud. [16]

Puudused:

- Gaasigeneraator on kompleksne süsteem;
- Kõrged hoolduskulud;
- Kõrged nõudmised kütuse kvaliteedile;
- Vajalik heitgaaside töötlus [16]

Sisepõlemismootoritel baseeruvat elektrigenerereerimist, võrreldes teiste seadmetega, iseloomustab kõrge elektriline efektiivsus madalatel võimsustel nagu on näha Joonis 9



Joonis 9 Gaasigeneraatorite efektiivsus võrreldes teiste seadmetega [16]

2.6. Puugaasil töötavad koostootmisjaamad Euroopas

Viimasel aastakümnel on Euroopas kasvanud vajadus biomassist energia tootmise järele. Üheks põhjuseks on kindlasti erinevate rohetehnoloogiate areng ja keskkonnasäästlikum poliitika, läbi mille on finantseeritud ka gaasistamistehnoloogial põhinevaid koostootmisjaamasid, mille arv on aasta-aastalt kasvanud.

Puugaasi kasutamise juures koostootmisel on olnud palju tagasilööke. Tänapäeval on üha enam levimas väikeste pärivoolu töötavate gaasistite kasutamine, näiteks Spanner Re², mis suudavad toota gaasi koos vähese tõrva kogusega. Samuti on vajadus rohkete mõõtmis- ja monitoorimisseadmete järele, et teostada lihtsasti kaugjuhtimist ja hooldust. Näiteks Burkhardt GmbH ettevõtte pakub, kõrgel tasemel ja sobivat hooldust seadmetele. 2009.a Saksamaal teostatud uuring näitas, et gaasistite jõudlus ei sõltu ainult tehnoloogiast, vaid väga suures osas ka operaatori kogemustest ja oskustest ning hooldusele kulutatud ajast, sest isegi sama tehnoloogiaga seadmetel võib olla väga erinev tulemus. [13]

Valik biomassi gaasistavatest jaamadest Euroopas on toodud Tabel 6.

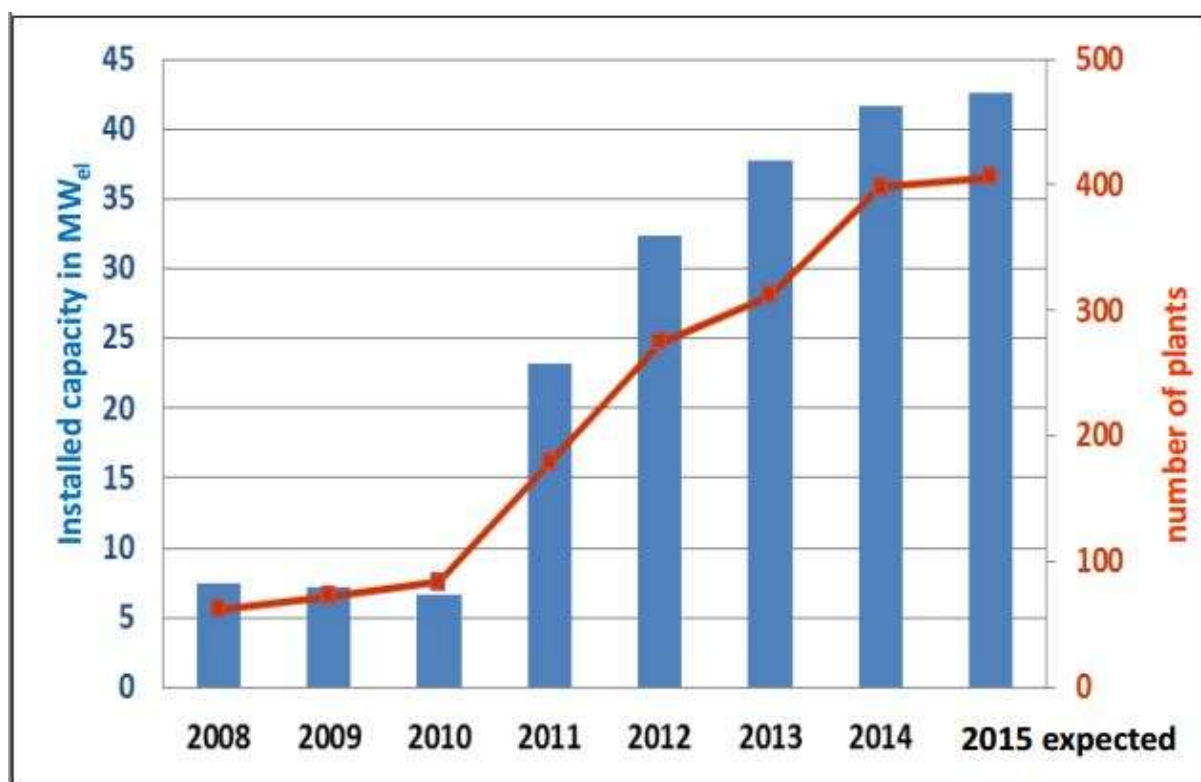
Tabel 6 Euroopas kasutusel olevad suuremad biomassi gasifitseerimisjaamad [22]

Jaama nimi, asukoht	Kütus	Toodang	Tehnoloogia
Skive, Taani	Lignotselluloosist, puidupellet	11 MW _{th} , 5,5 MW _e	Koostootmine
Harboøre, Taani	Lignotselluloosist, puidupellet	3,5 MW _{th} , 1 MW _e	Koostootmine
Barrit, Taani	Lignotselluloosist, puidupellet	140 kW _{th} , 35 kW _e	Koostootmine
Kgs. Lyngby, Taani	Lignotselluloosist, puidupellet	140 kW _{th} , 35 kW _e	Koostootmine
Cumbria, Suurbritannia	Lignotselluloosist	1 MW _e	Koostootmine
Mossborough, Suurbritannia	Lignotselluloosist, puidupellet	250 kW _e	Koostootmine
Neunkirchen, Austria	Lignotselluloosist, puidujäätmed, puit, biomass	620 kW _{th} , 300 kW _e	Koostootmine
Güssing, Austria	Lignotselluloosist, puiduhake	4.5 MW _{th} , 2.0 MW _e	Koostootmine
Oberwart, Austria	Lignotselluloosist, puiduhake	1–6 MW _{th} , 2.7 MW _e	Koostootmine
Neumarkt, Austria	Puit, biomass	580 kW _{th} , 240 kW _e	Koostootmine
Sulzbach-Laufen, Saksamaa	Puidu jäätmed, biomass	280 kW _{th} , 130 kW _{el}	Koostootmine
Neufahrn bei Freising, Saksamaa	Lignotselluloosist, puidujäätmed, puit	250 kW _{th} , 110 kW _{el}	Koostootmine
Langballig, Saksamaa	Lignotselluloosist, puiduhake	280 kW _{th} , 70 kW _{el}	Koostootmine
Carlow, Iirimaa	Lignotselluloosist, puiduhake	140 kW _{th} , 35 kW _{el}	Koostootmine
Wila, Šveits	Lignotselluloosist, kuivatatud tükid puidujäätmetest	425 kW _{th} , 350 kW _{el}	Koostootmine
Stans, Šveits	Lignotselluloosist, kuivatatud tükid lammutuspuidust	1.2 MW _{th} , 138 kW _{el}	Koostootmine
Geertruidenberg, Holland	Puidu jäätmed, lammutuspuit	30 MW _{el}	Kaaspõletamisest konverteerimine
Buggenum, Holland	Biomass /biomassi söe segud	280 MW _{th}	Kaaspõletamisest konverteerimine
Lahti, Soome	Lignotselluloosist, puiduhake, puidujäätmed, plastjäätmed	40–90 MW _{th}	Kaaspõletamisest konverteerimine
Värö, Rootsi	Lignotselluloosist, koored	35 MW _{th}	Kaaspõletamisest konverteerimine
Varkaus, Soome	Muud, puitkiust, plastikust, alumiiniumist	14 t/d, 50 MW _{th}	Sünteesiline gaasi tootmine
Groningen, Holland	Muud, biodiisli ja õlikeemiatoodete jäägid	200 000 t/a	Sünteesiline gaasi tootmine

Lisaks on gaasisteid, mis kuuluvad erinevate teadusasutuste juurde nagu Euroopa Komisjoni poolt rahastatavale organisatsiooni BRISK (*Biofuels Research Infrastructure for Sharing Knowledge*) partneritele (vt Lisa L.2).

Saksamaa on Euroopas taastuvenergeetika sektori kindel liider, seda ollakse ka gaasistamistehnoloogiate välja töötamisel ja seadmete tootmisel.

2015. a avaldatud uuringust on näha, et iga aastaga kuni 2014. a ni on Saksamaal järjest tõusnud biomassi kasutatavate gaasigeneraatorite arv ja puidugaasil töötavate jaamade elektriline võimsus. 2014. a jõustunud muudatused Saksamaa energeetikaalastes seadustes on kaasa toonud mõningase arengu pidurdumise nagu on näha ka järgneval joonisel:



Joonis 10 Saksamaa biomassi gaasistamist kasutatavate koostootmisjaamade arvu kasutuse muutused [23]; Tõlge: installed capacity on MW_{el}- installeeritud võimsus MW_{el} kohta; number of plants- jaamade arv

Suurimad biomassi baasil (ka puit) töötavate koostootmiseseadmete tootjad on Burkhardt, Spanner Re² ja REPOTEC, kelle jaamade abil toodetud energia moodustab valdava osa omas sektoris.[23]

Ettevõtte Burkhardt poolt toodetud jaamade kogu installeeritud elektriline võimsus on ligikaudu 16,5 MW, järgneb Spanner Re² 10 MW ja REPOTEC 5 MW installeeritud elektrilise võimsusega. Arvestades, et kogu installeeritud elektriline võimsus, mis toodeti biomassil töötavate koostootmisjaamadega oli 2015.a Saksamaal 42 MW, siis eelpool nimetatud ettevõtete poolt on sellest paigaldanud kokku 31,5 MW ehk 75%.

Eelnevalt nimetatud kolm suurimat ettevõtet Saksamaal toodavad aastas umbes 650 jaama, millest 300 eksporditakse üle Euroopa ja ka Jaapanisse ning Kanadasse.

Lisaks Saksamaale ka Soomes ja Rootsis on omandatud rohkelt kogemusi gaasistamise valdkonnas ning mõlemas riigis on olnud põhiline fookus uuringutel ja arengul. Taani on muutunud rahvusvaheliselt tunnustatud gaasistamise eksperdiks tänu kahe-etapilisele gaasigeneraatorile ja Pyroneer tehnoloogiale. Rootsil on 40 aastane traditsioon bioenergias ja biomassi gaasistamisel suurtes jaamades, samuti on loodud mitmeid uusi projekte nii koostootmiseks kui ka kütuse saamiseks. Rootsi biomassi gaasitamise areng on olnud seotud ülikoolide ja suurte ettevõtetega. Samas Taani arengu taga on olnud üksikute isikute panus ja entusiasm. Rootsi on arendanud mitmeid suuri jaamu, kuid Taani on keskendunud rohkem keskmise ja väikese suurusega jaamade arengule, seetõttu on ka Rootsi jaamade võimsus kuni 100 MW, samas kui Taani suurima jaama võimsus on 6 MW. [24]

Täpsemad andmed Rootsis ja Taanis rajatud biomassi gaasistamist kasutatavatest koostootmisjaamadest on toodud Lisas L.2.

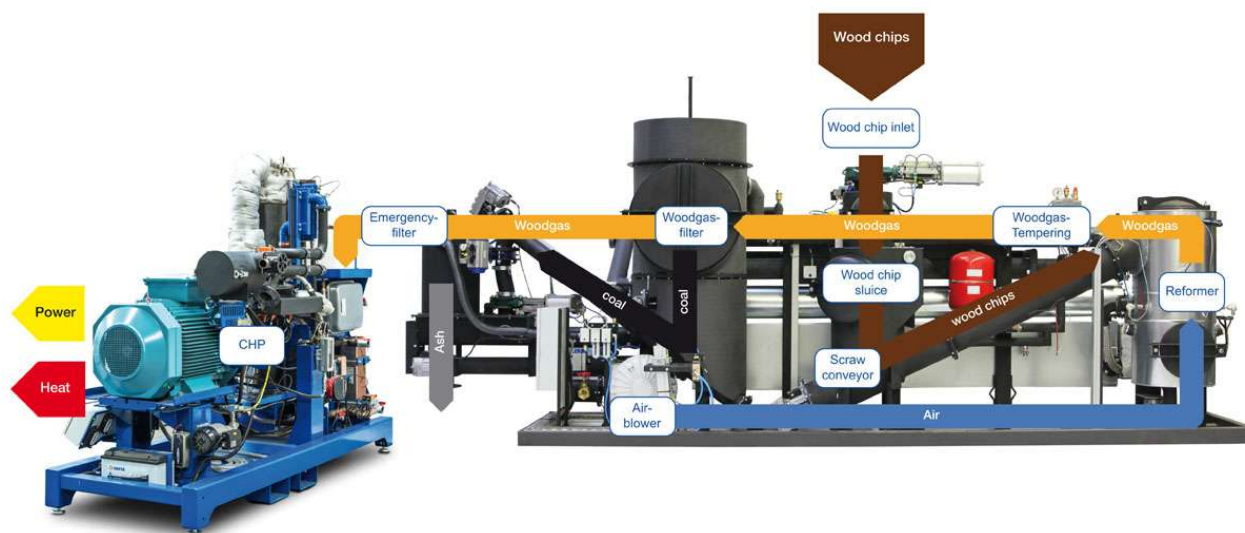
2.6.1 Gaasigeneraatorite tootjad

Ettevõtteid, mis toodavad koostootmisjaamasid, kus energia saamiseks kasutatakse puidust toodetud gaasi, on Euroopas mitmeid, kuid järkevalt vaadeldakse täpsemalt kahte Euroopa suurimat tootmisettevõtet ja lisaks nendele ka üht Soome tootjat, mille toodangut aktiivselt turustatakse ka Eestisse.

Spanner Re²

Üheks edukamaks koostootmisjaamade tootjaks, kus energia saamiseks kasutatakse puidu gaasistamise tehnoloogiat on Spanner Gruppi kuuluv ettevõtte Spanner Re² GmbH, kelle tootevalikus on erineva võimsusega jaamad. Ettevõtte eesmärgiks on arendada turule sobivaid ja kasutust leidvaid taastuvenergeetika tehnoloogiaid ning muuta toodang turule atraktiivseks.

Ettevõtte arendustegevuse tulemusena on välja arendatud ja patentitud koostootmisjaam, mis puitu gaasistades toodab elektrit ja soojust pakkudes tarbijatele paindlikkust. Suureks eeliseks on võimalus ära kasutada kohalikke puidu ressursse ja seeläbi saavutada ka kõrge majanduslik tasuvus. [25] Koostootmisjaama põhimõtteline skeem on toodud Joonis 11.



Joonis 11 Spanner Re² koostootmisjaam [25]; Tõlge: wood chips inlet- puiduhakke sissevool; woodchip sluice- puiduhakke lüüsi kanal; screw conveyor- tigukonveier; woodgas- puugaas; woodgas tempering- puugaasi jahutamine; woodgas filter- puidugaasi filter; emergency filter- hädaolukorra filter; CHP- koostootmisjaam; power- võimsus; heat- soojus; coal- süsi; air blower- õhupuhur; reformer- gaasigeneraator

Väiksematest koostootmisjaamadest on ainuüksi firma Spanner koostootmisjaamu Euroopas sadu (vt joonis Lisas L.2). Tegemist on 30 kW ja 45 kW elektrilise tootmisvõimsusega väikeste koostootmisjaamadega.

Burkhardt Energy

Saksa ettevõtte Burkhardt Energy koostootmisjaamad on samuti üle Euroopa väga laialt kasutusel, peamiselt Saksamaal, Itaalias ja Inglismaal.

Koostootmisjaam toodi turule aastal 2010, peale viis aastat kestnud arendustegevust. Protsessi tulemusena mõtestati ringi gaasistamisprotsess, kus puidupelletideid kasutatakse kütusena. Jaamas kasutatakse päriivoolu gaasistamise meetodit ja statsionaarselt keevkihtreaktorit, et muuta puidupelletid gaasiks ja toota korraga soojust ning elektrit.[26]

Kaart koostootmisjaamade leviku kohta on toodud Lisas L.2. Burkhardt Energy koostootmisjaama tüüplahendus on toodud Joonis 12.



Joonis 12 Burkhardt Energy koostootmisjaam [26]

Volter

Soome ettevõtte OY Volter on väljatöötanud ja paigaldanud väga kompaktsed koostootmisjaamad 11 asukohta Euroopas (Inglismaa ja Soome), lisaks üks jaam Austraalias ning üks Kanadas. [27] Koostootmisjaam toodab 100 kW veepõhist ja 20 kW õhupõhist soojust. Jaama tootmisvõimsust on võimalik muuta vahemikus 30-100%. [28] Eestis pakub selliseid koostootmisjaamasid ettevõtte „Green Fuel Energy“. Koostootmisjaama välisvaade on toodud Joonis 13.



Joonis 13 Volter koostootmisjaam [27]

2.7. Puugaasi kasutatavate koostootmisjaamade näitajad

Käesoleva töö raames koguti andmeid 60 gaasistamist kasutava koostootmisjaama kohta, mille andmed on esitatud Lisas L.1. Andmeid on kogutud erinevate tootjate seeriatootmises olevate seadmete kohta, näiteks Spanner Re², Volter, Burkhardt GmbH, GASEK jne. Samuti suuremate võimsustega töötavate jaamade kohta Euroopas näiteks: Guessing Austrias (2 MW_e), Lahti Soomes (20 MW_e), Skive (5,5 MW_e), Harboore Taanis (1 MW_e) ja Zeltweg Austrias (4,5 MW_e) jt. Kajastatud on ka andmeid erinevatest uurimustöödest, juhtumiuuringutest ja teadusartiklitest.

Lisas L.1 esitatud tabel sisaldab informatsiooni tehniliste parameetrite kohta- elektriline- ja soojuslikvõimsus, kasutegurid, töötunnid ning kütuse vajadus, samuti majanduslikke näitajaid- investeringumaksumused, opereerimise ja käidukulud. Viimaste kohta on andmete leidmine olnud kõige keerulisem, sest ka paljude tootjate kodulehekülgedel ei ole infot jaamade maksumuste ja käidukulude kohta. Parimad allikad selliste andmete saamiseks on olnud erinevad teaduspõhised uurimustööd ja artiklid. Kasutatud allikat iga referentsjaama kohta on samuti näidatud Lisas L.1. Jaamadele ja allikatele on omistatud järjekorranumbrid. Edasises käsitluses parima viitamise tagamiseks on kasutatud Lisas L.1 olevate jaamade/allikate järjekorra numbrit.

Andmebaasi analüüsina saadud graafikutel on toodud kõik vaadeldud parameetrid seoses elektrilise või soojusliku võimsusega MW või kW. Kütuse koguse leidmise juures on arvestatud soojusliku kasuteguriga.

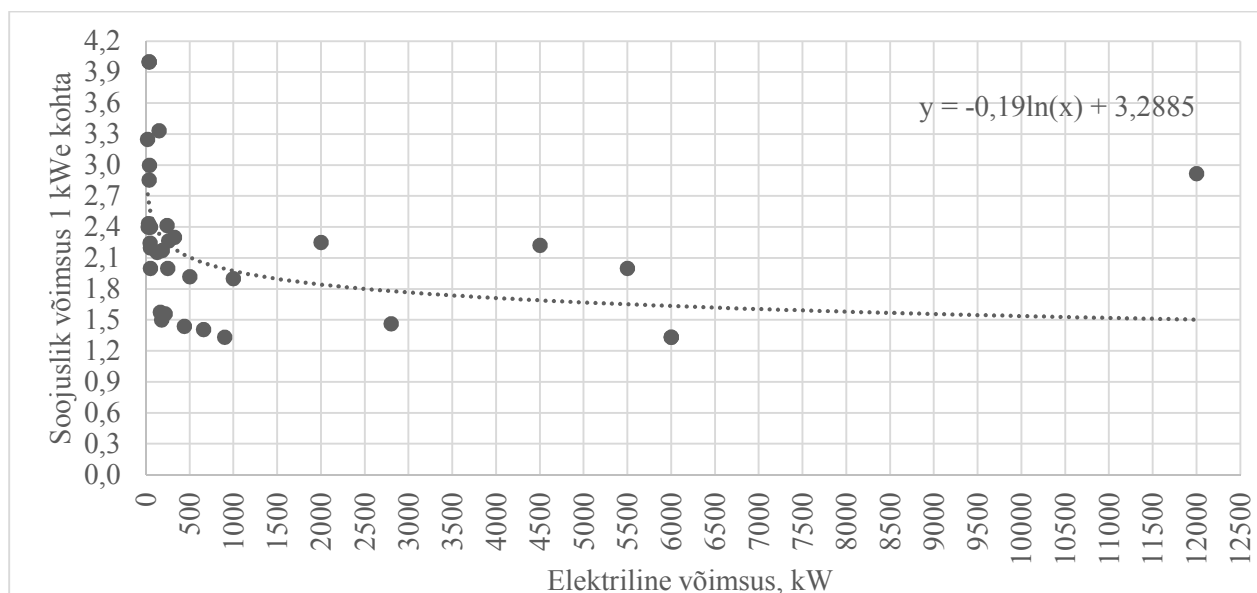
2.7.1 Tehnilised parameetrid

Koostootmisjaamast väljuva ja tagastuva vee temperatuurid on üldjuhul 90⁰C/ 60⁰C (Lisa L.1. jrk nr 6, ja 7). Esineb ka andmeid max90⁰C /max75⁰C (Lisa L.1, jrk nr 1), samuti max 85⁰C /max 65⁰C (Lisa L.1 jrk nr 11).

Koostootmisjaamade töötunnid on vahemikus 7000-8000 h

Soojuslik võimsus

Informatsioon jaamade elektriliste ja soojuslikest võimsustest on väga iseloomulik ja peaaegu alati ka esitatud jaamade kirjeldamisel. Soojusliku võimsuse iseloomustamisel on taandatud soojuslik võimsus 1 kW kohta elektrilisest võimsusest.



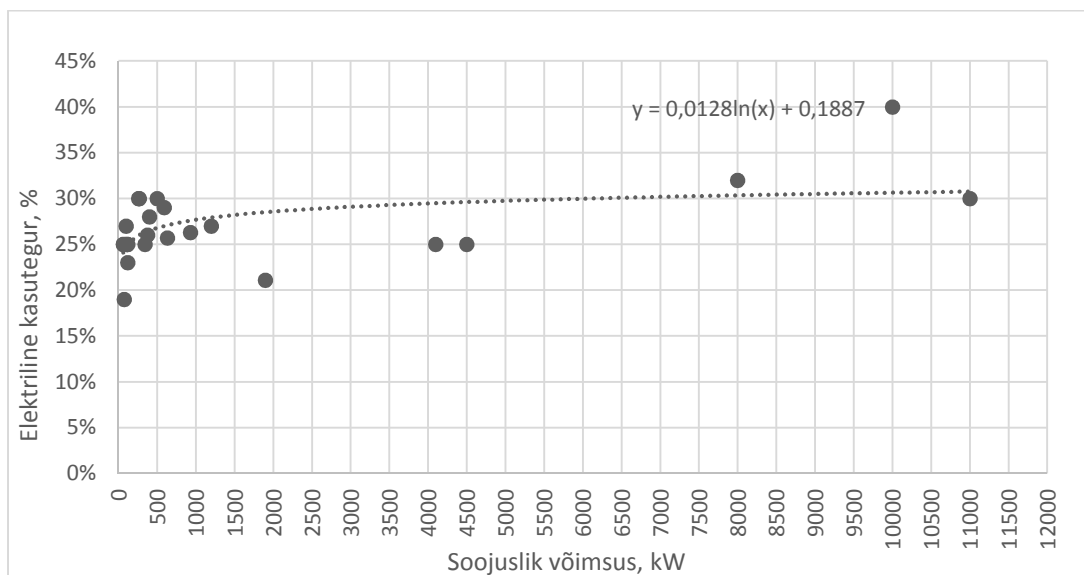
Joonis 14 Soojuslik võimsus 1 kWe kohta

Joonis 14 on näha, et iseloomulik on väiksematel võimsustel suurem soojuslik võimsus 1 kW elektrienergia kohta kui suurematel. Parim elektrilise ja soojusliku võimsuse suhe on Taanis asuval Lyngby jaamal (Lisa L.1 jrk nr 35). Tulemust mõjutab kindlasti asjaolu, et väiksemate võimsustega jaamade kohta on rohkem andmeid. Graafikult on eemaldatud kõige enam kõrvale kalduvad andmed- Lahti jaam Soomes (Lisa L.1 jrk 28).

Kasutegurid

Kasutegur on dimensioonita suurus, mis avaldub kasuliku energia ja seadmele antud koguenergia suhtena. [9]

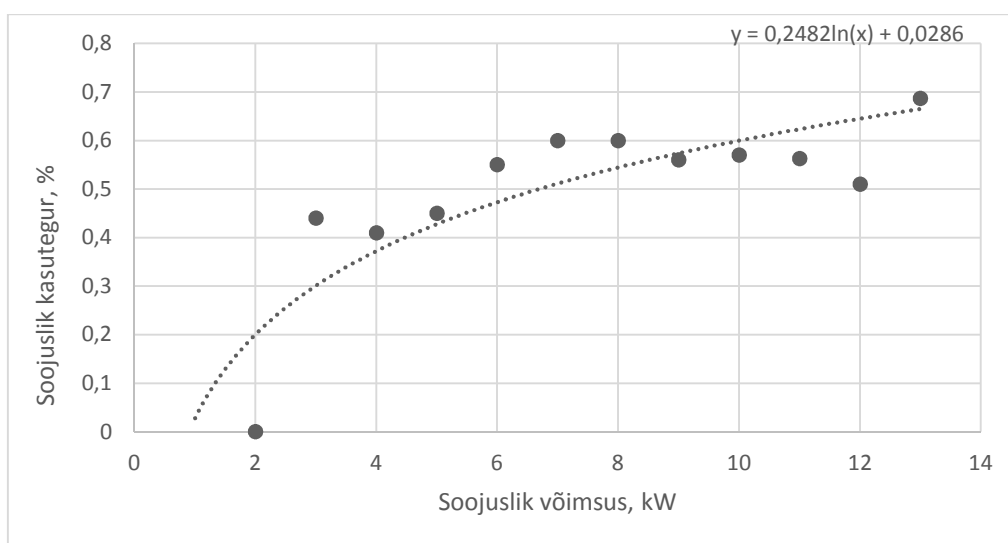
Koostootmisjaamasid iseloomustades esitatakse kasutegurite infot nii elektrilise kui soojusliku võimsuse kohta, kuid tuuakse ka eraldi välja jaama üldine kasutegur (kogukasutegur). Enim esitatakse andmeid elektrilise kasuteguri kohta.



Joonis 15 Elektriline kasutegur, %

Nagu graafikult on näha (Joonis 15), siis võimsuse suurenedes kasvab ka kasutegur. Trendijoonest esineb kõrvalekaldeid nii ülesse kui ka alla. Ligi 40% elektriline kasutegur esineb kahel graafikul esitatud praktiliselt töös oleval jaamal- Greve Itaalias (Lisa L.1, jrk nr 41) ja Zeltweg Austrias (Lisa L.1, jrk nr 42). Madalaimad kasutegurid on seeriatootmises oleval väikese võimsusega Spanner Re² jaamal (Lisa L.1, jrk nr 1) ja kasutuses oleval Taanis asuval jaamal Harboøre (Lisa L.1, jrk nr 30).

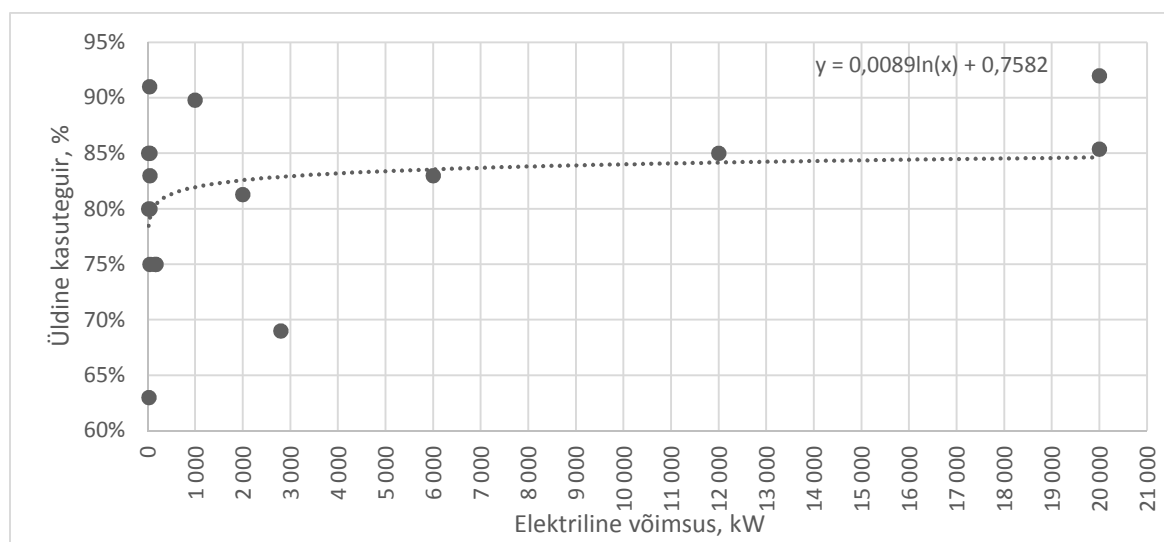
Soojusliku kasuteguri kohta leidub tunduvalt harvemini andmeid kui elektrilise kasuteguri kohta. Kogutud andmete põhjal koostaud graafik on toodud järgmisel joonisel (Joonis 16):



Joonis 16 Soojuslik kasutegur, %

Trendijoonest madalamal asetsevad kasutegurid väärtusega alla 50% esinevad näiteks sellistel jaamadel- väikese võimsusega seeriatootmises olevad koostootmisjaama – Spanner HK30 (Lisa L.1, jrk nr 1), Burkhardt V3.90 (Lisa L.1, jrk nr 3) ja praktilises töös olev suurema võimsusega koostootmisjaam Oberwart, Austria (Lisa L.1, jrk nr 38). Suurim 69% kasutegur on Taanis töös olevas Harboøre (Lisa L.1, jrk nr 30).

Koostootmisjaamade üldise kasuteguri kohta on esitatud järgmine graafik (Joonis 17):



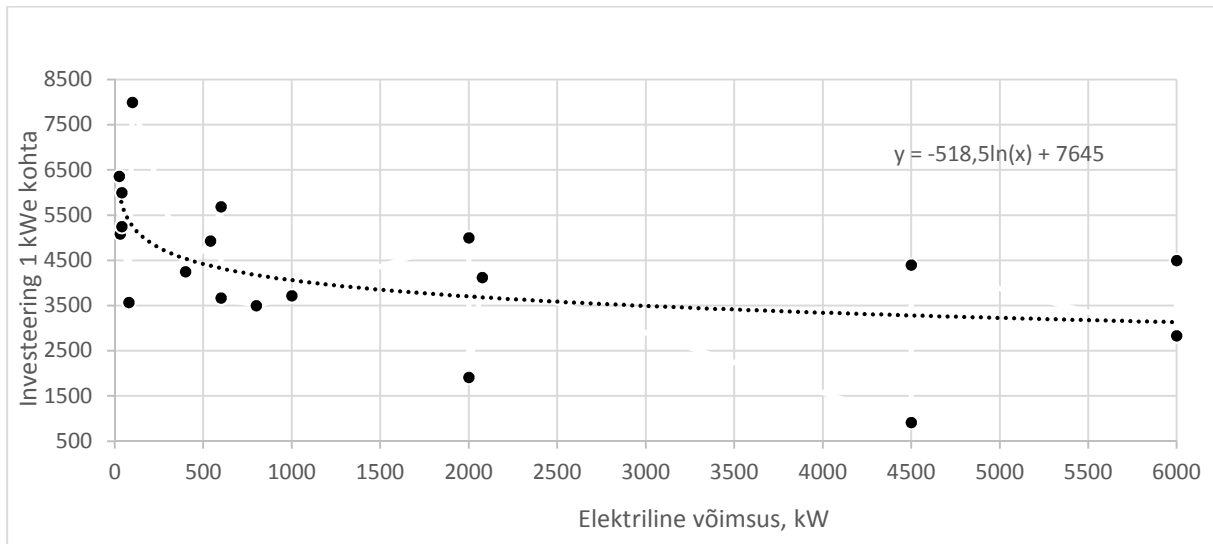
Joonis 17 Üldine kasutegur, %

Üldise kasuteguri trendijoonest kõrvalekaldeid esineb suhteliselt vähe. Väikseimad kasutegurid on Spanner HK30 (Lisa L.1, jrk nr 1) ja Austrias asuval Oberwart jaamal (Lisa L.1, jrk nr 38). Iseloomulik on, et 90%-st kasutegurit esineb nii väga väikese võimsusega jaamadel kui ka graafikuil esitatutest suurimal- vastavalt Volter 40 MW_e (Lisa L.1, rida 11) ja Soomes asuval 20 MW_e võimsusega jaamal (Lisa L.1, jrk nr 28).

2.7.2 Majanduslikud parameetrid

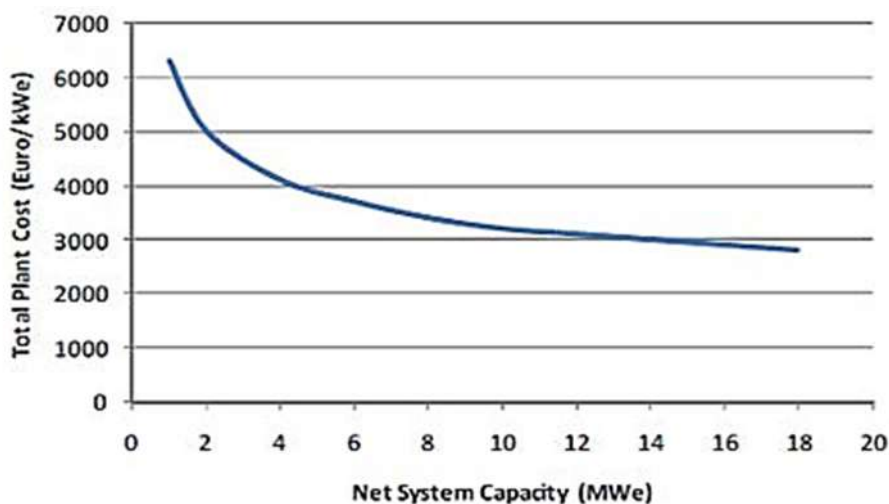
Investeeringu suurus 1 kW_e kohta

Investeeringute muutumist vastavalt jaama elektrilisele võimsusele iseloomustab mastaabiefekt- mida suurema koostootmisjaamaga on tegemist, seda üldjuhul madalam investeeringukulu 1 kW_e kohta.



Joonis 18 Investeeringu maksumus 1 kW_e kohta

Trendijoonest (Joonis 18) kõrvalekalded allapoole ehk väiksemad investeeringumaksumused on kahel jaamal, kus maksumus jääb alla 2000 euro 1 kW_e kohta. Austrias Zeltweg (Lisa L.1, jrk nr 42) ja USA turu kohta koostatud juhtumiuuringus, kus on välja toodu, et 2 MW jaama investeeringumaksumus on 1 kW_e kohta on 1911 eurot (Lisa L.1, jrk nr 49).



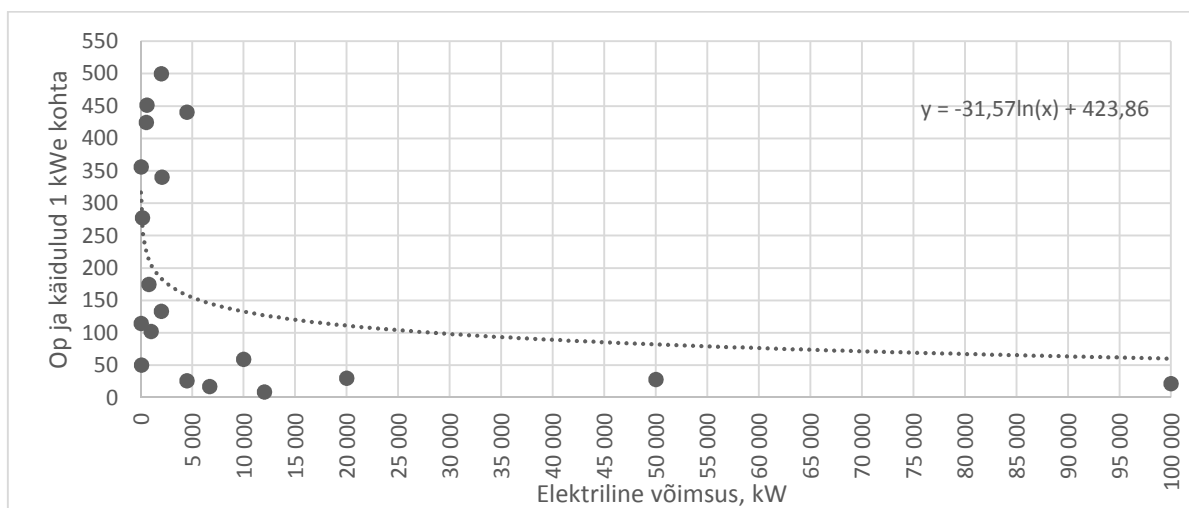
Joonis 19 Investeeringumaksumus kW_e kohta [19] Tõlge: Total Plant Cost- kogu jaama maksumus; Net System Capacity- süsteemi netovõimsus

Esitatud andmebaasi põhjal koostatud graafik (Joonis 18) langeb kokku Valgevenes koostatud tasuvusanalüüsi tulemustega (Joonis 19), kus tüüpiliselt investeeringukulutused kW elektrienergia võimsuse kohta langevad jaama võimsuse suurenedes. [19]

Hindamaks gaasistamistehnoloogia sobivust USA turule, viidi läbi uuring, mille tulemusena hinnati, et gaasistamistehnoloogiate (liikumatu kihiga ja keevkihiga) puhul on investeeringute kulutused on 1910 - 5089 eur/kW kohta. [29]. Tulemus langeb ligilähedaselt kokku käesoleva töö raames koostatud andmebaasi tulemustega.

Opereerimis- ja käidukulud

Opereerimis- ja käidukulud on leitud ja esitatud taandatuna 1 kW_e kohta. Andmeid käidukulude kohta on esitatud väga väheste praktikas töötavate jaamade juures, peamiseks allikaks olid erinevad teadusuuringud ja –artiklid. Opereerimise ja käidukulud on sageli jaotatud kaheks: fikseeritud (remonttööd, seadmete väljavahetamised jne) ja varieeruvad (otseselt seotud toodanguga), kuid käesolevas töös ei eraldata neid. Opereerimiskulude hulka on enamasti arvestatud ka personalikulud, kuid väga sageli leitud andmetes ei ole täpsustatud milliste kulutustega on arvestatud.



Joonis 20 Investeeringu maksumus 1 kW_e kohta

Käidukulude graafiku trendijoon (Joonis 20) on samuti langev ehk sarnaselt investeeringute graafikuga on ka siin tegemist mastaabiefektiga, kus suuremate jaamade puhul on käidu- ja opereerimiskulutused väiksemad taandatuna 1 kW_e kohta. Kuid käidukulude juures on iseloomulik ka suur varieeruvus väiksemate võimsuste juures- näiteks 40 kW_e võimsusega jaama opereerimis- ja käidukulud on 115 eur/ 1 kW_e kohta (Lisa L.1 jrk nr 11), kuid 30 kW_e võimsuse juures ligi kolm korda kõrgemad- 356 eur/ 1 kW_e kohta (Lisa L.1 jrk nr 51). Erinevates teadustöodes on välja toodud opereerimise ja käidukulude osakaaluks 2-7% [29] aastas investeerimismaksumusest. Opereerimise ja käidukulude näol on tegemist parameetriga,

mis omab kõige suuremat määramatust, seda eriti väikeste võimustega jaamade juures, kuna kõikuvused kuludes on väga suured.

3. Puugaasi tehnoloogia kasutamise otstarbekuse hinnang Eestis

Eestis ei ole tänase päeva seisuga hetkel mitte ühtegi kasutusel olevat koostootmisjaama, mis kasutaks energia saamisel puidugaasi. On olemas ebaõnnestunud näide Võhma koostootmisjaama näol, mille tegevus lõppes pankrotiga. Aastast 2015 on Eesti turule aktiivselt tegutsemas ka ettevõtte AS Green Fuel Energy, kes pakub Soomes toodetud OY Volter koostootmisjaamu. Mai 2016.a seisuga ei ole teada veel ühegi jaama praktilisest tööst. Kuigi edukaid kohalikke näiteid jaamade tööst veel ei ole, on kindlasti kasvanud huvi puidu gaasistamise tehnoloogia ning tasuvuse kohta.

Seetõttu on ka käesoleva töös koostatud kogutud andmete analüüsi põhjal teoreetiline arvutus kolmes suuruses asulas:

- Asula 1 aastane soojustarbimine 500 MWh
- Asula 2 aastane soojustarbimine 5000 MWh
- Asula 3 aastane soojustarbimine 15 000 MWh

Näideteks ei ole valitud väga suure soojuskoormusega asulaid, sest suurte soojustarbimisega kohtades on juba rakendatud kas koostootmist või ehitatud biokütuste katlad, mis pakuvad soodsat soojuse hinda. Seega, tõenäoliselt Eesti tingimustes reaalselt potentsiaalseteks tarbijateks puidugaasil koostootmise rakendamiseks on just keskmise ja väiksema suurusega asulad või tootmis- ja äriettevõtted (turism, põllumajandus jne).

3.1. Referentstarbijate määramine ja tehnilised näitajad

Referentstarbijate puhul on valitud kolm erinevat soojuskoomust ning teiste parameetrite osas on tehtud ühtselt järgmised eeldused:

- Suhtelised soojuskaod võrgus on 15%. Kaugküttetorustike soojuskadude määramisel on arvestatud, et kaod ei ületa Konkurentsiameti poolt määratud piirmäära, mis hakkab kehtima alates 2017.a; [31]
- 70% soojustarbimisest moodustab kütte ja ventilatsioon ning 30% soe tarbevesi;
- Puugaasimootoriga kaetakse ~60% tipu soojusvõimsusest;
- Välisõhu arvutuslik temperatuur kütte tagamiseks on -22°C , sest arvestatakse Tallinna või Harjumaa tingimustega; [32]

- Tasakaalutemperatuur on 17⁰ C, sest arvestatakse, et sellest kõrgemate temperatuuride juures ei vaja hoone kütmist; [32]
- Soojusvõimsuse arvutamisel on kasutatud Tallinna temperatuuri andmeid; [33]
- Välisõhu temperatuur kütteperioodi alustamiseks on 12⁰ C;
- Soojatarbevett tarbitakse ka suvisel perioodil.

3.1.1 Tehnilised lähteandmed

Iga asula kohta on koostatud tehniliste andmete tabel, kus on kajastatud nimetatud eeldusi ja eelmises peatükis esitatud andebaasi analüüsi järeldusi. Asulate soojuskoormusgraafikud ning katlamaja energiatootmisseedme soojusväljastuse graafikud on toodud vastavalt Lisas L.3 ja L.4.

Väiksema soojustarbimisega asula tehnilised lähteandmed on järgmised (Tabel 7).

Tabel 7 Asula 1 tehnilised tingimused

Asula 1 tehnilised tingimused		
	Ühikud	Väärtus
Asula soojustarbimine	MWh	500,0
Kaod võrgus	%	15%
Soojuskaod kaugküte võrgus	MWh	88,2
Soojuse väljastus	MWh	588,2
Tipukoormus	MW	0,17
Kütuse kulu	EUR/MWh	20
Puugaasimootor		
Soojuslik võimsus	MW	0,100
Elektriline võimsus	MW	0,046
Soojuse toodang mootoriga	MWh	539,7
Elektri toodang mootoriga	MWh	249,9
Energia toodang kokku	MWh	789,5
Kütuse vajadus	MWh	1 009,1
Elektriline kasutegur	%	25%
Soojuslik kasutegur	%	53%
Üldine kasutegur	%	78%
Investeeringu ühikumaksumus	eur/kW kohta	5 657,4
Investeering	eur	261 476,0
Käidukulud 1 kWe kohta	eur/a	302,8
Käidukulud jaama kohta	eur/a	13 996,9

Keskmise soojustarbimisega asula tehnilised lähteandmed on järgmised (Tabel 8):

Tabel 8 Asula 2 tehnilised tingimused

Asula 2 tehnilised tingimused		
	Ühikud	Väärtus
Asula soojustarbimine	MWh	5 000,0
Kaod võrgus	%	15%
Soojuskaod kaugküte võrgus	MWh	882,4
Soojuse väljastus	MWh	5 882,4
Tipukoormus	MW	1,66
Kütuse kulu	EUR/MWh	20
Puugaasimootor		
Soojuslik võimsus	MW	0,998
Elektriline võimsus	MW	0,522
Soojuse toodang mootoriga	MWh	5 396,6
Elektri toodang mootoriga	MWh	2 820,5
Energia toodang kokku	MWh	8 217,1
Kütuse vajadus	MWh	10 178,7
Elektriline kasutegur	%	28%
Soojuslik kasutegur	%	53%
Üldine kasutegur	%	81%
Investeeringu ühikumaksumus	eur/kW kohta	4 400,7
Investeering	eur	2 295 797,8
Käidukulud 1 kWe kohta	eur/a	226,3
Käidukulud jaama kohta	eur/a	118 058,9

Suurima soojustarbimisega asula tehnilised lähteandmed on esitatud järgmises tabelis (vt Tabel 9):

Tabel 9 Asula 3 tehnilised tingimused

Asula 3 tehnilised tingimused		
	Ühikud	Väärtus
Asula soojustarbimine	MWh	15 000,0
Kaod võrgus	%	15%
Soojuskaod kaugküte võrgus	MWh	2 647,1
Soojuse väljastus	MWh	17 647,1
Tipukoormus	MW	4,99
Kütuse kulu	EUR/MWh	20
Puugaasimootor		
Soojuslik võimsus	MW	2,995
Elektriline võimsus	MW	1,651
Soojuse toodang mootoriga	MWh	16 189,9
Elektri toodang mootoriga	MWh	8 927,9

Energia toodang kokku	MWh	25 117,8
Kütuse vajadus	MWh	30 663,2
Elektriline kasutegur	%	29%
Soojuslik kasutegur	%	53%
Üldine kasutegur	%	82%
Investeeringu ühikumaksumus	eur/kW kohta	3 803,3
Investeering	eur	6 280 445,1
Käidukulud 1 kWe kohta	eur/a	189,9
Käidukulud jaama kohta	eur/a	313 609,7

Esitatud tabelist on näha, et soojustarbimise suurenedes kasvavad ka kasutegurid- 500 MWh juures on üldine kasutegur 78%, 15 000 MWh juures 82%. Samas investeeringu- ja käidukulud vastupidiselt jaama võimsuse suurenedes 1 kW_e kohta langevad.

3.2. Majandusarvutused

3.2.1 Eeldused ja meetodika

Tasuvusanalüüsi juures on kasutatud samuti Lisa L.1-s toodud andmebaasi tulemusi, mis on kajastatud ka tehnilistes lähteandmetes. Samuti on teostatud järgmised eeldused või lihtsustused:

- Tasuvusanalüüsis vaadeldav periood on võrdne seadme eeldatava elueaga ehk 20 aastaga;
- Arvutuses ei ole arvestatud laenu koos tagasimaksetega, samuti mitte tarbijahinnaindeksi muutusega ja palga reaalkasvuga;
- Kõik arvutused on läbi viidud püsihindades;
- Opereerimise ja käidukulud on hinnatud võrdseks kõikidel aastatel;
- Puiduhakke hinnaks niiskussisalduse juures 15%, on arvestatud 20 eur/MWh;
- Diskontomääraks on võetud 6,07%, mis on võrdne Konkurentsiameti meetodika järgi WACC-iga (kapitali kaalutud keskmine kapitali hind) soojuse müügiga tegelevale võrguettevõtjale; [30]
- Elektri börsihinna arvestamisel on võetud maksumuseks 2015.a keskmine Nord Pool Spot börsihind Eestis, milleks oli 31,08 eur/MWh; [8]
- Kogu toodetud elekter müüakse võrku, puudub otseliini (võrguettevõtja teeninduspiirkonnas asuv liin, millel puudub eraldi võrguühendus võrguga, kuid mis võib olla võrguga kaudses ühenduses tootja või tarbija elektripaigaldise kaudu ning mis

on ette nähtud elektrienergia edastamiseks ühest elektrijaamast teise või ühele tarbijale [34]) rajamise/kasutamise võimalus;

- Kõikide analüüsitava soojustarbimiste juures on arvestatud taastuvenergia toetusega elektri tootmisel 53,7 eur/MWh kohta esimesel 12. aastal; [35]
- Investeeringukulutused teostatakse täies ulatuses esimesel aastal;
- Kõik hinnad on arvutustes kajastatud ilma käibemaksuta.

3.2.2 Tasuvusanalüüsi arvutustulemused

Tasuvusanalüüsi tulemused (Lisa L.5) näitavad, et mida suuremate seadmetega on tegemist, seda kiirem on tasuvusaeg ja seda odavama hinnaga on võimalik soojust koostootmisjaamast võrku müüa.

Tabel 10 Tasuvusanalüüsi alusel leitud soojuse väljamüügihind, eur/MWh

Asula soojustarbimine, MWh	Soojuse väljamüügihind, eur/MWh ²
500	70,6
5000	57,7
15 000	50,2
Eesti keskmine kaalutud hind	53,8 ¹
Hinnanguline Eesti keskmine väljamüügihind	45,8

Märkused: ¹-allikas [36]; ²-hinnad ei sisalda käibemaksu

Väljamüügihinnad kõikide soojustarbimiste juures on leitud eeldusel, et projektiga saavutatav sisemine tasuvus (IRR) on 6%.

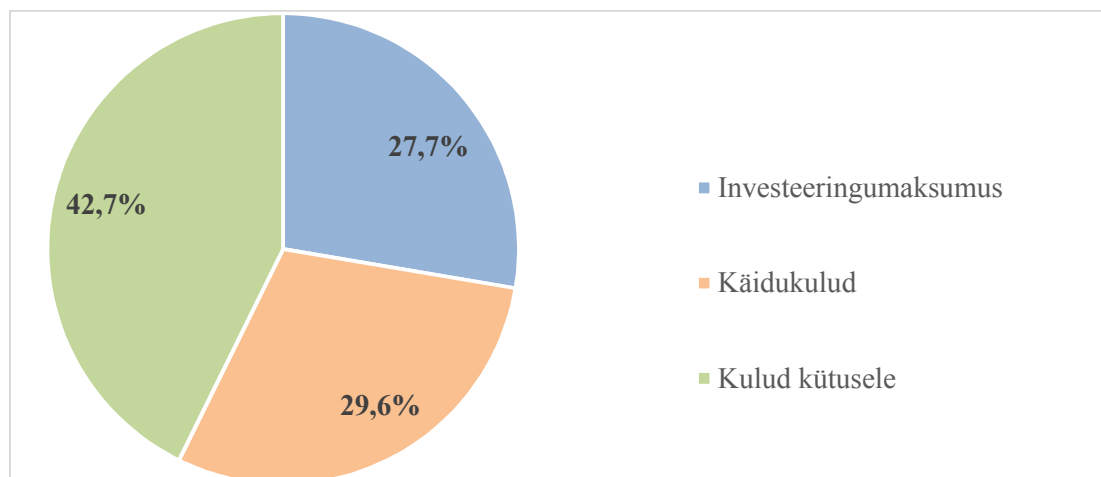
2015.a kaalutud keskmine soojuse käibemaksuta hind Eestis seisuga veebruar 2015 oli 53,83 eur/MWh kohta. [36] Statistikat, palju on Eesti keskmine kaalutud soojuse väljamüügihind avaldatud ei ole. Konkurentsiameti kodulehelt on võimalik leida informatsiooni soojusettevõtete kohta, kes on oma soojuse tootmise piirhinnad Konkurentsiametiga kooskõlastanud. Hinna skaala kõigub suures vahemikus 20-55 eur/MWh kohta, olles madalaim Eesti Energia Narva Elektri jaamad AS puhul ja kalleim Pelletikütte AS-is.[63]

Käesolevas töö võrreldakse saavutatud soojuse väljamüügihinda hinnangulise Eesti keskmise väljamüügihinnaga, mis on leitud arvestades kaalutud keskmisest soojuse hinnast (53,83 eur/MWh) maha kulud soojuskaole ehk indikaatiivselt 15%, mille tulemuseks on 45,8 eur/MWh kohta.

Võrreldes kolme asula väljamüügihindasid hinnangulise Eesti keskmise väljamüügihinnaga (vt Tabel 10), siis kõik maksumused ületavad seda. Mida väiksema koostootmisjaamaga on tegemist, seda kallim on soojuse väljamüügihind. Asula 1 soojuse väljamüügihind 500 MWh

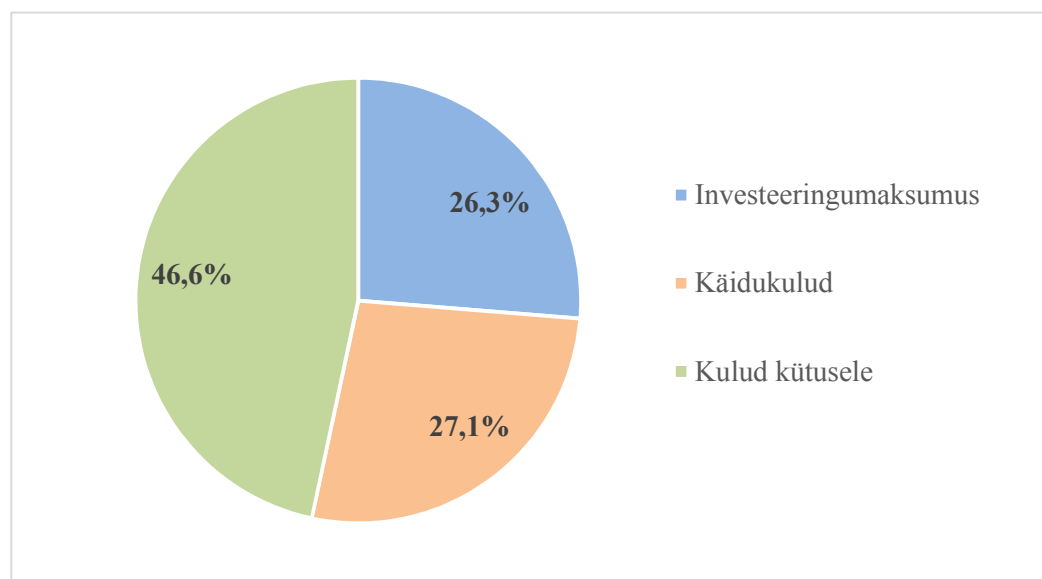
soojustarbimise juures on 35,1% kallim hinnangulisest Eesti keskmisest väljamüügihinnast. 5000 MWh ja 15000 MWh juures ületavad hinnad keskmist vastavalt 20,6% ja 8,8%.

Kõikidest jaamaga seonduvatest püsikuludest kogu eluea jooksul moodustavad kõige suurema osa kulutused kütusele. Investeeringumaksumus ja käidukulud on praktiliselt ühes suurusjärgus.



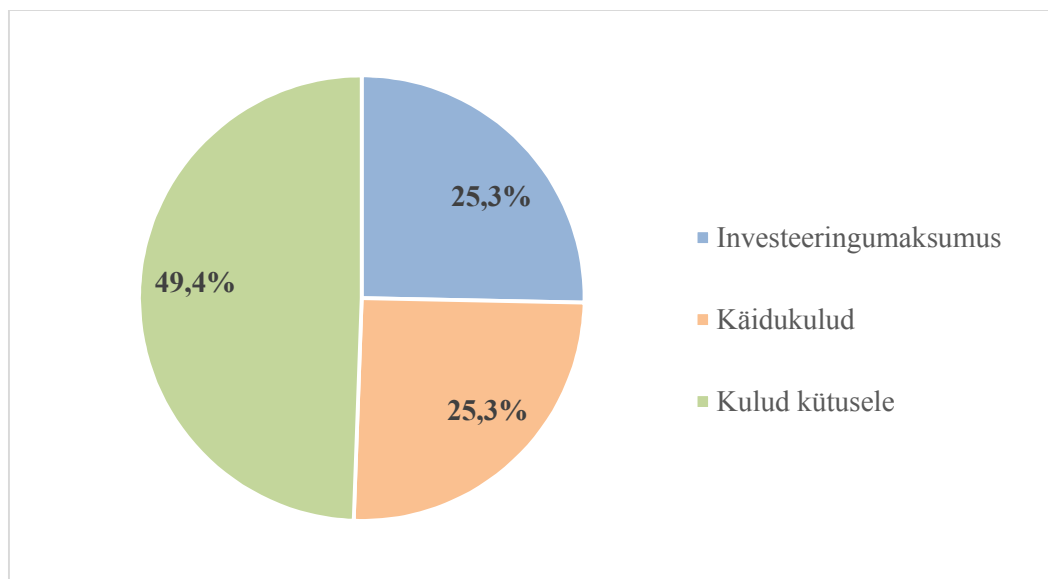
Joonis 21 500 MWh soojustarbimisega asula kulude jaotus soojuse saamiseks püsihindades

Kõige suuremaks kululiigiks on kulutused kütusele, mis moodustab 42,7% kõikidest kuludest seadme eluea jooksul.



Joonis 22 5000 MWh soojustarbimisega asula kulude jaotus soojuse saamiseks püsihindades

5000 MWh soojustarbimise juures on kütusekulutuste osakaal kasvanud veelgi, ulatudes 46,6%-ni.



Joonis 23 15 000 MWh soojustarbimisega asula kulude jaotus soojuse saamiseks püsihindades

Kolme erineva referentstarbija juures on näha, et mida suurem on soojustarbimine, seda enam kasvab kütusekulude osakaal ning langevad investeeringu- ja käidukulud.

Investeeringu toetusega näide

Võrdluseks on koostatud ka tasuvusanalüüs asulale, mille soojustarbimine on 5000 MWh, tingimusel, et investeeringute teostamisel saadakse toetust 40% ulatuses (Lisa L.5 Tabel 17). Kõik teised eeldused on samad nagu peatükis 3.2.1, mis annab tasuvusanalüüsi tulemusena soojuse väljamüügihinnaks 43,9 eur/MWh kohta, mis on hinnangulisest Eesti keskmisest soojuse väljamüügihinnast 4,3% soodsam.

3.3. Järeldused

Tasuvusanalüüsis kasutatud eeldused ja sisendandmed pärinesid andmebaasist, mille koostamisel on kasutatud informatsiooni seeriatoomises olevatest koostootmisjaamadest, töös olevatest ja erinevates teadusartiklites/-uuringutes toodud andmetest koostootmisjaamade kohta, kus energia saamiseks kasutatakse biomassi (Lisa L.1). Saadud keskendatud väärtusi erinevate parameetrite kohta kasutati kolme erineva suurusega Eestis asuva näitliku asula, kus ka kõigis erinev soojustarbimine, tasuvusanalüüsi koostamisel. Koostatud analüüsi tulemused

kinnitavad andmebaasi analüüsil selgunud seaduspära- mastaabiefekti, mille tulemusena investeeringumaksumus, opereerimise ja käidukulud ning soojuse väljamüügihind langevad koostootmisjaama suurenedes. Kasutades investeeringute rahastamisel toetust 40% ulatuses, on võimalik müüa soojust ligikaudu 24% madalama hinnaga kui ilma toetuseta.

Saavutatud soojuse hinnad jäävad 500 MWh, 5000 MWh ja 15 000 MWh soojustarbimise juures hinnangulisest Eesti keskmisest soojuse väljamüügihinnast vastavalt 35,1%, 20,6% ja 8,8% kõrgemaks. Kuid kasutades investeeringutoetust (40% ulatuses) jaama rajamisel on võimalik pakkuda tarbijale keskmisest 4,3% soodsamat hinda.

Andmete töötlemise analüüsis selgus ka, et kõige enam erinevad käidukulud sõltuvalt allikast, omades samas ka väga suurt mõju soojuse hinnale. Koostootmisjaamade planeerimisel tuleb opereerimise ja käidukuludel eriti täpselt uurida konkreetse lahenduse kasutamise kogemusi ja reaalseid opereerimise ja käidukulusid jaama tööaja jooksul.

Hakkepuidust toodetud gaasi kasutamine koostootmises omab palju tehnoloogilisi eelised ja pakub metsaressursside kasutamiseks täiendavaid võimalusi, kuid konkurentsivõimelist soojuse väljamüügihinda on võimalik saavutada ainult investeerimistoetusi kasutades. Arvestades, et käesolevas töös kasutatud referentstarbijate soojustarbimised on suhteliselt väikesed, on siiski tegemist väga perspektiivika energia tootmise viisiga, mille laialdasele levikule Eestis aitaksid kaasa kindlasti investeeringukulude vähenemine, tehnoloogia usaldusvääruse ja efektiivsuse tõus, elektri ja fossiilkütuste hinnatõus, samuti suuremad toetused taastuvenergeetikas. Kuid üks olulisemaid asju on kindlasti ka üldine teavitustöö, et keskkonnasõbralik ja jätkusuutlik energia saamise viis konkurentsivõimeliste kulutustega on teatud tingimustel siiski võimalik saavutada.

Lõputöö kokkuvõte

Käesolev magistritöö „Puugaasi kasutus koostootmisel“ eesmärgiks oli analüüsida ja jõuda tulemuseni, kas koostootmiseseadmeid, kus energia saamiseks gaasitatakse biomassi, on võimalik Eesti tingimustes kasumlikult rakendada. Sageli on just väiksemates piirkondades probleeme konkurentsivõimeliste hindade saavutamise, sest paljude tehnoloogiate juures on kulutused 1 kW_e kohta suured, mis toob tarbijale kaasa kallima soojuse hinna. Valdav osa väiksemaid koostootmisjaamu kasutavad kütusena maagaasi, kuid piirkondades, kus see pole võimalik, sageli loobutakse üldse koostootmise praktiseerimisest väikeste võimsuste juures.

Kuna Eesti üks looduslikest rikkustest on mets, mis katab üle poole riigi pindalast, siis on selle kasutus väga oluline mitte ainult keskkonna seisukohast, vaid ka suure mõjuga riigi heaolule, omades tugevat mõju majandusele. Puugaasi tootmine annab võimaluse efektiivselt ära kasutada metsajätmeid, võimaldades toota sellest kõrgema lisandväärtusega gaasi, mis annab puiduressurssidele uue kasutusvaldkonna- sise põlemismootorites.

Koostootmise peamine eelis seisneb võimaluses toota korraga kahte energia liiki- elektrit ja soojust, tagades seejuures kõrgema kasuteguri kui mõlemaid eraldi tootes. Lisaks saastatakse vähem keskkonda ja hoitakse kokku kulused. Samuti on suureks eeliseks elektritootmise detsentraliseerimine, millega on võimalik vähendada ülekandekulusid ja tõsta ka riigi energiatootmise varustuskindlust.

Antud töös antakse ülevaade biomassi gaasistamise protsessist ja selle erinevatest tehnoloogiatest. Gaasistamisprotsessi eesmärk on muuta tahke kütus täielikult põlevaks gaasiseguks. Selle eesmärgi saavutamiseks on vaja töötlemisel kõrgeid temperatuure (vahemikus 700 – 1100°C). [11] Biomassi gaasistamisel saadav gaas on nn keskmise kvaliteediga gaas, mille kütteväärtus on piires 10-18 MJ/m³. See gaas on otse põletatav sise põlemismootorites (otto- ja diiselmootorites), mis käitavad soojust ja elektri koostootmisjaamasid, soojuspumpade kompressoreid või liiklusvahendeid. [12]

Enim kasutatavad tehnoloogia liigid biomassi gaasistamisel on liikumatu kihiga ja keevkihtreaktorid, mõlemad jagunevad veel omakorda alaliikideks.

Käesolevas töös on peamiselt kajastatud päri voolu liikumatu kihiga gaasisteid. Päri voolureaktorist väljuv generaatorgaas (300–600 °C), mis sisaldab suurel määral tõrvaühendeid, tahma ja tuhka, on sobilik otse gaasipõletis kasutamiseks. Mootorites kasutamiseks peab generaatorgaasi eelnevalt jahutama ja puhastama. Selle reaktori eelis seisneb seadme lihtsuses, efektiivsuses, võimaluses kasutada eri tüüpi kütuseid ning madalas

generaatorgaasi väljumistemperatuuris. Puudused on eelkõige seotud tõrvaühendite eemaldamise vajadusega generaatorgaasist.[14] Nimetatud seadmeid kasutatakse enim madalamatel koormustel kuni võimsuseni 1 MW.

Tänapäeval on ühe enam levimas väikeste liikuva kihiga vastuvoolu töötavate gaasistite kasutamine, näiteks Spanner Re², mis suudavad toota gaasi koos vähese tõrva kogusega. 2009.a Saksamaal teostatud uuring näitas, et gaasigeneraatori jõudlus ei sõltu ainult tehnoloogiast, vaid väga suures osas ka operaatori kogemustest ja oskustest ning hooldusele kulutatud ajast, sest isegi sama tehnoloogiaga seadmetel võib olla väga erinev tulemus. [13]

Tooraine suhtes on gaasigeneraatorid suhteliselt tundlikud, vajades madala niiskussisaldusega puiduhaket (keskmiselt 10-20%).

Gaasistamine on paljulubav ja oluline biomassi muundamise viis. Peamine eelis gaasistamisel seisneb võimaluses odavamalt kütust, nagu biomass, süsi ja naftakoks, muundada kõrgema energiaväärtusega gaasiks või vedelkütuseks. Biomassil on kõrge potentsiaal energiasektoris, sellest mõned näited:

- Gaasimootorite kasutamisel on võimalik saavutada kõrgemat kasutegurit kui Rankini ringprotsessiga auruturbiinides;
- Maagaasi kasutavas jaamas on võimalik kasutada toorainena ka biomassist või orgaanilistest jäätmetest toodetud gaasi maagaasi asemel ning seeläbi vähendada sõltuvust imporditavast maagaasist, mis on tuntud väga suure varustuskindluse ja hinna volatiivsusega;
- Vett kasutatakse gaasistamisjaamades tunduvalt väiksemates kogustes kui tavalistes elektrijaamades. Kõik null-emissiooniga jaamad kasutavad gaasistamise tehnoloogiat.
- Gaasistamisjaamadest eraldub tunduvalt väiksemas koguses saasteaineid nagu SO₂ ja NO_x ning tahkeid osakesi. Saasteainete emissioon gaasistamisjaamadest on sarnane maagaasi kasutavate jaamadega;
- Gaasistamisjaamad toodavad vähem CO₂-te MWh kohta kui põlemisel põhinev aurujõul töötav elektrijaam;
- Tahkete jääkainete kontsentratsioon suitsugaasides on väiksem kui põletamissüsteemides.[15]

Täpseid andmeid Euroopas kasutusel olevate koostootmisjaamade, kus kasutatakse kütusena biomassist toodetud gaasi, arvu ja omaduste kohta leida pole võimalik, sest ametlikku registrit ei peeta. Seetõttu on käesolevas töös kogutud kokku 60 koostootmisjaama andmed. Tegemist

on väiksemate seeriatootmises olevate jaamadega, praktikas kasutusel olevate suurema võimsusega jaamadest ning ka teoreetiliste andmetega erinevates teadusartiklitest ja – uuringutest, kus on sageli välja toodud uurimuse tulemused ning koondatud ja analüüsitud praktikas töötavaid jaamu. Andmed katavad tehnilisi näitajaid (elektriline ja soojuslik võimsus, kütuse liik ning vajadus), kasutegurid ning majanduslikke andmeid (investeeringu maksumus ja opereerimise ning käidukulud).

Analüüsitud näitajate kohta on koostatud graafikud koos trendijoontega. Saadud tulemusi on võrreldud uuringutes esitatud andmetega ning andmebaasi tulemused on kokku langenud, seda ka näiteks investeeringute maksumuse juures 1 kW_e kohta.

Selleks, et hinnata puidust gaasi tootmise ja kasutamise efektiivsust Eesti tingimustes on koostatud analüüs kolme erineva soojustarbimise juures (500 MWh, 5000 MWh ja 15 000 MWh). Kõikide tarbimiste kohta on koostatud tarbimise ja katla soojuskoormusgraafikud.

Tasuvusanalüüsi tarbeks tehakse mitmeid üldistusi, näiteks eeldatakse, et tootjal on võimalik kasutada taastuvenergia toetust, jaama eluiga on 20 a, vajalik saavutada IRR suurusega 6% jne. Arvutuste tulemused kinnitavad mastaabiefekti ehk soojustarbimise suurenedes langeb soojuse tootmishind ning tulemusi võrreldakse hinnangulise Eesti kaalutud keskmise soojuse käibemaksuta hinnaga. Soodsam soojuse väljamüügihind on suurima soojustarbimise (15 000 MWh) juures, milleks on 50,2 eur/MWh eest ning mis on hinnangulisest kaalutud Eesti keskmisest soojuse väljamüügihinnast 8,8% kallim. Koostatud on arvutuskäik, keskmise soojustarbimise juures (5000 MWh), kus kasutatakse investeeringutoetust 40% ulatuses ning tulemuseks on 4,3% hinnangulisest Eesti keskmisest soojuse väljamüügihinnast soodsam hind.

Suurimaks kuluallikaks jaama eluea jooksul on kõikide soojustarbimiste juures kulud kütusele, järgnevad ligikaudu võrdsetes osakaaludes opereerimise ja käidukulud ning investeeringumaksumus. Andmete töötlemise analüüsis selgus ka, et kõige enam erinevad käidukulud sõltuvalt allikast, omades samas ka väga suurt mõju soojuse hinnale. Koostootmisjaamade planeerimisel tuleb opereerimise ja käidukulude juures eriti täpselt uurida konkreetse lahenduse kasutamise kogemusi ja reaalseid opereerimise ning käidukulusid jaama tööaja jooksul.

Hakkepuidust toodetud gaasi kasutamine koostootmises omab palju tehnoloogilisi eelised ja pakub metsaressursside kasutamiseks täiendavaid võimalusi, kuid konkurentsivõimelist soojuse väljamüügihinda on võimalik saavutada ainult investeerimistoetusi kasutades. Arvestades, et käesolevas töös kasutatud referentstarbijate soojustarbimised on suhteliselt väikesed, on siiski tegemist väga perspektiivika energia tootmise viisiga, mille laialdasele

levikule Eestis aitaksid kaasa kindlasti investeeringukulude vähenemine, tehnoloogia usaldusväarsuse ja efektiivsuse tõus, elektri ja fossiilkütuste hinnatõus, samuti suuremad toetused taastuvenergeetikas. Kuid üks olulisemaid asju on kindlasti ka üleüldine teavitustöö, et keskkonnasõbralik ja jätkusuutlik energia saamise viis konkurentsivõimeliste kulutustega on teatud tingimustel siiski võimalik saavutada.

Kirjandus

- [1] Euroopa Parlamendi kodulehekülj. [Online] http://www.europarl.europa.eu/atyourservice/et/displayFtu.html?ftuId=FTU_5.7.1.htm (18.05.2016)
- [2] Euroopa Liidu kodulehekülj. [Online] http://europa.eu/pol/ener/index_en.htm (18.05.2016)
- [3] Eesti Metsaselts kodulehekülj. [Online] <http://www.metsainfo.ee/metsa-info>, (03.05.2016)
- [4] A. Paist „Soojuse ja elektri koostootmise tehnoloogiatest“ Eesti põlevloodusvarad ja – jäätmed 2013.a. [Online] <http://www.eby.ee/ajakiri2013.pdf> (15.03.2016)
- [5] Majandus- ja kommunikatsiooniministri määrus nr 30 [Online] „Tõhusa koostootmise nõuded“. <https://www.riigiteataja.ee/akt/12825847> (seisuga 04.04.016)
- [6] Aadu Paist loengukonspekt „CHP võimalikkus eramute energiabilansis, mikro ja väike koostootmine“ TTÜ Soojustehnika instituut, 7.06.2012.a. [Online] http://www.ekvy.ee/attachments/article/17/V%C3%A4ike%20ja%20mikro%20koostootmine_Aadu%20Paist.pdf (17.05.2016.a)
- [7] Statistikaameti andmebaas. [Online] www.stat.ee (13.03.2016)
- [8] Energiatalgud kodulehekülj. [Online] www.energiatalgud.ee (02.04.2016)
- [9] Vikipeedia kodulehekülj. [Online] <https://et.wikipedia.org/wiki/Puugaas> (30.03.2016)
- [10] J. Brandin, M. Tunér, I.Odenbrand „Small Scale Gasification: Gas Engine CHP for Biofuels“, Lund Universtity, 2011. [Online] <http://lnu.diva-portal.org/smash/get/diva2:445550/FULLTEXT01> (13.04.2016)
- [11] Bisyplan Handbook. [Online] <http://bisyplan.bioenarea.eu/html-files-es/04-00.pdf> (20.03.2016)
- [12] Ü. Kask „Biokütuste termokeemiline töötlus. ORC põhinev elektri ja soojuse koostootmine“, TTU Soojustehnika Instituut, 13.12.2011.a. [Online] http://www.energiatalgud.ee/img_auth.php/9/97/Kask%2C%20%C3%9C.%20Biok%C3%B4tuste%20termokeemiline%20t%C3%B6%C3%B6tlus.%20ORC%20p%C3%B5hinev%20soojuse%20ja%20elektri%20koostootmine.%202011.pdf (04.03.2016)
- [13] L. Rosendahl „Biomass combustion science, technology and engineering“, 2013
- [14] Ü. Kask, V. Vares „Termokeemiline muundamine“ Eesti põlevloodusvarad ja – jäätmed 2013.a. [Online] <http://www.eby.ee/ajakiri2013.pdf> (15.03.2016)
- [15] P.Basu „Biomass Gasification, Purolysis and Torrefication“ UK 2013

- [16] Mattes Scheftelowitz, Philipp Sauter, Martin Zeymer, Eric Billig „Gasification of solid biomass for electricity and heat production Development, Use and Perspectives“.
[Online] http://www.ahk-balt.org/fileadmin/ahk_baltikum/Projekte/Erneuerbare_Energien/EE_Vortraege_2012/Mattes_Scheftelowitz_23.10.2012.pdf (20.04.2016)
- [17] Mehdi Borji* , Kazem Atashkari, Saba Ghorbani, Nader Nariman-Zadeh „Parametric analysis and Pareto optimization of an integrated autothermal biomass gasification, solid oxide fuel cell and micro gas turbine CHP system“ juuni 2015.a.
[Online] http://ac.els-cdn.com/S0360319915022508/1-s2.0-S0360319915022508-main.pdf?_tid=9c928ede-e85c-11e5-b2d2-00000aacb35e&acdnat=1457792196_3e764303deb72d115b650b233507f5df (20.03.2016)
- [18] Task33 kodulehekül. [Online]
http://www.ieatask33.org/app/webroot/files/file/publications/Fact_sheets/IEA_gasification_technologies.pdf (20.03.2016)
- [19] Petr V. Dudin „Feasibility study: wood gasification power plant in Bealrus“ 2012
[Online] http://www.slideshare.net/petrudin/feasibility-study-wood-gasification-power-plant-in-belarus-2012?from_action=save (10.04.2016)
- [20] S.Vakalis „Measuring the performance of biomass small scale gasification plants by implementing mass and energy balances“ Free University of Bozen-Bolzano, Faculty of Science and Technology
- [21] V. Vares, Ü. Kask, P. Muiste, T. Pihu, S, Soosaar „Biokütuste kasutaja käsiraamat“, TTÜ 2005
- [22] A.Molino, S.Chianese, D.Musmarra „Biomass gasification technology: The state of the art overview“ Journal of Energy Chemistry Nov 2015
- [23] Dr.-Ing. Georg Wagener-Lohse, Dipl.-Ing. Dieter Bräkow „Latest developments in German biomass gasification processes for Power&Heat“ IEA Bioenergy Conference 2015, Berlin. [Online]
http://ieabioenergy2015.org/fileadmin/veranstaltungen/2015/IEA_Bioenergy_Conference/S01-3-Wagener-Lohse.pdf (20.04.2016)
- [24] Ridjan, Iva; Mathiesen, Brian Vad; Connolly, David „A review of biomass gasification technologies in Denmark and Sweden“ Aalborg University 2013. [Online]
http://vbn.aau.dk/files/123284438/A_review_of_biomass_gasification_technologies_in_Denmark_and_Sweden.pdf (10.04.2016)

- [25] Spanner Re² kodulehekülj. [Online] <http://www.holz-kraft.de/en/company/102-spanner-re-2-company> (08.04.2016)
- [26] Burkhardt GmbH kodulehekülj. [Online] <http://burkhardt-energy.com/hp604/Wood-Gasifier-V-3-90.htm> (03.04.2016)
- [27] Volter OY kodulehekülj. [Online] <http://volter.fi/> (12.05.2016)
- [28] Green Fuel Energy kodulehekülj. [Online] <http://www.gfe.ee/> (02.05.2016)
- [29] International Renewable Energy Agency „Biomass for Power Generation“ June 2012. [Online] https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/RE_Technologies_Cost_Analysis-BIOMASS.pdf (22.04.2016)
- [30] Konkurentsiamet „Juhend kaalutud keskmise kapitali hinna arvutamiseks“, Tallinn 2015. [Online] <http://www.konkurentsiamet.ee/file.php?27487> (04.05.2016)
- [31] Majandus- ja kommunikatsiooniministri määrus nr 51 „Soojuse müügi ajutise hinna kehtestamise kord“ RT I, 01.07.2011,20.
- [32] K. Ingermann loengumaterjal Soojusvarustusüsteemid, TTÜ kirjastus 2003
- [33] E. Loigu, T.-A. Kõiv „Eesti kraadpäevad“, Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn 2006. [Online] http://www.energiatalgud.ee/img_auth.php/9/93/Loigu%2C_E.%2C_K%C3%B5iv%2C_A._Eesti_kraadp%C3%A4evad.pdf (22.04.2016)
- [34] Elektriturseadus, RT I, 30.06.2015,43 [Online] <https://www.riigiteataja.ee/akt/830279?leiaKehtiv> (11.05.2016)
- [35] AS Elering kodulehekülj. [Online] <http://elering.ee/taastuenergia-toetus/> (11.05.2016)
- [36] Majandus- ja kommunikatsiooniministeeriumi kodulehekülj. [Online] <https://www.mkm.ee/et/tegevused-eesmargid/energeetika/soojusmajandus> (12.05.2016)
- [37] Ligna kodulehekülj. [Online] <http://www.ligna.de/product/spanner-wood-cogeneration-plant-or-wood-gasification-chp-45-kw/593588/Z688544> (23.03.2016)
- [38] Entrade Energy kodulehekülj. [Online] <http://www.entrade.co/contact.html> (03.04.2016)
- [39] Fröling kodulehekülj. [Online] <http://shawrenewables.co.uk/froling-chp/> (03.04.2016)
- [40] All Power Labs kodulehekülj. [Online] <http://www.allpowerlabs.com/products/product-overview> (03.04.2016)

- [41] Gasek kodulehekül. [Online] <http://www.gasek.fi/en/contact/> (04.04.2016)
- [42] Espe Group kodulehekül. [Online] <http://www.espegroup.com/en/biomass/cogenerator/> (03.04.2016)
- [43] EAF Energieanlagenforschung GmbH kodulehekül. [Online] <http://www.xylogas.com/PDF/Brosch%FCre%20-%20Holzvergasungs-Kraftwerk-Englisch.pdf> (05.04.2016)
- [44] SynCraft GmbH kodulehekül. [Online] <http://syncraft.at/index.php/en/menu-products-en/menu-holzgaskraftwerk-en> (05.04.2016)
- [45] SynCraft presentatsioon „Craftwerk. The floating-fixed-bed-gasifier“. [Online] <http://www.ieatask33.org/app/webroot/files/file/2014/WS/Huber.pdf> (05.04.2016)
- [46] OPET Network, Austrian Energy Agency, „Case Study: 2 MWel biomass gasification plant in Güssing (Austria)“, Aprill 2004. [Online] <http://www.opet-chp.net/download/wp3/g%FCssingaustralia.pdf> (10.04.2016)
- [47] D.L. Granatstein, Natural Resources Canada, CANMET Energy Technology Centre -Ottawa (CETC-O), 1 Haanel Drive, Ottawa, Ontario, Canada K1A 1M1 „Gasification vs Combustion of Waste/Biomass in Fluidized Bed Reactors“. [Online] http://www.ieabioenergytask36.org/Publications/2001-2003/Publications/Gasification_vs_Combustion_of_Waste-Biomass_in_Fluidized_Bed_Reactors.pdf (22.04.2016)
- [48] Swedish Gas Centre „Carbona Gasification Technologies. Biomass Gasification Plant in Skive“ 2010. [Online] https://www.ecn.nl/fileadmin/ecn/units/bio/Biomassa/Syngas_and_SNG/Gasification_2010/Biomass_gasification_plant_in_Skive.pdf (22.04.2016)
- [49] J. B. Kritensen, J. ElkjÆr and T. KjÆr, Roskilde University „Case-study-Gasification“, 2013. [Online] <http://www.res-chains.eu/wp-content/uploads/2013/04/Case-Study-Gasification-Harbo%C3%B8re.pdf> (13.04.2016)
- [50] B&W Volund kodulehekül. [Online] http://www.volund.dk/Biomass_energy/References/Harboore (03.04.2016)
- [51] IEA Task 33 kodulehekül. [Online] <http://www.ieatask33.org/content/info/548> (13.04.2016)
- [52] Molino, S.Chianese, D.Musmarra „Biomass gasification technology: The state of the art overview“ Journal of Energy Chemistry, Nov 2015
- [53] IEA Task 33 kodulehekül. [Online] <http://www.ieatask33.org/content/info/496> (13.04.2016)

- [54] Biomass Engineering Ltd „250 kW_e/ 250-500 kW_{th} biomass gasification CHP“, UK (2002-2005). [Online] <http://www.care.demon.co.uk/projectprofile01.pdf> (20.04.2016)
- [55] T. Koltz, ORTNER Gruppe „15 MW Fuel-Power Biomass Gasification Plant Villach. A regional Energy Supply Showcase“. [Online] https://www.ecn.nl/fileadmin/ecn/units/bio/Biomassa/Syngas_and_SNG/Gasification_2010/15_MW_Fuel-Power_Biomass_Gasification_Plant_Villach.pdf (20.04.2016)
- [56] R. Rauch, J.Hrbek, IEA Bioenergy Task33 Meeting „Country Report Austria“. [Online] Http://www.ieatask33.org/app/webroot/files/file/2013/Country_reports_Gothenburg/Austria.pdf (21.04.2016)
- [57] IEA Task 33 kodulehekülj. [Online] <http://www.ieatask33.org/content/info/536> (13.04.2016)
- [58] IEA Task 33 kodulehekülj. [Online] <http://www.ieatask33.org/content/info/537> (13.04.2016)
- [59] D.L. Granatstein, Natural Resources Canada/CANMET Energy Technology Centre (CETC) „Case Study on Waste-Fuelled Gasification Project Greve in Chianti, Italy“ Juuni 2003. [Online] <http://www.ieatask33.org/app/webroot/files/file/publications/GreveCaseStudy.pdf>
http://www.ieabcc.nl/workshops/Tokyo_Joint_Meeting/08_Granatstein.pdf (02.05.2016)
- [60] D.L. Granatstein, Natural Resources Canada/CANMET Energy Technology Centre (CETC) „Case Study on BioCoComb Gasification Project Zelweg Power Station, Austria“, Sept 2002. [Online] <http://www.ieatask33.org/app/webroot/files/file/publications/ZeltwegCaseStudy.pdf>
http://www.ieabcc.nl/workshops/Tokyo_Joint_Meeting/08_Granatstein.pdf (02.05.2016)
- [61] I. Gunnarsson, Göteborg Energy „The Story of the GoBiGas Project. From Vision to Plant in Operation“. [Online] http://ieabioenergy2015.org/fileadmin/veranstaltungen/2015/IEA_Bioenergy_Conference/S01-1_Gunnarsson.pdf (03.05.2016)
- [62] J. Isaksson, Valmet Technologies Oyj „Commercial scale gasification to replace fossil fuel in power generation- Vaskiluodon Voima 140 MW CFB gasification Project“ [Online]

- http://ieabioenergy2015.org/fileadmin/veranstaltungen/2015/IEA_Bioenergy_Conference/S01-2_Isaksson.pdf (04.03.2016)
- [63] Konkurentsiameti kodulehekülg. [Online] <http://www.konkurentsiamet.ee/index.php?id=18308> (14.05.2016)
- [64] A. Tremel , D. Becherer, S. Fendt, M. Gaderer, H. Spliethoff „Performance of entrained flow and fluidised bed biomass gasifiers on different scales“ , Technische Universität München, aprill 2012. [Online] http://ac.els-cdn.com/S0196890413000794/1-s2.0-S0196890413000794-main.pdf?_tid=2154aada-0879-11e6-9b97-00000aab0f6c&acdnat=1461322882_014cb1ce408e4a4eb0386038fada61be (20.04.2016)
- [65] International Renewable Energy Agency IRENA „Biomass for Power Generation“ Juuni 2012. [Online] https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/RE_Technologies_Cost_Analysis-BIOMASS.pdf (28.04.2016)
- [66] C. Diyoke , S. Idogwu , U.C. Ngwaka „An Economic Assessment of Biomass Gasification for Rural Electrification in Nigeria“. [Online] http://www.ijretr.org/IJRETR_Vol.%203.%20No.%201,%20January%202014/AN%20ECONOMIC.pdf (04.04.2016)
- [67] I. Obenberger, G.Thek „Cost Assessment of Selected Decentralised CHP Applications Based on Biomass Combustion and Biomass Gasification“, BIOS Energiesystems GmbH, 2008. [Online] <http://bios-bioenergy.at/uploads/media/Paper-Obernberger-Cost-assessment-CHP-BM-comustion-gasification-2008-05-30.pdf> (22.04.2016)
- [68] Biofuels Research Infrastructure for Sharing Knowledge BRISK. [Online] <http://briskeu.com/home/facilities#facilities-gasification> (20.04.2016)
- [69] BIOS Bioenergysysteme GmbH „Combustion and Gasification of Solid Biomass for Heat and Power Production in Europe- State of Threat and Relevant Future Developments“. [Online] <http://bios-bioenergy.at/uploads/media/Paper-Obernberger-CHP-Overview-2008-03-18.pdf> (13.04.2016)
- [70] N. Moriconia , P. Larancia , M. D'Amicoa , P. Bartocchia , B. D'Alessandroa , G. Cintib , A. Baldinellib , G. Discepolib , G. Bidinic , U. Desideric , F.Cotanaa , F. „Fantozzi „Design and preliminary operation of a gasification plant for micro-CHP with internal combustion engine and SOFC“ 2014.a. [Online] <http://ac.els->

[cdn.com/S1876610215027496/1-s2.0-S1876610215027496-main.pdf?_tid=3792891a-e84a-11e5-9271-](http://ac.els-cdn.com/S1876610215027496/1-s2.0-S1876610215027496-main.pdf?_tid=3792891a-e84a-11e5-9271-00000aacb35f&acdnt=1457784296_28272f37b08755e31b07ef6c6839ddda)

[00000aacb35f&acdnt=1457784296_28272f37b08755e31b07ef6c6839ddda](http://ac.els-cdn.com/S1876610215027496/1-s2.0-S1876610215027496-main.pdf?_tid=3792891a-e84a-11e5-9271-00000aacb35f&acdnt=1457784296_28272f37b08755e31b07ef6c6839ddda)

(23.03:2016)

- [71] Guilin Hu , Guoneng Li, Youqu Zheng, Zhiguo Zhang, Yousheng Xu
„EulereLagrange modeling of wood chip gasification in a small-scale gasifier“ 23
September 2014.a. [Online] http://ac.els-cdn.com/S1743967114201814/1-s2.0-S1743967114201814-main.pdf?_tid=865cd8c0-e83b-11e5-a33b-00000aab0f01&acdnt=1457777986_c08853ad02bef4566627c7a6b86ee4ee
(24.03.2016)
- [72] Mehdi Borji* , Kazem Atashkari, Saba Ghorbani, Nader Nariman-Zadeh
„Parametric analysis and Pareto optimization of an integrated autothermal biomass
gasification, solid oxide fuel cell and micro gas turbine CHP system“ juuni 2015.a.
[Online] http://ac.els-cdn.com/S0360319915022508/1-s2.0-S0360319915022508-main.pdf?_tid=9c928ede-e85c-11e5-b2d2-00000aacb35e&acdnt=1457792196_3e764303deb72d115b650b233507f5df
- [73] Elering AS „Eesti elektrisüsteemi tarbimisnõudluse rahuldamiseks vajaliku
tootmisvaru hinnang“ Tallinn 2014.a. [Online]
http://www.energiatalgud.ee/img_auth.php/8/8b/Elering._Tootmispiisavuse_aruanne_2014.pdf (02.04.2016)
- [74] E. Dimpl „Small.scale Electricity Generation from Biomass“. [Online]
<http://www.gvepinternational.org/sites/default/files/resources/gtz2010-en-small-scale-electricity-generation-from-biomass-part-i.pdf> (08.04.2016)
- [75] A. Mazzucco „Analysis of a Gasification Plant Fed by Woodchips Integrated with
SOFC and STIG Cycles“ Master thesis, Technicalt University of Denmark, September
2011
- [76] P. Abdul Salam, S. Kumar, M. Sirivardhana „Report on the Status of Biomass
Gasification in Thailand and Combodia“ Asian Institute of Technology, oktoober
2010
- [77] ECN kodulehekül. [Online] <http://www.milenatechnology.com/publications/>
(03.04.2016)
- [78] Gasification Plant Database. [Online]
<http://www.netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasification-plant-databases> (12.04.2016)

- [79] M. Villarina, E. Boccic, A. Di Carlob, E. Savutoa, V.Palozzia „The case study of an innovative small scale biomass waste gasification heat and power plant contextualized in a farm“ [*Online*] http://ac.els-cdn.com/S1876610215025503/1-s2.0-S1876610215025503-main.pdf?_tid=3a97136e-00b5-11e6-97b8-00000aab0f6b&acdnat=1460469085_a3c415f0b08f17248f48d104a44499ee
(12.04.2016)

Lisad

L.1. Andmebaas biomassi gaasistavatest koostootmisjaamadest (eesti keeles)

L.2. Gaasigeneraatorite kasutus Euroopas (inglise keeles)

L.3 Asulate soojuskoormusgraafikud (eesti keeles)

L.4 Jaamade energiatootmisseadmete soojusväljastuse graafikud (eesti keeles)

L.5. Tasuvusanalüüs kolmele asulale soojustarbimisega 500 MWh, 5000 MWh ja 15 000 MWh.
(eesti keeles)

L.1. Andmebaas biomassi gaasistavatest koostootmisjaamadest

Jrk. nr	Üldandmed			Tehnilised näitajad				Kasutegurid			Majanduslikud andmed			Allikas
	Tootja / Jaama nimi	Seadme / süsteemi nimetus	Tööpõhimõte, reaktori tüüp	Elektriline, kW	Soojuslik, kW	Kütus	Kütuse vajadus	Elektriline	Soojuslik	Üldine	eurot	eurot/kWe	Käidukulud OjaMeur/a	
1	Spanner Re2	Spanner HK 30		30	73	WC		19%	44%	63%				[37]
2	Spanner Re2	Spanner HK 45		45	108	WC	45 kg/h	23-25%						[37] [23]
3	Burkhardt	V 3.90 Burkhardt gasifitsaator+ ECO 180 HG	DD	180	270	WP	110 kg/h	30%	41%	75%	205 200	1140	50000	[26] [16]
4	Burkhardt	The V 3.90 Burkhardt gasifitsaator + ECO 165 HG (bensini mootor)	DD	165	260	WP	110 kg/h	30%	45%	75%				[26] [16]
5	Burhardt	V 4.50		50	110	WP	40 kg/h	25%	55%	80%				[26] [16]
6	Entrade	1x E3 system	DFB	25	60	WP		25%	60%	85%	159 000	6360		[38]
7	Entrade	2 x E3 25 kW	DFB	50	120	WP		25%	60%	85%				[38]
8	Froling	CHP50	FB	50	100	WC	50 kg/h	27%	56%	83%				[39]
9	GEK Gasifier	v5 GEK Gasifier		20		WC								[40]
10	GEK Gasifier	Power Pallett- PP20		15		WC	1.2 kg/kWh							[40]
11	Volter	Volter Indoor Model		40	120	WC	40 kg/h	23%	57%	91%	210 000	5250	4600	[27] [28]
12	Gasek	GASEK CHP GPU 150		35	100	WC	40,4 kg/h				4 508	128,8		[41]
13	ESPE	Chip 50	DFB	49	110	WC	49 kg/h			>75%				[42]
14	Xylogas	Model 250/220		220	343	WC	209 kg/h	25%						[43]

Jrk. nr	Üldandmed			Tehnilised näitajad				Kasutegurid			Majanduslikud andmed			Allikas
	Tootja / Jaama nimi	Seadme / süsteemi nimetus	Tööpõhimõte, reaktori tüüp	Elektriline, kW	Soojuslik, kW	Kütus	Kütuse vajadus	Elektriline	Soojuslik	Üldine	eurot	eurot/kWe	Käidukulud OjaM eur/a	
15	Xylogas	Model 500/440		440	633	WC	418 Kg/h	26%						[43]
16	Xylogas	Model 760/660		660	929	WC	627 kg/h	26%						[43]
17	Xylogas	Model 1000/90		900	1200	WC	855 kg/h	27%						[43]
18	SynCraft	CraftWERK700		185	402	WC	149 kg/h	28%						[44] [45]
19	SynCraft	CraftWERK1000		261	592	WC	215 kg/h	29%						[44] [45]
20	SynCraft	CraftWERK1200		324	746	WC	281 kg/h							[44] [45]
21	The HGKW Bad Wildungen	HGKW, 2 liini		2*(200-250)	2*(390-480)	WC								[43]
22	Guessing, Austria	REPOTEC-TUV	FB	2000	4500	WC	10,4 MW, niiskussisaldusega 20-30%	25%	56%	81%	10 000 000	5000	1 000 000	[46][10]
23	Varnamo, Rootsi	Forester- Wheeler	CFB	6000	8000	WC	18MW, niiskussisaldus 15-20%	32%	51%	83%	17 000 000	2833		[19]
24	Varnamo, Rootsi	Forester- Wheeler		6000	8000	WC	18MW, niiskussisaldus 15-20%				27 000 000	4500		[19]
25	Alkamaar, NL	MILENA	TB		11600	WC	10MW, niiskussisaldus 10-25%					4 000		[19]
26	Burlingron, Vermont	Silva-Gas	TB			WC	53MW, niiskussisaldus 10-50%				14 000 000			[19]
27	Tallhassee, USA	Silva-gas	TB	41000		WC	109MW	38%						[19]
28	Lahti, Soome	Forester- Wheeler	CFB	20000	96000	WPW	5,09 kg/s at 10.3 MJ/kg and 32.8%	34%	66%	92%	9 732 143	527	603 304	[19] [47]

Jrk. nr	Üldandmed			Tehnilised näitajad				Kasutegurid			Majanduslikud andmed			Allikas
	Tootja / Jaama nimi	Seadme / süsteemi nimetus	Tööpõhimõte, reaktori tüüp	Elektriline, kW	Soojuslik, kW	Kütus	Kütuse vajadus	Elektriline	Soojuslik	Üldine	eurot	eurot/kWe	Käidukulud OjaM eur/a	
							niikuse (52.4 MWt)							
29	Skive, Taani	Carbona	BFB, CFB	5500	11000	LC, WC		30%						[48]
30	Harbøre, Taani	standard Babcock-Wilcox Vølund	FBU	1000	1900	WC	6542 t	21%	69%	90%	2 752 644	3720	102283	[49][10][50]
31	Barrit, Taani	Koostootmisjaam/ Stirling DK	UM	35	140	LC, WC								[51] [49]
32	Viking, Taani	Weiss A/S	DB	20	65	WC		25%	55%	80%				[10]
33	Piteå, Rootsi	MEVA		150	500	WP		30%			11 320	75		[10]
34	Hortlax, Rootsi	MEVA		12000	35000	WP				85%	905 600		107 100	[10]
35	Kgs. Lyngby, Taani	Viking		35	140	LC, WC								[52]
36	Cumbria, UK	Koostootmisjaam	DD	1000										[53]
37	Mossborough, UK	C.A.R.E. Ltd.	DD	250	250-500	LC, WC		26%			425 950			[54]
38	Oberwart, Austria	Ortner Anlagenbau	DFB	2800	4100	LC, WC	2429 kg/h	25%	44%	69%				[55] [56]
39	Neumarkt, Austria	Koostootmisjaam	DD	240	580	WC								[57]
40	CHP Urbas Sulzbach-Laufen		DD	130	280	WC								[58]
41	Greve, Itaalia			6700		RDF pellets	1200 t/d RDF	39%			29 700 000	4 433	119 000	[59]
42	Zeltweg, Austria	BioCoComb	CFB	4500	10000	WC	4100 kg/h	40%			4 107 143	913	119 000	[60]
43	Gothenburg, Rootsi	GoBIGas		20000			kütus 32MW, elekter 3MW, RME			85,40 %				[61]

Jrk. nr	Üldandmed			Tehnilised näitajad				Kasutegurid			Majanduslikud andmed			Allikas
	Tootja / Jaama nimi	Seadme / süsteemi nimetus	Tööpõhimõte, reaktori tüüp	Elektriline, kW	Soojuslik, kW	Kütus	Kütuse vajadus	Elektriline	Soojuslik	Üldine	eurot	eurot/kWe	Käidukulud OjaM eur/a	
							(bio-oil) 0,5MW							
44	Vasaa, Soome	Vaskiluota		140000		WC					40 000 000	286		[62]
45	Teadusuuring/-artikkel		FL/EF	10000							11 000 000	1 100	595 000	[64]
46	Teadusuuring/-artikkel		FL/EF	50000							31 300 000	626	1 423 000	[64]
47	Teadusuuring/-artikkel		FL/EF	100000							49 100 000	491	2 188 000	[64]
48	Teadusuuring/-artikkel		FL/EF	500000							139 900 000	280	4 700 000	[64]
49	Teadusuuring/-artikkel		Gasifier	2000							3 821 429	1 911	267 500	[65]
50	Teadusuuring/-artikkel		Gasifier	800							2 800 000	3 500	140 000	[65]
51	Teadusuuring/-artikkel		Gasifier	30							152 679	5 089	10 688	[65]
52	Teadusuuring/-artikkel		DD	80							285 714	3 571	4 037	[66]
53	Teadusuuring/-artikkel	DD-GaseE 540		540		WC					2 661 000	4 928	229 540	[67]
54	Teadusuuring/-artikkel	DD-GaseE 600		600		WC					3 412 000	5 687	271 013	[67]
55	Teadusuuring/-artikkel	UD-GasE + ORC 2076		2076							8 552 000	4 120	706 681	[67]
56	Teadusuuring/-artikkel	FB-GasE + ORC 4500		4500							19 785 000	4 397	1 983 855	[67]
57	Teadusuuring/-artikkel		Gaasimotor, koos CHP	40				27%			240 000	6 000		[10]

Jrk. nr	Üldandmed			Tehnilised näitajad				Kasutegurid			Majanduslikud andmed			Allikas
	Tootja / Jaama nimi	Seadme / süsteemi nimetus	Tööpõhimõte, reaktori tüüp	Elektriline, kW	Soojuslik, kW	Kütus	Kütuse vajadus	Elektriline	Soojuslik	Üldine	eurot	eurot/kWe	Käidukulud OjaMeur/a	
58	Teadusuuring/-artikkel		Gaasimootor, koos CHP	100				27%			800 000	8 000		[10]
59	Teadusuuring/-artikkel		Gaasimootor, koos CHP	400				27%			1 700 000	4 250		[10]
60	Teadusuuring/-artikkel		Gaasimootor, koos CHP	600				27%			2 200 000	3 667		[10]

CHP- *combined heat and power cogeneration*- elektri ja soojuse koostoomisjaam

FB- *fixed bed*- fikseeritud kihiga reaktor

CFB- *circulating fluidized bed*- tsirkuleeriva liikuva kihiga reaktor

DD- *downdraft gasifier/ downdraft method*- vastuvoolu gaasisti/meetod

LG- *lygnocellulosic*- lignotselluloosne

WC- *wood chips*- puiduhake

WP- *wood pellet*- puidupelletid

WPW- *wood and paper waste*- puidu ja paberi jäätmed

L.2. Gaasigeneraatorite kasutus Euroopas

BRISK organisatsiooni partnerid Euroopas:

Tabel 11 Gaasistamistehnoloogiat kasutavad jaamad, BRISK partnerid [68]

Technology available	BRISK Partner	Location
Gasification, allothermal, fluid bed, fixed bed	Aston University Bioenergy Research Group	Birmingham, UK
Gasification, fluid bed, 3 MWt	CIUDEN	Ponferrada, Spain
BiG-CU: Circulating Fluidized Bed Gasification with integrated hot gas filtration	Delft University of Technology	Delft, Netherlands
Gasification, fluid bed	ECN	Petten, Netherlands
Gasification, circulating fluid bed, 500 kWth	ENEA	Rotondella, Italy
Gasification, updraft, 200 kWth	ENEA	Rotondella, Italy
Gasification, internal circulating fluid bed, 10 kWth	ENEA	Rotondella, Italy
Gasification, entrained flow, pressure	SP Energy Technology Centre (previously known as ETC)	Piteå, Sweden
Gasification, downdraft	International Flame Research Foundation (IFRF)	Pisa, Italy
Gasification, fluid bed	Paul Scherrer Institute	Villigen, Switzerland
Gasification, fluid bed	Royal Institute of Technology (KTH)	Stockholm, Sweden
Gasification, high temperature, air and steam	Royal Institute of Technology (KTH)	Stockholm, Sweden
Gasifier, entrained flow	Technical University of Denmark	Kongens Lyngby, Denmark
Gasification, entrained flow, high temperature & pressure	Technical University of Munich	Garching/Munich, Germany
Gasification, entrained flow, high temperature	Technical University of Munich	Garching/Munich, Germany
Gasification, downdraft fixed bed	TUBITAK, Marmara Research Centre	Gebze, Turkey
Gasification, fluid bed	TUBITAK, Marmara Research Centre	Gebze, Turkey
Gasification, fluid bed	TUBITAK, Marmara Research Centre	Gebze, Turkey
Gasification, downdraft - commercial	University of Zaragoza	Zaragoza, Spain
Gasification, fluid bed - pilot	University of Zaragoza	Zaragoza, Spain
Gasification, fluid bed, high pressure	Vienna University of Technology	Vienna Austria

Tabel 12 Biomassi gaasistamist kasutavad jaamad Taanis [24]

Gasifier name/ Location	Stakeholder/Technology owner/Developer	Production start	Type of gasifier	Thermal fuel power MW_{th} or CHP capacity	Fuel type	Purpose	Development stage
Harboøre Varmværk / Harboøre	Babcock & Wilcox Vølund and Harboøre Varmeværk	1993	Updraft gasifier with combined heat and power	3,7	Wood chips	District Heating	Commercial DH plant
BioSynergi CHP plant / Hillerød	BioSynergi Proces ApS/Hillerød Bioforgasning P/S	2013/2014	Staged open core gasifier	1,3/0,3 MW _{el} 0,75MW _{th}	Forrest wood chips	Power and heat production	Demo/under construction
Pyroneer / Kalundborg	DONG Energy	2011	Low temperature circulation fluidised bed	6	Straw	Co-firing coal boiler	Demonstration
Skive Fjernevarme / Skive	Aæn A/S	2011	Carbona fluidize bed CHP	28	Wood pellets	District heating	Commercial
Viking / Roskilde (Risø)	DTU	2002	2 stage gasification plant	0,07	Wood chips	Heat and power	Demonstration
Two stage / Hillerød	Weiss A/S	2011	2 stage gasification	0,5 MW _{el} , 0,9 MW _{th}	Wood chips	Heat and power	Demo/Commercial
<i>Not in operation or with unknown status due to the company closure</i>							
Close coupled Gasification / Næstved	EP Engineering ApS	2010	Vibrating grate fluidized bed	-	Wood chips	Heat and power	Pilot
Barrit / Barrit	Stirling DK	2010	Updraft gasifier with one Stirling engine	0,2 / 0,035 MW _{el} , 0,14 MW _{th}	Wood chips	Heat and power	Commercial
DTU/Lyngby	Stirling DK	2009	Updraft gasifier with one Stirling engine	0,2 / 0,035 MW _{el} , 0,14 MW _{th}	Wood chips	Heat and power	Commercial
BioSynergi CHP plant / Græsted	BioSynergi Proces ApS	2003	Continous open core gasifier	0,325	Forrest wood chips	Power and heat pduction	Pilot

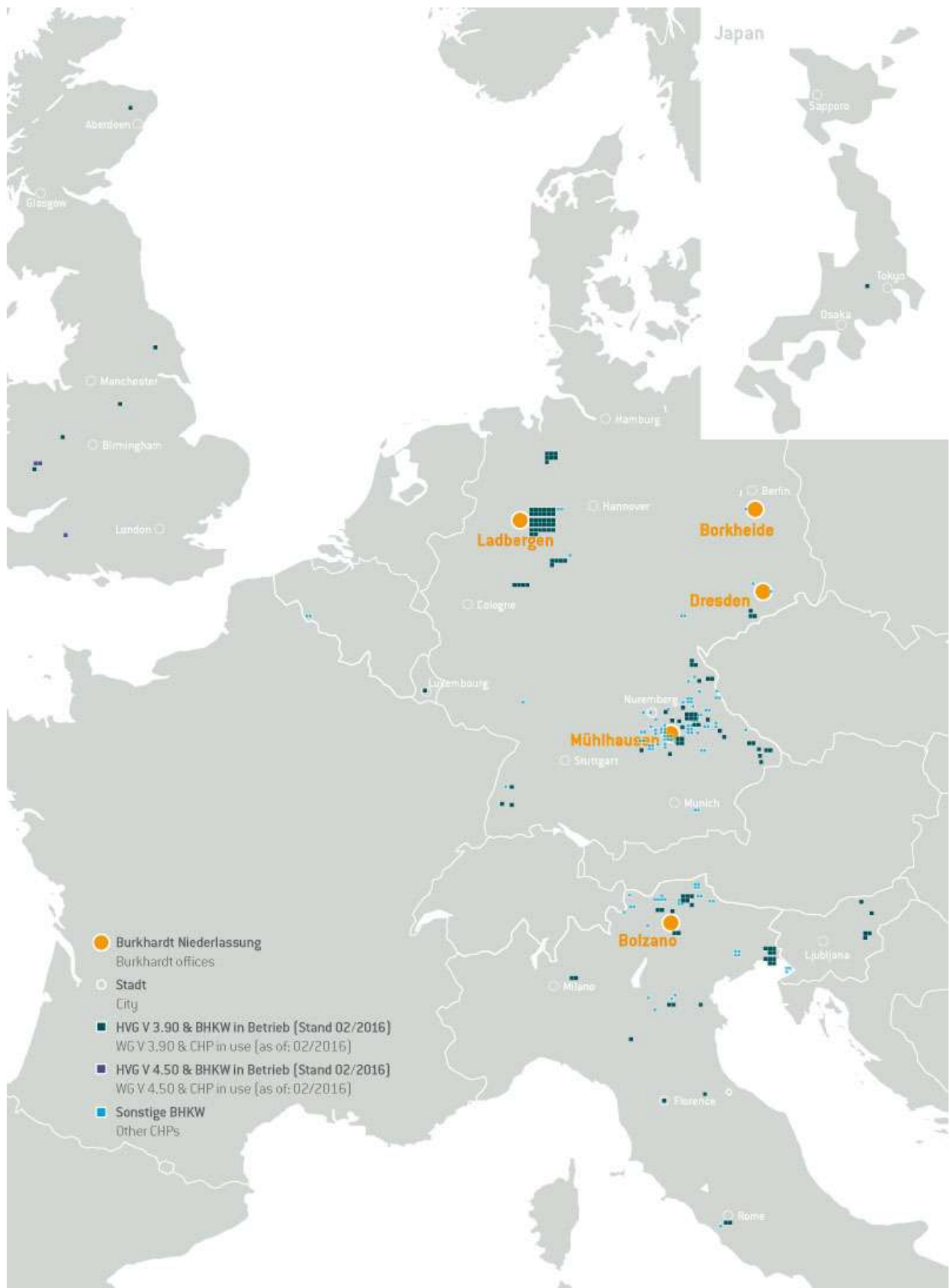
Tabel 13 Biomassi gaasistamist kasutavad jaamad Rootsisis [24]

Gasifier name / Location	Stakeholder/Technology owner/Developer	Production starts	Type of gasifier	Thermal fuel power MW_{th}	Fuel type	Purpose	Development stage
Värö by Götaverken /Värö	Metso Power	1987	Atmospheric fluid bed gasification	28	Dried bark and wood wastes	Limekiln application	Commercial plant
Värnamo / Värnamo	Värnamo Energi	2000	Pressurized Circulating Fluidized bed gasifier	9	Wood chops, pellets, RDF	Primarily build for power and heat, now conversion to fuel production	Demonstration plant
Chalmers / Gothenburg	Chalmers Institute of Technology	2008	Bubbling fluid bed gasifier	2-4	Dry pellets or wood chips	Power and heat	Pilot
BioDME / Piteå	Energy Technology Center Piteå (ETC) / Luleå University of technology (LTU)	2011	Pressurized, oxygen blown gasifier	3	Black liquor	Boi-methanol and bio-DME production	Pilot
VIPP-VORTEX / Piteå	MEVA	2011	Cyclone gasifier	0,5	Wood powder, reed canary grass, torrefied biomass Crushed wood pellets	Heat and power	Pilot
VIPP / Hortlax	Pite Energi	2012	Cyclone gasifier	3,5	Crushed wood pellets	Heat and power	Demonstration (Commercial unit)
GoBiGas / Gothenburg	Göteborg Energi	2013	Indirect gasification at atmospheric pressure	32	Solid biofuels, forestry wastes	Bio-SNG for regional gas Network	Demonstration
Cortus WooRoll / Köping	Cortus Energi	2013	Indirectly heated downdraft entrained flow gasifier	5 (planned expansion to 25)	Wood, bark	Power and heat generation	Demonstration plant
VärmlandsMethanol / Hagfors	VärmlandsMetanol AB	2014/2015	HTW-gasifier	111	Forrest biomass Residues	Methanol production	Demonstration plant

 FirHeadquarters in Neufahrn  Visits on request  Wood cogeneration sites

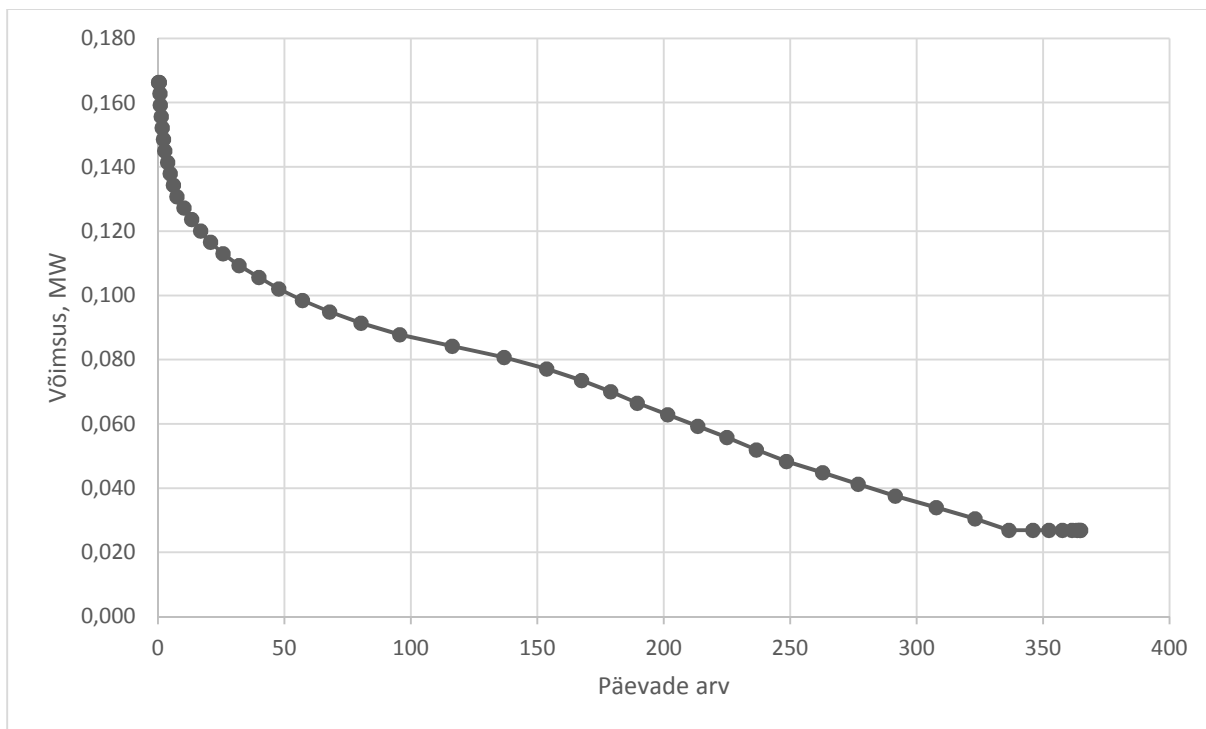


Joonis 24 Spanner koostootmisjaamad Euroopas [25]

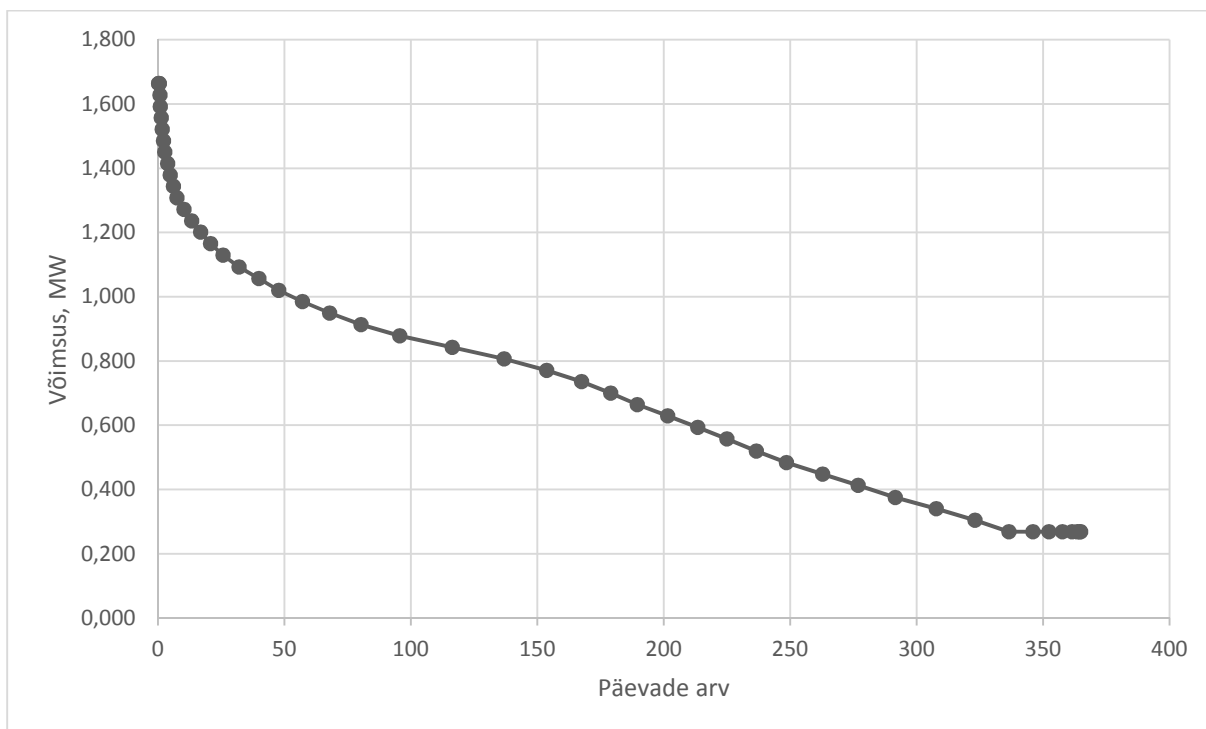


Joonis 25 Burkhardt koostootmisjaamad Euroopas [26]

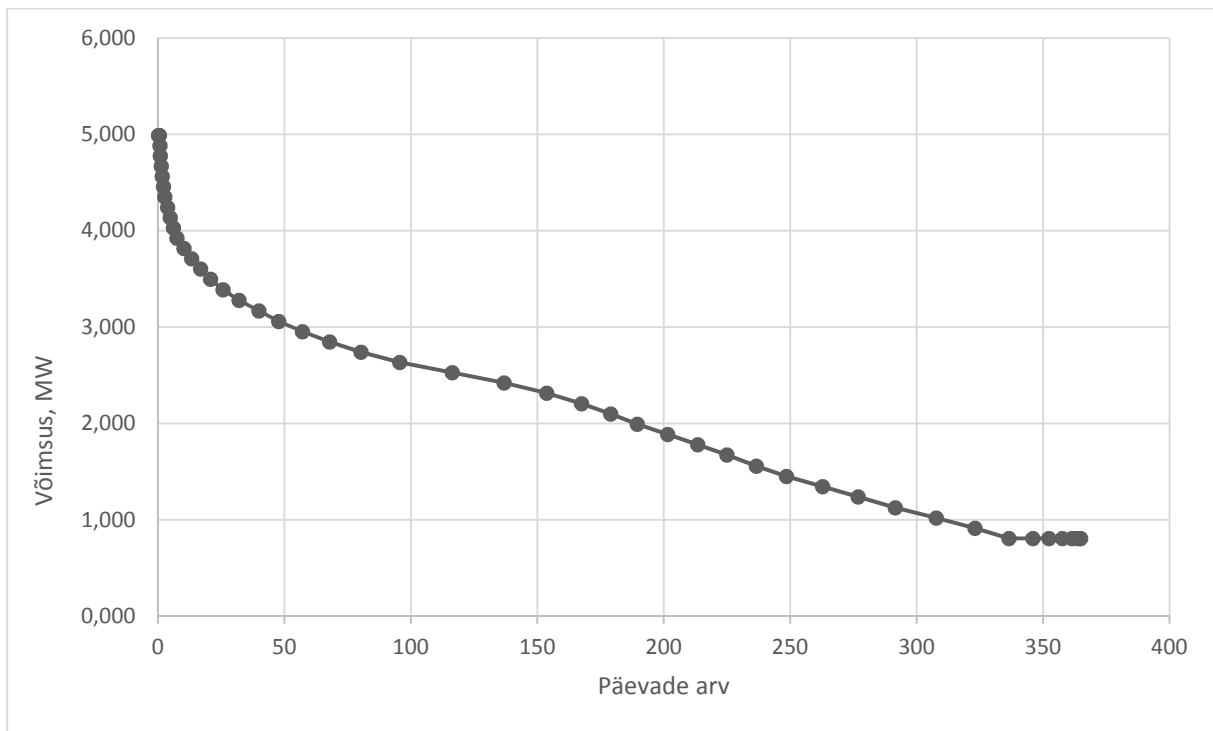
L.3 Soojuskoormus graafikud asulatele sojustarbimisega 500 MWh, 5000 MWh ja 15 000 MWh.



Joonis 26 Soojuskoormusgraafik 500 MWh sojustarbimise juures



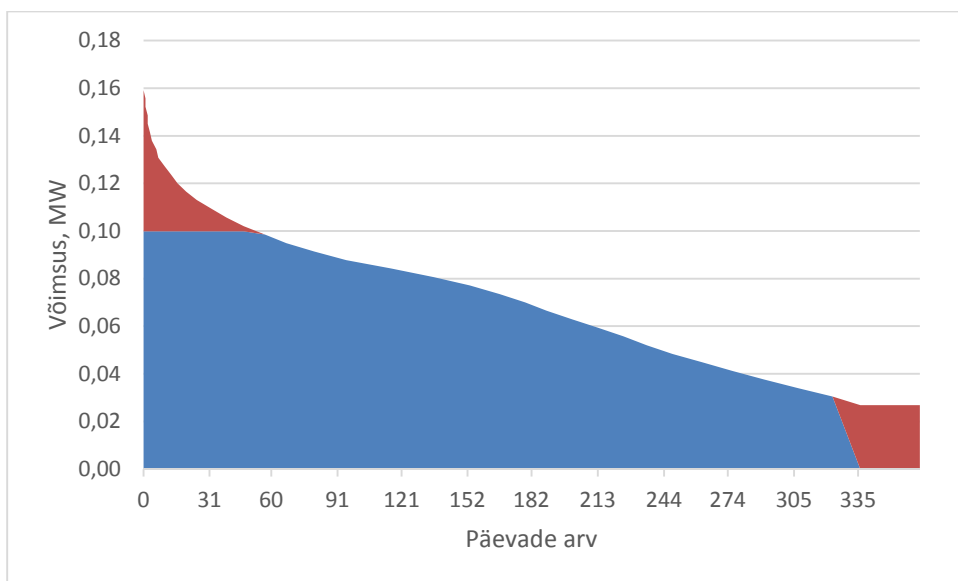
Joonis 27 Soojuskoormusgraafik 5000 MWh sojustarbimise juures



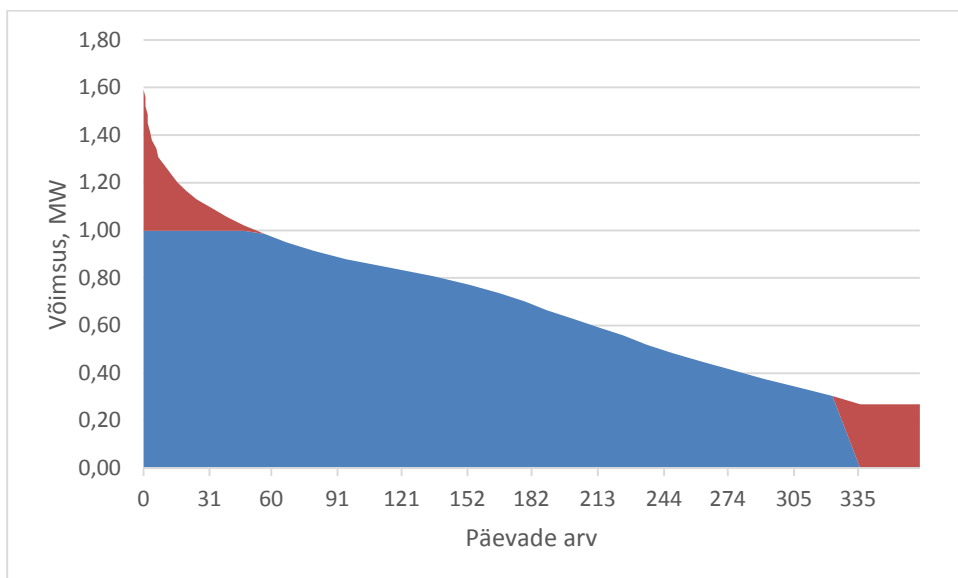
Joonis 28 Soojuskoormusgraafik 15 000 MWh sojustarbimise juures

L.4 Jaamade energiatootmisseadmete soojusväljastuse graafikud

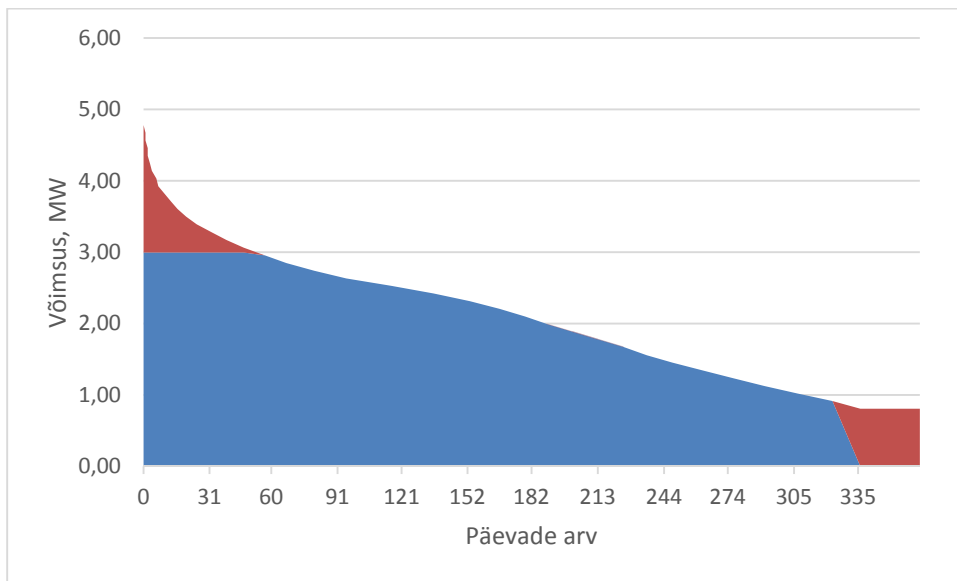
Katla dimensioneerimisel on arvestatud, et põhikatel katab 60% kogu asula vajaminevast soojusvõimsusest, ülejäänud osa kaetakse tipukatla abil.



Joonis 29 Katla nr 1 soojusväljastuse graafik 500 MWh soojustarbimise juures



Joonis 30 Katla nr 2 soojusväljastuse graafik 5000 MWh soojustarbimise juures



Joonis 31 Katla nr 3 soojusväljastuse graafik 15 000 MWh soojustarbimise juures

L.5 Tasuvusanalüüs

Tabel 14 Tasuvusanalüüs 500 MWh soojustarbimise juures

Iga-aastased tulud	Ühik	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
Elektri müük võrku MWh	MWh	249,9	249,9	249,9	249,9	249,9	249,9	249,9	249,9	249,9	249,9	249,9	249,9	249,9	249,9	249,9	249,9	249,9	249,9	249,9	249,9
Elektri müügihind	EUR/MWh	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1
Taastuenergia toetus	EUR/MWh	53,7	53,7	53,7	53,7	53,7	53,7	53,7	53,7	53,7	53,7	53,7	53,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Soojuse müük	MWh	539,7	539,7	539,7	539,7	539,7	539,7	539,7	539,7	539,7	539,7	539,7	539,7	539,7	539,7	539,7	539,7	539,7	539,7	539,7	539,7
Soojuse müügihind	EUR/MWh	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6

Rahavood	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0	20,0
----------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Raha sissetulek

Elektri müügitulud	tuh EUR	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8
Soojuse müügitulud	tuh EUR	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1
Taastuenergia toetused	tuh EUR	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sissetulekud kokku	tuh EUR	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	45,9	45,9	45,9	45,9	45,9	45,9	45,9

Raha väljaminek

Käidukulud va kütus	tuh EUR	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0
Kütusekulud	tuh EUR	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2
Projekti investeringukulutused	tuh EUR	261,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Väljaminekud kokku	tuh EUR	295,7	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2

<i>Kulude ja tulude vahe</i>	<i>tuh EUR</i>	<i>-236,4</i>	<i>25,1</i>	<i>25,1</i>	<i>25,1</i>	<i>25,1</i>	<i>25,1</i>	<i>25,1</i>	<i>25,1</i>	<i>25,1</i>	<i>25,1</i>	<i>25,1</i>	<i>25,1</i>	<i>11,7</i>	<i>11,7</i>	<i>11,7</i>	<i>11,7</i>	<i>11,7</i>	<i>11,7</i>	<i>11,7</i>
------------------------------	----------------	---------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

Projekti kestus	aastat	20,0
Investeering	tuh EUR	261,5
Sisemine kasuminorm (IRR)	%	6,0%

Tabel 15 Tasuvusanaliüs 5000 MWh soojustarbimise juures

Iga-aastased tulud	Ühik	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
Elektri müük võrku MWh	MWh	2 820,5	2 820,5	2 820,5	2 820,5	2 820,5	2 820,5	2 820,5	2 820,5	2 820,5	2 820,5	2 820,5	2 820,5	2 820,5	2 820,5	2 820,5	2 820,5	2 820,5	2 820,5	2 820,5	2 820,5
Elektri müügihind	EUR/MWh	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1
Taastuenergia toetus	EUR/MWh	53,7	53,7	53,7	53,7	53,7	53,7	53,7	53,7	53,7	53,7	53,7	53,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Soojuse müük	MWh	5 396,6	5 396,6	5 396,6	5 396,6	5 396,6	5 396,6	5 396,6	5 396,6	5 396,6	5 396,6	5 396,6	5 396,6	5 396,6	5 396,6	5 396,6	5 396,6	5 396,6	5 396,6	5 396,6	5 396,6
Soojuse müügihind	EUR/MWh	57,7	57,7	57,7	57,7	57,7	57,7	57,7	57,7	57,7	57,7	57,7	57,7	57,7	57,7	57,7	57,7	57,7	57,7	57,7	57,7

Rahavood	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0	20,0
----------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Raha sissetulek

Elektri müügitulud	tuh EUR	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7
Soojuse müügitulud	tuh EUR	311,2	311,2	311,2	311,2	311,2	311,2	311,2	311,2	311,2	311,2	311,2	311,2	311,2	311,2	311,2	311,2	311,2	311,2	311,2	311,2
Taastuenergia toetused	tuh EUR	151,5	151,5	151,5	151,5	151,5	151,5	151,5	151,5	151,5	151,5	151,5	151,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sissetulekud kokku	tuh EUR	550,3	550,3	550,3	550,3	550,3	550,3	550,3	550,3	550,3	550,3	550,3	550,3	398,8	398,8	398,8	398,8	398,8	398,8	398,8	398,8

Raha väljaminek

Käidukulud va kütus	tuh EUR	118,1	118,1	118,1	118,1	118,1	118,1	118,1	118,1	118,1	118,1	118,1	118,1	118,1	118,1	118,1	118,1	118,1	118,1	118,1	118,1
Kütusekulud	tuh EUR	203,6	203,6	203,6	203,6	203,6	203,6	203,6	203,6	203,6	203,6	203,6	203,6	203,6	203,6	203,6	203,6	203,6	203,6	203,6	203,6
Projekti investeringukulused	tuh EUR	2 295,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Väljaminekud kokku	tuh EUR	2 617,4	321,6	321,6	321,6	321,6	321,6	321,6	321,6	321,6	321,6	321,6	321,6	321,6	321,6	321,6	321,6	321,6	321,6	321,6	321,6

<i>Kulude ja tulude vahe</i>	tuh EUR	-2 067,1	228,7	228,7	228,7	228,7	228,7	228,7	228,7	228,7	228,7	228,7	228,7	228,7	228,7	228,7	228,7	228,7	228,7	228,7	228,7
------------------------------	---------	-------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Projekti kestus	aastat	20,0
Investeering	tuh EUR	2 295,8
Sisemine kasuminorm (IRR)	%	5,9%

Tabel 16 Tasuvusanalüüs 15 000 MWh soojustarbimise juures

Iga-aastased tulud	Ühik	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
Elektri müük võrku MWh	MWh	8 927,9	8 927,9	8 927,9	8 927,9	8 927,9	8 927,9	8 927,9	8 927,9	8 927,9	8 927,9	8 927,9	8 927,9	8 927,9	8 927,9	8 927,9	8 927,9	8 927,9	8 927,9	8 927,9	8 927,9
Elektri müügihind	EUR/MWh	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1
Taastuenergia toetus	EUR/MWh	53,7	53,7	53,7	53,7	53,7	53,7	53,7	53,7	53,7	53,7	53,7	53,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Soojuse müük	MWh	16 189,9	16 189,9	16 189,9	16 189,9	16 189,9	16 189,9	16 189,9	16 189,9	16 189,9	16 189,9	16 189,9	16 189,9	16 189,9	16 189,9	16 189,9	16 189,9	16 189,9	16 189,9	16 189,9	16 189,9
Soojuse müügihind	EUR/MWh	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2

Rahavood	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0	20,0
----------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Raha sissetulek

Elektri müügitulud	tuh EUR	277,5	277,5	277,5	277,5	277,5	277,5	277,5	277,5	277,5	277,5	277,5	277,5	277,5	277,5	277,5	277,5	277,5	277,5	277,5	277,5
Soojuse müügitulud	tuh EUR	813,5	813,5	813,5	813,5	813,5	813,5	813,5	813,5	813,5	813,5	813,5	813,5	813,5	813,5	813,5	813,5	813,5	813,5	813,5	813,5
Taastuenergia toetused	tuh EUR	479,4	479,4	479,4	479,4	479,4	479,4	479,4	479,4	479,4	479,4	479,4	479,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sissetulekud kokku	tuh EUR	1 570,4	1 570,4	1 570,4	1 570,4	1 570,4	1 570,4	1 570,4	1 570,4	1 570,4	1 570,4	1 570,4	1 570,4	1 090,9	1 090,9	1 090,9	1 090,9	1 090,9	1 090,9	1 090,9	1 090,9

Raha väljaminek

Käidukulud va kütus	tuh EUR	313,6	313,6	313,6	313,6	313,6	313,6	313,6	313,6	313,6	313,6	313,6	313,6	313,6	313,6	313,6	313,6	313,6	313,6	313,6	313,6
Kütusekulud	tuh EUR	613,3	613,3	613,3	613,3	613,3	613,3	613,3	613,3	613,3	613,3	613,3	613,3	613,3	613,3	613,3	613,3	613,3	613,3	613,3	613,3
Projekti investeringukulutused	tuh EUR	6 280,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Väljaminekud kokku	tuh EUR	7 207,3	926,9	926,9	926,9	926,9	926,9	926,9	926,9	926,9	926,9	926,9	926,9	926,9	926,9	926,9	926,9	926,9	926,9	926,9	926,9

Kulude ja tulude vahe	tuh EUR	⁻⁵ 637,0	643,5	643,5	643,5	643,5	643,5	643,5	643,5	643,5	643,5	643,5	643,5	164,1	164,1	164,1	164,1	164,1	164,1	164,1	164,1
-----------------------	---------	------------------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Projekti kestus	aastat	20,0
Investeering	tuh EUR	6 280,4
Sisemine kasuminorm (IRR)	%	5,9%

Tabel 17 Tasuvusanalüüs 5000 MWh soojustarbimise juures koos investeeringutoetusega 40% ulatuses

Iga-aastased tulud	Ühik	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
Elektri müük võrku MWh	MWh	2 820,5	2 820,5	2 820,5	2 820,5	2 820,5	2 820,5	2 820,5	2 820,5	2 820,5	2 820,5	2 820,5	2 820,5	2 820,5	2 820,5	2 820,5	2 820,5	2 820,5	2 820,5	2 820,5	2 820,5
Elektri müügihind	EUR/MWh	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1	31,1
Taastuenergia toetus	EUR/MWh	53,7	53,7	53,7	53,7	53,7	53,7	53,7	53,7	53,7	53,7	53,7	53,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Soojuse müük	MWh	5 396,6	5 396,6	5 396,6	5 396,6	5 396,6	5 396,6	5 396,6	5 396,6	5 396,6	5 396,6	5 396,6	5 396,6	5 396,6	5 396,6	5 396,6	5 396,6	5 396,6	5 396,6	5 396,6	5 396,6
Soojuse müügihind	EUR/MWh	43,9	43,9	43,9	43,9	43,9	43,9	43,9	43,9	43,9	43,9	43,9	43,9	43,9	43,9	43,9	43,9	43,9	43,9	43,9	43,9

Rahavood	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0	20,0
----------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Raha sissetulek

Elektri müügitulud	tuh EUR	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7	87,7
Soojuse müügitulud	tuh EUR	236,8	236,8	236,8	236,8	236,8	236,8	236,8	236,8	236,8	236,8	236,8	236,8	236,8	236,8	236,8	236,8	236,8	236,8	236,8	236,8
Taastuenergia toetused	tuh EUR	151,5	151,5	151,5	151,5	151,5	151,5	151,5	151,5	151,5	151,5	151,5	151,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sissetulekud kokku	tuh EUR	475,9	475,9	475,9	475,9	475,9	475,9	475,9	475,9	475,9	475,9	475,9	475,9	324,5	324,5	324,5	324,5	324,5	324,5	324,5	324,5

Raha väljaminek

Käidukulud ja kütus	tuh EUR	118,1	118,1	118,1	118,1	118,1	118,1	118,1	118,1	118,1	118,1	118,1	118,1	118,1	118,1	118,1	118,1	118,1	118,1	118,1	118,1
Kütusekulud	tuh EUR	203,6	203,6	203,6	203,6	203,6	203,6	203,6	203,6	203,6	203,6	203,6	203,6	203,6	203,6	203,6	203,6	203,6	203,6	203,6	203,6
Projekti investeeringukulutused	tuh EUR	1 377,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Väljaminekud kokku	tuh EUR	1 699,1	321,6	321,6	321,6	321,6	321,6	321,6	321,6	321,6	321,6	321,6	321,6	321,6	321,6	321,6	321,6	321,6	321,6	321,6	321,6

<i>Kulude ja tulude vahe</i>	tuh EUR	-1 223,2	154,3	154,3	154,3	154,3	154,3	154,3	154,3	154,3	154,3	154,3	154,3	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
------------------------------	---------	----------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Projekti kestus	aastat	20,0
Investeering	tuh EUR	1 377,5
Sisemine kasuminorm (IRR)	%	6,0%