

TEUK XIV

TAASTUVATE ENERGIAALLIKATE

UURIMINE JA KASUTAMINE

NELJATEISTKÜMNENDA KONVERENTSI KOGUMIK



INVESTIGATION AND USAGE OF

RENEWABLE ENERGY SOURCES

FOURTEENTH CONFERENCE PROCEEDINGS

TARTU, ESTONIA, 2012

Toimetajad / Compiled by: Argo Normak, Indrek Suitso, Erkki Jõgi,
Elis Vollmer
Keeleline toimetus: Karin Veske, Margit Lehis

Toimetus on toetuse eest tänulik / Editorial staff is very grateful for the
support:



Eesti Taastuvenergia Koda



Trükitud: OÜ Paar
Printed by: Paar Ltd

Kirjastaja: Eesti Maaülikool
Publisher: Estonian University of Life Sciences

© 2012

Eesti Maaülikool
Estonian University of Life Sciences
All Rights Reserved

ISBN: 978-9949-484-54-6

Sisukord

Eessõna

EELDUSTE LOOMINE METAANKÜTUSTE KASUTAMISEKS EESTI TRANSPORDIS	
Ahto Oja, Jaanus Tamm, Jaanus Sahl.....	6
MOOTORIKÜTUSE SAAB PEAGI ROHUMAADELT JA LAUDA TAGANT	
Tiit Kallaste, jt.....	16
TAASTUVKÜTUSTE KASUTAMISE KOORDINEERIMINE LÕUNA-EESTI REGIOONIS	
Jaanus Uiga, Martin Kikas, Marek Muiste.....	28
KAUGKÜTTE TULEVIKUPERSPEKTIIVIDEST VÄIKEASULATES ELVA LINNA NÄITEL	
Jaanus Uiga, Alo Allik, Andres Annuk.....	39
SOOJUSPUURAUKUDE MÕJU PÕHJAVEELE	
Mikk Gaškov, Argo Jõelett.....	49
AHJUDE UURING PROJEKTI ECOHOUSING RAAMES	
Mart Hovi, jt.....	58
AEGLASEKÄIGULINE OTSETOIMELINE PÜSIMAGNETGENERAATOR TUULEAGREGAATIDELE	
Ants Kallaste, Toomas Vaimann, Ott Pabut.....	68
PÖORLEVATE ELEKTRIMASINATE DIAGNOSTIKA STAATORISIGNAALIDE ANALÜÜSI MEETODIL	
Toomas Vaimann, Ants Kallaste, Aleksander Kilk.....	78
HOONE ELEKTRISÜSTEEMI INNOVATSIOONID JA ARUKA VÕRGU ARENDUS	
Valeri Saikovski, Raivo Teemets.....	88
PUIDU NIISKUMÕÕTJATE VÕRDLUS LAIENDATUD MÕÕTEPIIRKONNAS	
Valdek Tamme, jt.....	98
EELTÖÖTLUSMEETODI MÕJU BIOETANOOLI SAAGISELE	
Marti Tutt, Timo Kikas, Jüri Olt.....	109
SOOJUSLIKE HELIOKOLLEKTORITE VALIKUST	
Teolan Tomson.....	118
PÕLLUMAJANDUSETTEVÕTETES BIOGAASI TOOTMISE VÕIMALUSED SÕNNIKUST	
Argo Normak, Allan Kaasik.....	122
BIOMETAAK TRANSPORDIKÜTUSENA JA SURUGAASIBALLOONIDE KASUTAMINE SÕIDUKIS	
Pärtel Niitaru.....	132
„ROHELISEST ELEKTRIST“ TUUMAJAAMANI	
Hillar Toomiste.....	143

EESSÕNA

Austatud lugejad! Käesolevas konverentsi kogumikus on artiklid Eesti autoritelt, mis annavad ülevaate viimasel ajal tehtud taastuenergia valdkonna teadustööde ja projektide tulemustest. Praeguses teaduse rahvusvahelistumise ajastul on teaduritel oluline säilitada side kohaliku eluga ja levitada oma töö tulemusi eesti keeles. Suur tänu autoritele, et nad oma uurimistööde tulemusi TEUK konverentsil tutvustavad.

Taastuenergia huviliste kohtumispaijana toimub konverents TEUK-XIV Eesti Maaülikoolis 8. novembril 2012.a. Konverentsi päevakavas on 11 suulist ettekannet energiamajanduse arendusest, tuulegeneraatoritest, biokütuste tootmisest jmt. Lisaks on võimalik tutvuda stendiettekannetega ja arutada ettekannete tulemusi tööde autoritega.

Päeva lõpetusena toimub Eesti energiamajanduse hetkeseisu ja arenguid käsitlev paneeldiskussioon „Taastuenergia roll Eesti energiaportfellis“. Käesoleval aastal on toimunud taastuenergia tootmise ja toetusmeetmete osas Eestis suuri muutusi ja algatud on tegevused Eesti pikaajalise energiamajanduse arengukava uuendamiseks Eesti Arengufondi juhtimisel. Arutame taastuenergia ressursi kasutamist ja võimalikku rolli elektri- ja soojusenergia ning transpordikütuste vajaduse katmisel pikaajalise vaatenäuna kuni aastani 2050.

Huvitavaid ettekandeid ja head lugemist!

Argo Normak
Eesti Maaülikooli taastuenergia keskuse juhataja

FOREWORD

Dear readers! Annual conference proceedings holds articles from various Estonian authors, giving an overview of recent renewable energy related research subjects and projects results. Despite the internationalisation of scientific works it is still important for scientists to retain link to local people and to publish their results also in Estonian. We are very grateful to our authors that they are introducing their work at our TEUK conference.

TEUK-XIV, as an annual meeting place for people interested in renewable energy topics, takes place on 8th November 2012. Conference presents 11 oral presentations on energy sector developments, wind generators, biofuel production etc. Additionally it is possible to examine poster presentations and discuss presentation results with authors.

The conference day will be concluded with panel discussion on "The role of renewable energy in Estonian energy portfolio". There have been major changes in Estonian government policy regarding subsidies for renewable energies and activities have started to update Estonian long-term energy management plans led by Estonian Development Fund. We will discuss usage of renewable energy resources and its possible role at covering Estonian need for electricity and heat and transportation fuels in long-term outlook until 2050.

Enjoy the presentations and have a wonderful reading!

Argo Normak

Head of the Centre of Renewable Energy of Estonian University
of Life Sciences

EELDUSTE LOOMINE METAANKÜTUSTE KASUTAMISEKS EESTI TRANSPORDIS

Ahto Oja¹, Jaanus Tamm², Jaanus Sakh³

¹ OÜ Mõnus Minek tegevjuht, ahto.oja@monusminek.ee

² Tartu linnavalitsuse projektijuht, Jaanus.Tamm@raad.tartu.ee

³ EASi energiatehnoloogia programmi koordinaator, Jaanus.Sakh@eas.ee

Annotatsioon

Metaankütused (maagaas ja biometaan) omavad olulist rolli transpordikütuste negatiivsete keskkonnamõjude vähendamisel, kuna nad põlevad puhtamalt. Edumeelsemad Euroopa riigid on viimastel aastatel hakanud transpordis enam panustama metaankütuste kasutamisele, luues riskide maandamiseks ka erinevaid toetusi. Käesolevas artiklis kirjeldatakse Eesti biometaani potentsiaali, esimesi kogemusi sõidukite üleviimisel metaankütuste kasutamisele ning EAS-i töörühma poolt majandus- ja kommunikatsiooniministeeriumile tehtud ettepanekuid metaankütuste kasutamise edendamiseks transpordis.

Märksõnad: metaankütused, maagaas, biometaan, transport, biogaasi potentsiaal, toetusmeetmed.

Sissejuhatus

Eestis on biogaasivaldkonna areng nii oskusteabe omandamise, praktiliste lahenduste kasutusele võtmise kui ka poliitilise toetuse ja tugimeetmete pakkumise osas alles algusjärgus. 2010. aasta andmetel toodeti Eestis prügist, reoveemudast ja lägast 13 mln Nm³ biogaasi aastas, kuid biogaasistamiseks sobilike ressursside maht Eestis võimaldaks biogaasi baasil toota tingimuslikult ca 10% primaarenergia lõpptarbimisest. Valdkond vajab turutõkete ületamiseks teema olulisuse teadvustamist ja toetusmeetmeid. Teiste riikide kogemused näitavad, et avaliku sektori eeskuju, toetus ja majanduslikud stiimulid on hoogustanud metaankütuste kasutuselevõttu transpordis. Näiteks Austrias suurenes ajavahemikul 2006-2011 metaankütust pakkuvate tanklate ja seda kasutavate sõidukite arv neljakordselt.

Riigi varustuskindluse seisukohast on oluline energiaallikate mitmekesisus, mistõttu biogaasi (sh biometaani) suuremahulisem tootmine rikastab

riigisest energiaportfelli. Eesti majanduslikult kasutatav biometaanipotentsiaalne kogus aastas on 300 miljonit Nm³ (236 ktoe)¹. See moodustab ligi poole 2011. aasta maagaasi tarbimisest ja on võrdne 26%-ga transpordikütuste kogutarbimisest (920 ktoe). (Oja 2012)

Avaliku ja erasektori vahelises eesmärgipärasest koostöös on täiesti võimalik saavutada Eestis biometaanipotentsiaali abil kuni 10%-line biokütuste osakaal transpordis. (Tabel 1)

Biogaasi omadused ja potentsiaal

Biogaas on taastuv kütus, mille kasutamine fossiilsete kütuste asemel vähendab suurel määral kasvuhoonegaaside suurenemist atmosfääris. Biogaasi kasutamine lahendab tööhõiveprobleeme maapiirkondades, edendab taastuvenergia tootmist kohalikust toormest, mõjutab jäätmekäitlust, mis omakorda vähendab pinna- ja põhjavee, samuti atmosfääri saastamist, toetab tasakaalustatud regionaalset arengut ja elavdab kohalikku majandust ning innovatsioonitegevust.

Biogaasil on selged eelised, võrreldes teiste taastuvenergia alternatiividega. Biogaasist saab muundada tõhusal koostootmisel elektri- ja soojaenergiat, biometaaniks puhastatuna saab sellega asendada fossiilkütuseid transpordisektoris, biometaanipotentsiaali saab rakendada samadel eesmärkidel nagu maagaasi ja juhtida üldisesse maagaasitorustikku.

Biometaanipotentsiaal mootorikütusena võimaldab asendada olulise osa diislikütuse või bensiini aastasest tarbimisest Eestis. Odavaim viis biometaanipotentsiaali transpordiks on olemasoleva maagaasitorustiku kasutamine. Euroopa direktiiv 2003/55/EG tagab, et puhastatud biogaasi ehk biometaanipotentsiaali võib maagaasivõrku sisestada kõikjal Euroopa Liidus. Eestis praegu vastav kogemus puudub. Lisaks ei konkureeri biogaas toidulauaga, teda saab edukalt toota jäätmetest ja kasutamata maadelt niidetud silost. Seetõttu on ta olemasolevate, ennast tõestanud tehnoloogiatega üks perspektiivsemaid biokütuseid transpordisektoris.

¹ Nm³ – normaalkuupmeetri (väliskirjanduses kasutatakse ka m³ (STP)); see on gaasi mahu mõõtühik normaal- ehk standardtingimuste juures, milleks on temperatuur 273,15 Kelvini järgi ja rõhk 101,3 kilopaskalit (ehk temperatuuril 0 °C ja absoluutrõhul 1,01325 baari)

Tabel 1. Eesti biogaasi potentsiaal sisendite järgi ja sellest saadav elektri- ja soojusenergia kogus.

Table 1. Estonian biogas potential by different sources and annual production of electricity and heat.

Substraat	Tehnoloogiliselt kasutatav biogaasi kogus	Reaalselt kasutatav	Biogaasi kogus aastas (CH ₄ 60%)	Biometaani kogus aastas (CH ₄ 98%)	Biogaasist muundatud elektri kogus aastas (SEK)	Muundatud soojusenergia kogus aastas
	10*6 Nm ³	%	10*6 Nm ³	10*6 Nm ³	GWh _{el} (38%) ²	GWh _{th} (22%) ³
Silo kasutamata maadelt	952	20%	190	114	433	251
Silo 5% põllumajandusmaast	174	100%	174	104	397	230
Silo poollooduslikelt maadelt	32	15%	5	3	11	7
Veiseläga (9% KA)	87	72%	63	39	144	83
Sealäga (6% KA)	11	65%	7	4	16	9
Muud põllumajandusliikud jäägid	5	90%	5	3	11	7
Biolagunevad jäätmed toiduainetetööstusest	19	80%	15	9	34	20
Eraldi kogutud biolagunevad köögi- ja sööklajajäätmed	4	80%	3	2	7	4
Reoveesete	6	80%	5	3	11	7
Tööstusjäätmed	13	100%	13	8	30	17
Kokku (ilma prügilagaasita)	1 303		480	288	1 094	635
Prügilagaas	19	80%	15	9	32	36
Kokku (koos prügilagaasiga)	1 322		495	297	1 126	671

² Koostootmise elektriline kasutegur

³ Koostootmise soojuslik kasutegur

Biogaasi saadakse biomassi anaeroobse kääritamise teel. Anaeroobse käärimise protsess sarnaneb oma olemuselt lehma organismis või soodes toimuvaga. Biomassi saab jagada põllumaal kasvavaks biomassiks, nagu hein, teraviljad, õlikultuurid, ja tootmises tekkivaks biomassiks, nagu sõnnik, reoveemuda ning orgaaniliselt lagunevad jäätmed. Saadud biogaasi kütteväärtus jääb enamasti vahemikku 5-7 kWh/Nm³. Lisaks on biogaasi võimalik saada nn iseenesliku anaeroobse käärimise protsessi käigus prügilatest (prügilagaas), see kokku koguda ning muundada kasulikuks energiaks. Biogaasi koostis väljendub järgmistes mahuprotsentides: 50–70% metaani (CH₄), 30–40% süsihappegaasi (CO₂), alla 3% väävelvesinikku (H₂S) ja ammoniaaki (NH₃) ning alla 1% vesinikku. Tehniliselt puhastatud biogaas on biometaan, mille kvaliteet vastab loodusliku maagaasi kvaliteedile. Eesti tingimustes biometaan maagaasivõrku viimisel peaks see sisaldama vähemalt 98% (pluss-miinus 1%) metaani (CH₄). Eestis annab biometaan tootmiseks lähitulevikus lootust asjaolu, et biometaan on ainuke biokütus, mille puhul aktsiisivabastus jätkub ka peale 2011. aasta juulit, mil see vedelatele biokütustele lõppes.

Metaankütused transpordis

Eestis on metaankütuste (surumaagaas ja surubiometaan metaanisaldusega 98%) kasutamisest transpordis hakatud enam rääkima viimaste aastate jooksul. EL ja Eesti taastuvenergia eesmärgiks on saavutada 2020. aastaks 10%-line taastuvkütuste osakaal transpordikütuste tarbimisest (92 ktoe). Potentsiaalne biometaan aastane kogus ületab selle kahe ja poole kordselt.

Kui veel mõne aasta eest oli metaankütuste turg ja tarbimine Eestis olematu, siis praeguseks on sõidukite arv tõusnud juba 211-ni (võrdluseks: 2009 alguses oli neid 4). Tänapäeval on võimalik tankida surugaasisõidukeid maagaasiga vaid Tallinnas (Suur-Sõjamäe 56a) ja Tartus (Tähe 135) asuvates AS-i Eesti Gaas tanklates (hinnaga 0,779 €/kg e 0,58-0,64 €/liiter)⁴. Kolmas AS-i Eesti Gaas surumaagaasitankla valmib 2012. a Tallinnas (Vinkli 2a). Lisaks on AS-l Eesti Gaas plaan rajada surugaasitanklad veel Narva ja Pärnusse. Eesti esimesed viis metaangaasibussi

⁴ 1 kg surugaasi = 1,34 l bensiini A95; 1,22 l diislikütust

sõidavad Tartus 2011. aasta märtsikuust. 18 kasutuskuu jooksul sõitsid need viis bussi läbi ligemale 600 000 km. Võrreldes diislbussidega oli kokkuhoid küttekuludelt selle aja jooksul ligi 80 000 eurot.

Eestis on tänasel hetkel võimalik lisaks bensiinimootoriga sõidukile ka diiselmootoriga sõiduk kaheüsteemseks ümber ehitada, nii et see saab paralleelselt bensiini või diisliga kasutada mootorikütusena metaangaasi. Diiselmootorite puhul tarbib mootor maanteel sõites 60% gaasi ja 40% diislikütust. (Tabel 2)

Tabel 2. Mõningad näited kaheüsteemseks ehitatud mootorsõidukitest Eesti tingimustes.

Table 2. Some examples of conversion of vehicles to use methane fuels in Estonia.

Sõiduauto: Opel Omega	Sadulveok: Scania 380 Topline	Maastur: Ford F150
Ümber ehitatud osaliselt surumaagaasile e CNG-le	Läbisõit ühe tankimisega 250 km	Ümber ehitatud osaliselt surumaagaasile e CNG-le
2,0 l, 100 kW, toodetud aastal 1998	Diislikulu enne 38 l / 100 km	Kütusekulu bensiiniga 16 l / 100 km (575 € kuus)
Kütusekulu bensiiniga 10 l / 100 km ehk 12 €	Diislikulu nüüd 18 l / 100 km + gaasi 17 kg.	Kütusekulu surumaagaasiga 16 l / 100 km ehk 11,42 kg / 100 km (247 € kuus)
Maagaasikulu 6,66 kg / 100 km ehk 4,51 €	Rahaline sääst 10 € / 100 km kohta	Nimetatud mudeli ümberehituse maksumus CNG-le 3740 €
Sääst 7,49 € / 100 km kohta, seadme hind 1900 €, tasuvusaeg 25 367 km	Seade töötanud 50 000 km ehk 5 kuud	Aastakulud bensiiniga sõites 6909 €
Seade on ümberpaigaldatav sama silindrite arvuga autole	Seadme hind 6500 + 20% käibemaks	Aastakulud surumaagaasiga sõites 2971 €
Paagi sertifikaat kehtiv 30 aastat	Tasuvusaeg 65 000 km, üldine läbisõit 1mln km	Surumaagaasile ümberehitamine nimetatud automudeli puhul tasus end ära aastaga

Teadupärast ei ole metaangaasisõidukite ja -tanklate temaatika maailmas midagi väga uut, sest see on populaarne kütuseliik ja seda kasutatakse suhteliselt palju sellistes riikides: Pakistan (tänapäeval 3 500 000 metaangaasisõidukit ja 3300 metaangaasitanklat), Iraan (2 700 000 sõidukit ja 1540 tanklat), India (1 100 100 sõidukit). Rootsis oli 2010. aasta

detsembri seisuga ca 32 000 metaaangasisõidukit (sh 1400 bussi ja 500 veoautot) ning 169 metaaangasitanklat. Lisaks Rootsile annab Euroopas antud valdkonnas head eeskuju Saksamaa, kus käesoleval aastal nimetati parlamendiliikmete ametiautodeks uued surugaasil/biometaanil töötavad Mercedes-Benz E-klassi mudelid. Enim on Euroopas metaaangasisõidukeid Itaalias, üle 700 000, teisel kohal on Ukraina 200 000 metaaangasisõidukiga. Rohkem kui 10 miljonit sõidukit ülemaailmselt kasutavad igapäevaselt metaaangasi.

Meetmed metaankütuste kasutuse suurendamiseks transpordisektoris

Euroopas metaankütuste kasutamise poolest esirinnas olevate riikide (Itaalia, Rootsi, Saksamaa, Austria) analüüsist selgub, et metaankütuste kasutamine transpordisektoris on neis riikides kiirelt levinud, kuna see on selge poliitiline prioriteet, mis väljendub strateegiliste eesmärkide seadmisel. Näitena võib tuua Rootsi, kus on vastu võetud strateegiline eesmärk, et transpordisektor peab aastaks 2030 olema fossiilsetest kütustest sõltumatu. Neid eesmärke aitavad saavutada erinevad meetmed: toetused biometaani tehnoloogiate väljaarendamisele, tootmisele, väärimisele, edastamisele, tarbimisele (toetus metaankütustel töötavate sõidukite soetamiseks); maksusoodustused biokütustele (maksuvabastused, 0-kütuseaktsiis, 0-käibemaks); turgu reguleerivad meetmed („rohelised“ riigihanked), investeeringutoetused, taristu arendamise toetused, standardite kasutamine, ka vabatahtlikud meetmed.

Statistikaameti andmetel tarbiti Eestis 2011. aastal kokku 678 000 tuhat liitrit diisli ja 352 000 tuhat liitrit bensiini. Kasutades transpordikütusena iga-aastaselt 117 mln Nm³ biometaani aastas, asendaks see kogus 33% 2011. aasta bensiinitarbimisest või 17% diisliarbimisest. 117 mln Nm³ biometaani tootmine aastas tähendab, et Eestisse tuleb rajada 42 biogaasijaama, reaalsed jaamad võimsused ja asukohad sõltuvad arendajatest, tooraine paiknevusest ja (kätte)saadavusest. Selleks, et võimalike rajatavate biogaasijaamade juurde tekiks puhastussüsteemid, mis toodaksid biogaasist biometaani, tuleb poliitika kujundajatel esmajärjekorras viia ellu Eesti taastuvenergia tegevuskavas aastani 2020 biogaasivaldkonna

arengut edendavad tegevused ja EAS-i metaankütuste töөрühma poolt välja pakutud meetmed. Biometaan kasutamisel transpordikütusena on neli põhilist võimalust: tarnida toodetud biometaan maagaasitorustiku abil lõpptarbijani; tarnida biometaan balloonidega metaankütuste tanklasse nendes kohtades, kus maagaasitorustik puudub; tarnida biometaan balloonidega otse tarbijani või kasutada omatarbeks (näiteks põllumajandusmasinates, mille ümberehitamist toetatakse vastavalt põllumajandusministri 20. juuli 2010. a määrusele nr. 80). Euroopa Parlamendi Põllumajanduse ja Maaelu Arengu Komisjon tunnistas viimases (2011/2114 (INI)) raportis biogaasi tähtsust energiaressursina, mille tootmist tuleb kindlasti toetada ning mis aitab kaasa majanduse, põllumajanduse ja maaelu säästvale arengule ning keskkonna kaitsmisele. Euroopa Parlamendi resolutsiooni ettepanek põllumajanduslike sisendite tarneahela kohta kutsub komisjoni ja liikmesriike üles seadusandlike meetmetega edendama investeeringuid energia säästmisse ja taastuenergia tootmisse ettevõtetes kohapeal või kohaliku partnerluse projektide raames, eriti keskendudes jäätmete ja kõrvaltoodete kasutamisele kohalikul tasandil, parandades energiatõhusust ja tootes kohapeal energiat taastuvatest allikatest (eeskätt biogaasi).

Tulenevalt riigikogu poolt kinnitatud „Energiamajanduse riiklikust arengukavast aastani 2020” peab valitsus tagama taastuenergia osakaalu suurenemise energia lõpptarbimises. Eesti majandus- ja kommunikatsiooniministeerium on välja töötanud „Eesti taastuenergia tegevuskava aastani 2020“, mille valitsus kinnitas 26.11.2010. Eesti on võtnud siduva kohustuse tõsta taastuallikatest toodetud energia osakaalu energiabilansis 18%-lt (2005. a) 25%-ni aastaks 2020. Kui energia kogutarbimine aastal 2020 on eeldatavasti 3451 ktoe (tuhat nafta ekvivalenttonni), siis taastuvatest allikatest toodetud energia kogus, mis vastab 2020. aastaks püstitatud eesmärgile, on 863 ktoe. Samas tegevuskavas on seatud eesmärgiks saavutada taastuenergia osakaaluks transpordis kasutatavatest kütustest 2,7%, mis teeb taastuvatest allikatest toodetud transpordikütuste aastase tarbimise mahuks 92 ktoe. (Majandus- ja kommunikatsiooniministeerium 2010)

Kokkuvõte

Loomulikult on raskem nii taristu rajamise kui ka metaankütust kasutavate sõidukite turu loomisega nullist alustada, sestap ongi avalikul sektoril siin võtmerolliks pilootseadmete ja -tehaste rajamise toetamine, toetuste väljatöötamine ja jagamine. EAS-i juures tegutsenud metaankütuste edendamise töörühm on muuhulgas pakkunud välja järgmised võimalikud toetusmeetmed (EAS 2012).

- Toetada biogaasi puhastamist biometaaniks, toetuse suurus sõltuks puhtuseastmest (toetus toodangu müügile).
- Eeldusel, et biometaani kasutatakse transpordikütusena, viia sisse kuni 50%-line biogaasi- ja biogaasi väärindamise seadmete investeringutoetus kuni 42 ktoe taseme saavutamiseni.
- Suurendada, laiendada ja luua KIK-s, PRIA-s jm järgmisel EL eelarveperioodil põllumajandus- ja keskkonnainvesteeringu toetusi biogaasi ja biometaani tootmiseks.
- Töötada välja kokkulepitud kvaliteedistandardile vastava biometaani maagaasitorustikku sisestamise protseduur, asjaosaliste õigused ja kohustused (sh liitumis- ja jooksevkuulude jagunemine biometaani müüja ja maagaasitorustiku operaatori vahel).
- Luua regulatsioon, mis kohustab gaasivõrgu haldajaid võtma vastu standardile vastavalt puhastatud biogaasi (biometaani).
- Töötada välja biometaani võrguühenduste ja/või tanklate rajamise toetus.
- Mitte tõsta transpordikütuseks kasutatava metaankütuse aktsiisi enne 2018. aastat tänasest maagaasiaktsiisist kõrgemaks, et soodustada bensiini- ja diiselaudode ümberehitust paralleelseks metaangaasi kasutamiseks.
- Koostada turu loomise eesmärgil metaankütust tarbiva auto soetamist soodustav pakett eraisikutele.
- Võimaldada surumaagaasi ja biometaaniga sõitvatel masinatel tasuta parkida.
- Teha kohalikele omavalitsustele ettepanek soetada transpordivahen-

dite hangetel metaankütuseid kasutavaid (ühistranspordi)sõidukeid. Muuta linna ühistranspordi reisijateveo hankekonkursi tingimusi nii, et see soodustaks üleminekut metaankütusele.

- Säilitada aktsiisierisus maagaasile (säilitada ja tagada aktsiisivabas-
tus biometaanile). Maagaasiaktsiis ei tõuse enne 2018. aastat ja pärast
seda hakkab astmeliselt tõusma tasemele, mis ei ületa vedelkütuste
aktsiisi ning jätab metaankütustele kütuseturul eelistatud positsiooni
(näiteks 20-30% fossiilsetest kütustest odavamaks).

Toetuste allikaks võiksid olla EL- i struktuurifondid ja oluline osa võiks
tulla CO₂ kvoodimüügi tuludest, mis olemuslikult on ette nähtud taastuv-
energia edendamiseks, mitte riigi eelarvepuudujäägi katmiseks.

Illustreerimaks, mida tähendab näiteks natuke üle poole 2020. aasta ees-
märgi (50 ktoe) ulatuses biometaani kasutamine transpordis, esitame
keskmise läbisõidu ja kütusekulu alusel⁵ välja arvatud sõiduaute, veo-
auto ja linnaliinibusside hulga. Sellistel eeldustel tähendab see 4320
sõiduauto (1% bensiiniautode koguarvust 31.12.2011), 195 diiselbussi
(5% diiselbusside koguarvust 31.12.11) ja 1324 diiselveoauto (5% dii-
selveoauto koguarvust 31.12.11) kütuse asendamist sajabprotsendiliselt
biometaaniga. Kokku oleks sel juhul metaansõidukeid 5839.

Eesti biogaasisektori eestkõnelejad tunnetavad terava probleemina ühtse
ja sihipärase poliitilise strateegia ja ametkondliku tegevusplaani puudu-
mist arenguprotsesside suunamisel, mis tekitab arendajates ebakindlust.
Eesti taastuvenergia turg, sealhulgas biogaasivaldkond on väljakujunemi-
se etapis. Alles eeltoodud meetmete elluviimisel on lootust, et metaankü-
tuste kasutamine sõidukites hakkab Eesti hoogsamalt levima.

⁵ Veoautodel keskmine läbisõit 100 000 km/a, kütusekulu 35 l /100 km; busside keskmine
läbisõit 100 000 km/a, keskmine kütusekulu 40 l / 100 km; sõiduauto keskmine läbisõit
22 000 km/a, keskmine kütusekulu 6 l /100 km.

Kasutatud kirjandus

Metaankütuste kasutamine Eesti transpordis. Ettepanekud valdkonna arendamiseks. – EAS-i energiatehnoloogia programm, transpordis metaankütuste edendamise töörühm, Tallinn.

Eesti taastuvenergia tegevuskava aastani 2020. Kiidetud heaks Vabariigi Valitsuse 26. nov 2010 korraldusega nr 452. Majandus- ja kommunikatsiooniministeerium, Tallinn.

Oja, Ahto. 2012. Eesti biogaasi potentsiaali ärakasutamine, biometaanitootmise tasuvus ja takistused, miks transpordis seni biometaanitootmist ei kasutata. - Ettekanne rahvusvahelisel konverentsil "Aastal 2020 sõidab 10% Eesti transpordist sõnnikust, jäätmetest ja rohust tehtud biometaaniga. See on võimalik", 25.04.2012, Tallinn.
<http://www.monusminek.ee/GaasiKiirTee.php>

PRECONDITIONS AND INCENTIVES TO PROMOTE METHANE FUELS (NATURAL GAS AND BIOMETHANE) IN TRANSPORT IN ESTONIA

Ahto Oja, Jaanus Tamm, Jaanus Sahlk

The Estonian biomethane potential is 300 million Nm³, majority of this potential is unused (only 7,8 mln Nm³ of biomethane was produced in 2010 and half of it was burnt in flare). The target of renewable fuels consumption in transport is 10% by 2020 (equal to 117 mln Nm³ of biomethane or 92 ktoe), today the share of renewable fuels in transport is under 0,1%. Experiences of other countries to promote the methane fuels in transport are shortly described and Estonian package of measures to support methane fuels in transport is presented.

MOOTORIKÜTUSE SAAB PEAGI ROHUMAADELT JA LAUDA TAGANT

Tiit Kallaste^a, Anton Laur^a, Sirje Pädam^a, Anne Menert^a, Ülo Kask^b, Janita Andrijevska^a, Livia Kask^b

^a SA Stockholmi Keskkonnainstituudi Tallinna Keskus, Lai 34, Tallinn 10133
e-post: tiit.kallaste@seit.ee

^b TTÜ Soojustehnika instituut, Kopli 116, Tallinn 11712
e-post: ulo.kask@ttu.ee

Annotatsioon

Käesolev artikkel esitab võrdleva analüüsi erinevatest substraatidest (eeskätt biolagunevatest jäätmetest) toodetava biogaasi kasutamise kohta. Euroopa Liidu Kesk-Läänemere INTERREG IVA programmi 2007–2013 Lõuna-Soome ja Eesti allprogrammi projekti „Jäätmed mootorikütuseks” („From Waste to Traffic Fuel, W-FUEL“) raames käsitleti teemasid, mille peamine eesmärk oli vastavalt EL Direktiivi 2009/28/EMÜ poolt seatud sihtidele edendada biogaasi tootmist ja selle kasutamist mootorikütusena. Koostööprojektis Soome vabariigiga vaadeldi biometaaniks puhastatud biogaasi võimalikku kasutamist mootorikütusena Harjumaal ja Lääne-Viru maakonna näitel. Soomes hõlmas projekt Turu, Salo, Kotka ja Helsinki piirkondi. Projekti rahastati Euroopa Regionaalarengu Fondist (ERDF), Eestis oli kaasfinantseerijaks Keskkonnainvesteeringute Keskus (KIK). Käesolev artikkel keskendub peamiselt Harjumaale, kus näitlikuks objektiks valiti Tallinnast 35 km ida suunas asuv Hinnu seafarm, et selgitada, kas kulutasuvat mootorikütust biometaanist võiks ja saaks toota biolagundavatest jäätmetest, nagu nt läga keskmise suurusega farmist, reoveesete lähedalasuvast Kuusalu asula reoveepuhastist ning lisaks energiakultuuride biomass ümbritsevatelt haritavatelt ja kasutamata maadelt.

Märksõnad: Biolagunevad jäätmed, reoveesete, sõnnik, energiakultuurid, biogaas, biogaasijaam, biogaasi puhastamismeetodid, biometaan, mootorikütus, jäätmetekke vältimine, keskkonna- ja majandusliku mõju hindamine, tasuvusanalüüs.

Sissejuhatus

Suve hakul lõppes Euroopa Liidu Kesk-Läänemere INTERREG IVA programmi 2007–2013 Lõuna-Soome ja Eesti allprogrammi projekt „Jäätmed mootorikütuseks“ („From Waste to Traffic Fuel, W-FUEL“, http://www.wfuel.info/eng_index.php). Selle raames käsitleti teemasid, mille peamine eesmärk oli edendada biogaasi tootmist ja selle kasutamist mootorikütusena. Projekti põhifookuses oli biogaasi tootmine biolagunevatest jäätmetest ja reoveesetest. Samas olid vaatluse all ka teised nii Soomes kui Eestis sobivad ressursid biogaasi tootmiseks, nagu nt loomafarmide läga ja sõnnik ning rohtne biomass. Projekti juhtpartner oli Soome Põllumajandus- ja Toiduainete Uuringute Instituut (MTT Agrifood Research Finland), teised partnerid olid Helsingi Piirkonna Keskkonnanäteenistus (HSY), Tallinna Tehnikaülikooli soojustehnika instituut ning SA Stockholmi Keskkonnainstituudi Tallinna keskus. Eesti-poolsed projekti toetavad partnerid olid Keskkonnaministeerium, Tallinna Keskkonnamet, Lääne-Viru maavalitsus, Baltic Biogas OÜ, OÜ Mõnus Minek, AS Terts ja Saare maavalitsus. Projekti finantseeriti Euroopa Regionaalarengu Fondist (ERDF), Eestis toetas projekti kaasfinantseerijana Keskkonnainvesteeringute Keskus (KIK).

Projekti sihtpiirkondadeks olid valitud kaks maakonda Eestis (Harju ja Lääne-Viru) ning neli piirkonda Lõuna-Soomes (Turu, Salo, Helsinki ja Kotka), kus oli ülesandeks:

- kaardistada biolagunevate jäätmete koguseid,
- anda soovitusi biogaasi kasutamiseks mootorikütusena, koostootmisjaamas jm,
- koostada näitlike biogaasijaamade teostatavuse eeluuringud,
- valmistada pilootalade omavalitsustes ette biojätmete ja reoveesete koguste vähendamise ja taaskasutamise kavad;
- hinnata biogaasi tootmise ja kasutamise majanduslikku ja keskkonnamõju.

Projekti Eesti sihtpiirkonnad valiti välja eeskätt seetõttu, et nendes maakondades tekkis 2006. ja 2007. aastal (projekti ettevalmistamise ajal)

kõige rohkem biojäätmel ja reoveesetel (nt 2007. a andsid Harjumaa ja Lääne-Virumaa kokku 52% Eesti biojäätmel ja 62% reoveesetel).

Biogaasi potentsiaal Eesti sihtpiirkondades

Projekti tulemusena koostasid Eesti töörühmad biogaasi võimaliku tootmispotentsiaali prognoosid nii Harju- kui Lääne-Virumaal. Prognoos on koostatud aastaks 2020, lähtudes projekti püstituses kirjeldatud variandist B, mis eeldab biomassi laialdast kasutuselevõttu biogaasi tootmiseks (variant A eeldab senise olukorra jätkumist, mis pole suunatud biogaasi tootmise arendamisele). Biogaasi toorme olemasolu, aga ka mitmeid muid olulisi tegureid ja tingimusi arvestades selgitati välja ka näitlike biogaasi-jaamade võimalikud asukohad nendes piirkondades ja valiti sobilikumad biogaasi tootmistehnoloogiad.

Peamisteks ressurssideks biogaasi tootmisel on biojäätmel, reoveesete, läga ja sõnnik ning rohtne biomass. Biogaasi potentsiaali arvutamisel hinnati ja prognoositi kõigepealt nende ressursside tekkekogused, seejärel täpsustati, kui suur osa prognoositud kogustest võiks olla reaalset kasutatav biogaasi tootmisel. Täpsustatud toormekoguste alusel arvutati lõpptulemus – biogaasi (arvestatuna biometaanile) tootmispotentsiaalid vaadeldavates maakondades. Tulemused Harjumaa kohta on toodud tabelis 1 ja Lääne-Virumaa kohta tabelis 2.

Biomassi ressursside prognoosimisel biogaasi tootmiseks aastal 2020 kasutati järgmisi eeldusi ja hinnanguid:

Biojäätmel ja reoveesete

Biogaasi tootmiseks võimalike biojäätmel ja reoveesetel koguste prognoosimisel arvestati jäätmevältimise meetmete mõju. Harjumaa osas on lisaks oluline selgitada, et vältimaks ressursside ülehindamist, on biojäätmel ja reoveesetel kogused prognoosides arvestatud **ilma Tallinnata**. Põhjuseks on asjaolu, et kõik Tallinna jäätmekogused (sh biojäätmel) suunatakse lisaks Jõelähtme prügilale ka uude Ragn-Sells AS-i jäätmekütuse tehasesse (anti käiku oktoobris 2011). Tulevikus on kavas uues

jäätmekütuse tehases välja arendada ka liigiti kogutud biojäätmete taaskasutuskompleks. Siis võib ehk tekkida võimalusi biojäätmetest ka biogaasi tootmiseks, seni aga kasutatakse uues tehases eraldatavaid biolagunevaid jäämeid vaid kompostmulla tootmiseks ja täitematerjaliks. Kõik Tallinna reoveesetted töödeldakse aga veetootmisettevõtte AS Tallinna Vesi reoveepuhastusjaamas. Seal töötab juba pikemat aega biogaasijaam, mis toodab reoveesetest biogaasi omatarbeks – katlakütuseks ja mootorkütuseks kompressoritele.

- **Biojäätmete kogus toiduainetetööstusest jääb stabiilseks**

Biojäätmete kogus Harjumaa (ilma Tallinnata) toiduainetetööstuse ettevõtetes on suhteliselt väike (vt tabel 1). Lääne-Virumaal on selle tööstusharu biojäätmete kogus üsna suur, need tekivad peamiselt lihatööstusettevõttes Rakvere Lihakombinaat AS. Tulevikus on teiseks suuremaks biojäätmete tekitajaks kujunemas piiritust tootev Estonian Spirit Ltd, mis taasalustas Rakveres tegevust 2010. a. Biojäätmete kogused selles ettevõttes võivad ulatuda 30 tuhande tonnini (vt tabel 2). Intervjuud suuremates biojäätmekiitavates ettevõtetes on näidanud, et ettevõtted üritavad vähendada biojäätmekiitavate koguseid niipalju kui võimalik, vältimaks kiirelt suurenevaid prügilatasusid. Ettevõtted valivad ja arendavad uusi tehnoloogiaid, uusi tooteid ja uusi turge jäätmekiitavate vähendamiseks, aga ka tulu saamiseks taaskasutusest. Seetõttu on neid meetmeid arvestades eeldatud, et biojäätmekiitavate hulk toiduainetetööstuse ettevõtetest ei kasva aastaks 2020.

- **Olmejäätmete biolagunev osa võib väheneda max 0,3% aastas**

Biolagunevate jäätmekiitavate eraldi kogumist alustati 2007. aastal. Samm-sammult muutub see paremini korraldatuks ja efektiivsemaks. Samas mõjutavad biojäätmekiitavate koguseid kodumajapidamistes, kauplustes ja teenindusettevõtetes rakendatavad vältimismeetmed. On üsna realistlik eeldada, et esimesel viiel aastal peale vältimismeetmete rakendamist jäävad biojäätmekiitavate kogused veel suhteliselt samale tasemele. Selle aja jooksul inimeste käitumisharjumused vähehaaval muutuvad, mis võib edaspidi viia biojäätmekiitavate koguse vähenemisele 0,1 kuni 0,3% aastas.

- **Reoveesette kogus jääb püsivaks**

Reoveesette kogus võib lähiaastatel kasvada, kui rohkem kodumajapidamisi liitub olemasoleva kanalisatsioonisüsteemiga või propageeritakse tsentraliseeritud reoveekäitluse arendamist kohtades, kus see varem puudus (nt nagu on toimunud Saksamaal ja Rootsis). Siiski, arvestades reovee vältimise meetmeid, puhastamistehnoloogiate täiustumist ja foonina üldisi sotsiaal-majanduslikke võimalusi, on valdkonna eksperdid leidnud, et reoveesette kogused jäävad perioodil 2008–2020 suhteliselt stabiilseks (vt tabelid 1 ja 2).

Sõnnik ja läga (vedelsõnnik)

- **Veised.** Prognoosides on eeldatud veiste arvu kasvu 1,5% (2009. a tasemest) aastaks 2020. See kasv võib toimuda seoses ülemaailmse nõudluse kasvuga piimatoodetele, arvestades sealjuures Eesti suhteliselt sobivaid kliimaatilisi tingimusi veisekasvatuseks. Eeldatakse ka, et EL-i toetused Baltimaade veisekasvatajatele suurenevad (praegu on need kordades väiksemad kui EL-i vanades liikmesriikides).
- **Sead.** Eeldatakse 1%-list arvu kasvu aastaks 2020. Mõnel viimasel aastal on suurenenud nõudlus Venemaal põhjustanud elussigade ekspordi kasvu Eestist. Samas on siin oluline vältida ekspordi kasvuvõimaluste ülehindamist tulenevalt välispoliitiliste suhete ebastabiilsuse jätkumisest Eesti ja Venemaa vahel.
- **Kanad.** Lähtudes viimaste aastate trendist, on eeldatud kanade arvu püsimumist muutumatuna.

Energiakultuurid biogaasi tootmiseks

Praegu ei kasutata energiakultuure biogaasi tootmiseks ei Harju- ega Lääne-Virumaal. Eesti Biogaasi Ühing on siiski hinnanud, et umbes 5%-l haritaval maal ja 20%-l kasutamata maal on võimalik energiakultuuride kasvatamine biogaasi tootmiseks.

Tabel 1. Biomassi kogused ja biometaani toodang Harjumaal: variant B aastaks 2020

Table 1. Biomass production and biomethane yield in Harju County: version B for 2020

Biomassi liigid	Kogus 2008	W-Fuel Variant B 2020	Kättesaadavus biogaasi tootmiseks 2020		CH ₄ took	Metaani toodang
	t	t	%	t	m ³ /t VM	m ³ /a
I Biojäätmed toiduainetetööstuselt	2660	2660	-	-	-	517 104
sh: Loomsete kudede jäätmed	2660	2660	90%	2394	216	517 104
II Olmejäätmed	24 759	24 263	-	-	-	766 771
sh: Biologundatavad köögi- ja sööklajajäätmed	241	236	33%	78	97	7566
Toiduõli ja -rasv	4	4	33%	1,3	288	374
Biologundatavad aia- ja haljastusjäätmed	324	317	0%	-	-	-
Biojäätmete osa segaolmejäätmes	24 190	23 706	33%	7 823	97	758 831
III Reoveesete	23 420	23 420	100%		42	983 640
IV Sõnnik*	210 326	213 152	-	-	-	2 109 158
sh: Veiste vedelsõnnik	172 457	175 044	55%	96 274	10	962 740
Sigade vedelsõnnik	23 859	24 098	99%	23 857	10	238 570
Kanasõnnik	14 010	14 010	80%	11 208	81	907 848
V Energiakultuurid biogaasi tootmiseks	0	40 640 oKA	-	-	-	12 903 200
sh: Päideroog	0	20 320 oKA	100%	20 320 VS	300 m ³ /t oKA**	6 096 000
Ristik	0	20 320 oKA	100%	20 320 VS	335 m ³ /t oKA**	6 807 200
KOKKU						17 279 873

Energiakultuuride saagi, sõnnikukoguste ja biometaani toodangu arvutamise meetodika on detailsemalt kirjeldatud projekti W-Fuel lõpparuandes (www.wfuel.info);

VM – värske mass (tooraine);

oKA – orgaanilise kuivaine sisaldus;

* Baasaastaks sõnnikukoguste prognoosimisel on 2009;

** Ligikaudu 100 m³/t VM

2009. aastal oli PRIA andmetel Harjumaal umbes 55 tuh ha haritavat ja 43,4 tuh ha kasutamata maad. Lääne-Virumaal olid samal aastal need näitajad umbes 97 tuh ha haritavat ja 23,3 tuh ha kasutamata maad. Lähtudes viimaste aastate tendidest ja ekspertide hinnangutest on eeldatud, et haritava maa pind võib suureneda umbes 0,5% ja kasutamata maa pind umbes 2% aastas. Kasutamata maa kohta on arvestust peetud 2002. aastast, kui loodi PRIA põllumassiivide register. Juba 2000-ndate aastate algul kasutusest väljajäänud maad on tõenäoliselt 2020. aastaks metsastunud ja neid ei saa kasutada energiakultuuride kasvatamiseks. Seetõttu on prognoosarvutustes aluseks võetud vaid see osa kasutamata maast, mis lisandub perioodil 2009–2020.

Biogaasi tootmise toormena soovitatakse kasvatada kahte liiki energiakultuure – päideroogu (*Phalaris arundinacea*) ja ristikut (*Trifolium pratense*), nende keskmine aastane saagikus on ligikaudu 9 t/ha kuivaine. Eeldatud on nende kultuuride kasvatamist võimalikel kasvupindadel võrdse osakaaluga. Lähtudes nende kasvupindade prognoosidest, on võimalikuks rohtse biomassi koguseks 2020. aastal hinnatud Harjumaal 40,6 tuh tonni ja Lääne-Virumaal 50,6 tuh tonni (orgaanilise kuivaine järgi), vt tabelid 1 ja 2.

Prognooside tulemused

Ligikaudsed tulemused selle kohta, kui palju biometaanit oleks võimalik erinevatest substraatidest toota aastal 2020, on Harjumaal koht tabelis 1 ja Lääne-Virumaal koht tabelis 2. Biometaanit võimalikuks toodanguks Harjumaal (ilma Tallinnata) on prognoositud ligikaudu 17,3 miljonit m³/a. Suurim biometaanit toodangu potentsiaal on hinnatud energiakultuuridel (umbes 75% kogu potentsiaalist), seejärel vedelsõnnik ja sõnnik põllumajandussektorist (ca 12%), reoveesetted (5,6%) ning olmejäätmetes sisalduvad ja tööstuse biojäätmed (vastavalt 4,4 ja 3%). Hinnang biometaanit tootmispotentsiaalile Lääne-Virumaal aastal 2020 ulatub kuni 24,4 miljoni m³/a. Suurima potentsiaaliga on energiakultuurid (umbes 66% kogupotentsiaalist), järgnevad tööstuse biojäätmed (ca 13%), reoveesetted (11,5%), vedelsõnnik (9%) ja olmejäätmetes sisalduvad biojäätmed (0,6%).

Tabel 2. Biomassi kogused ja biometaan toodang Lääne-Virumaal: variant B aastaks 2020

Table 2. Biomass production and biomethane yield in Lääne-Viru County: version B for 2020

Biomassi liigid	Kogus 2008	W-Fuel Variant B 2020	Kättesaadavus biogaasi tootmiseks 2020		CH ₄ took	Metaani toodang
	tonni	tonni	%	tonni	m ³ /t VM	m ³ /a
I Biojäätmed toiduainetetööstuselt	6334	36 334	-	-	-	kuni 3 151 200
sh: Loomsete kudede jäätmad	6334	6334	90%	5700	216	1 231 200
Piirituse destilleerimisjäädgid	0	30 000	kuni 100%	kuni 30 000	64	kuni 1 920 000
II Olmejäätmad	5099	5022	-	-	-	158 119
sh: Biolagundatavad köögi- ja sööklajajäätmad	4	4	33%	1,3	97	128
Toiduõli ja -rasv	110	110	33%	36,3	288	10 454
Biolagundatavad aia- ja haljastusjäätmad	305	300	0%	-	-	-
Biojäätmete osa segaolmejäätmetes	4680	4608	33%	1521	97	147 537
III Reoveesetted	67 371	67 371	100%	67 371	42	2 829 582
IV Sõnnik*	575 303	583 505	-	-	-	2 174 900
sh: Veiste vedelsõnnik	494 354	501 770	31%	155 549	10	1 555 490
Sigade vedelsõnnik	78 626	79 412	78%	61 941	10	619 410
Kanasõnnik	2323	2323	0%	-	-	-
V Energiakultuurid biogaasi tootmiseks	0	50 588 oKA	-	-	-	16 061 690
sh: Päideroog	0	25 294 oKA	100%	25 294 VS	300 m ³ /t oKA**	7 588 200
Ristik	0	25 294 oKA	100%	25 294 VS	335 m ³ /t oKA**	8 473 490
KOKKU						kuni 24 375 491

Selgitused: vt tabel 1

Järgnevalt esitatakse lühiülevaade projekti „W-FUEL“ raames tehtud biogaasi tootmise näitlikust juhtumiuuringust Harjumaal Hinnu seafarmi kohta, mis paikneb Tallinnast 35 km ida suunas asuva Kuusalu valla Al-

lika külas. Eesmärgiks oli selgitada, kas läga keskmise suurusega farmist ja reoveesete lähedalasuvast Kuusalu asula reoveepuhastist, aga ka energiakultuuride biomass ümbritsevatelt haritavatelt ja kasutamata maadelt, saaksid anda kulutasuvat biogaasi või mitte. Hinnu seafarmis on keskmiselt 11 500 looma. Ligikaudsete arvutuste kohaselt suudab farm koos rohtse biomassi kasutamisega toota 1,4 mln Nm³ biometaanit aastas. Üsna metaanivaest toorbiogaasi saaks otse kasutada soojuse ja elektri koostootmisel. See on seni olnud levinuim biogaasi kasutamiseviis. Arvutused näitavad, et juhul, kui biogaasi kasutatakse Hinnu farmi juurde ehitatavas koostootmisjaamas, võib elektritoodang ulatuda 5 GWh ja soojuse toodang 5,2 GWh-ni aastas.

Teine variant näeb ette puhastatud biogaasi kasutamist mootorikütusena kas kohalikus gaasitanklas või selle suunamist lähedalasuvasse maagaasijaamasse. Aastane energiatoodang Hinnu biogaasijaamas võimaldaks mootorikütusega varustada ligikaudu 1200 sõiduautot või 135 raskeveokit. Selle variandi järgi võibki saavutada parema tulemuse toorbiogaasi puhastamisel maagaasi omadusteni – nn biometaaniks. Biometaanit omadused on võrreldavad maagaasi omadustega ning neid kahte kütust saab kasutada paralleelselt – kummaski on põhikomponendiks metaan. Biometaanit ja maagaasi erinevus seisneb selles, et esimest toodetakse taastuvatest energiaallikatest, teine on fossiilkütus.

Kummagi konkureeriva variandi jaoks viidi läbi biogaasi tootmise ja selle edasise kasutamise keskkonna- ja majanduslike mõjude hindamine ning variantide võrdlus andis üsnagi üllatavaid tulemusi. Tehtud analüüsi põhjal võib öelda, et keskkonnamõjude hindamistulemused on suurel määral sõltuvad elektritootmise viisist. Biogaas, mis asendab ühe kilovatt-tunni elektrit Eesti keskmises elektritootmise struktuuris, kus täna veel ca 87% kuulub põlevkivielektrile, annab suurema emissioonide kokkuhoiu ühe kWh kohta, võrreldes tema kasutamisega mootorikütuseks. Kuid juhul, kui biogaas asendab marginaalset ehk nn piirelektrit, mis toodetakse Eestis tõenäoliselt maagaasist, on olukord vastupidine. Keskkonnamõjud väljendati hindamisel rahalises vääringus, kasutades riigile omaseid väliskulude väärtusi, mis põhinevad varasematel uurimistöödel.

Tulemused on suurel määral mõjutatud EL-i kasvuhoonegaaside lubatud kogustega kauplemise skeemist, milles on osalisteks ka põlevkivielektrijaamad. Kui need suudavad vähendada oma heitmeid tavapärasest enam, võivad nad selle võrra oma saastekvooti turul teistele kauplemisskeemi osalistele maha müüa, kes siis omakorda saavad õiguse enamale CO₂ emissioonile. Kauplemisskeemi kogumaht on fikseeritud ja kauplemine toimub nendes piirides. Kui biogaasist toodetud elekter asendab kauplemisskeemis fossiilsete kütuste baasil toodetud elektrit, siis vaatamata sellele, et skeemi osaliste koguemissioon ei muutu, on sama kogus energiat toodetud kuluefektiivsemalt ja pealegi, taastuenergiaallikatest. Arvestades kasvuhoonegaaside lubatud heitkogustega kauplemise skeemi mõju, annab biogaasi kasutamine mootorikütusena siiski suurema keskkonnanaisundi paranemise kui biogaasist kas keskmise või piirelektri tootmine. Majandusliku mõju hindamise tulemused näitavad, et biometaani tootmine on sotsiaalselt tulus. Saadud tulemused võimaldavad ka väita, et ühiskonnale tervikuna annab biogaasist mootorikütuse tootmine suuremat kasu kui elektri ja soojuse koostootmine. Teatud ettevõtte, biogaasi tootja tasandil võib tulemus olla vastupidine või siiski ka küsitav. Elektri ja soojuse koostootmisjaama investeeringu kulu on väiksem kui biogaasi puhastusseadmetel. Lisaks, arvestades praegust toetussüsteemi taastuva- test energiaallikatest toodetud elektrile (nn soodustariife – ingl k *feed-in tariffs*), on eeldatav tulu elektri ja soojuse müügist suurem kui biometaani müügist mootorikütusena. Aga seda vaid tingimusel, kui soojust on võimalik efektiivselt kasutada, eriti soojal aastaajal, kui kütta pole vaja. Konkreetsed arvutused Hinna farmi kohta näitasid, et sotsiaalsete tulude/ kulude suhteks koostootmisjaama variandi puhul kujuneks soojuse müügi korral 1,18 (ilma soojuse müügita suhe vaid 0,85 ehk tulusus puudub). Samal ajal biogaasist mootorikütuse tootmisel kujuneks tulude/kulude suhteks 1,56 (Kallaste jt 2012).

Samal ajal peame paratamatult arvestama, et biogaasi tootmine mootorikütuseks on Eestis alles uus, kuid väga kiiresti arenev valdkond, mis vajab nii tehniliste standardite väljatöötamist kui ka rahaliste toetussüsteemide ülevaatamist, kõrvaldamaks praegused ebakõlad erinevate taastuenergia liikide edendamisel.

Kokkuvõte

Kõnealuse rahvusvahelise koostööprojekti tulemuste põhjal saab teha üsna ühese järelduse – biogaasi tootmine ja selle puhastamine maagaasi kvaliteedini võimaldab teda kasutada mootorikütusena ning on kokkuvõttes kogu ühiskonna seisukohalt sotsiaalselt tasuvam kui biogaasi kasutamine soojuse ja elektri koostootmiseks. Käesolevaks ajaks ASi Eesti Gaas rajatud surumaagaasi tanklad, mille arv kasvab aasta lõpuks loodetavasti juba viieni, loovad ühtlasi hea eelduse biometaani mootorikütusena kasutamise kiiremaks arendamiseks.

Kasutatud kirjandus

Ülo Kask, Janita Andrijevskaia, Livia Kask, Priit Heinla, Meeli Hüüs, Tiit Kallaste, Anton Laur, Anne Menert, Sirje Pädam, Saija Rasi, Erja Heino, Saana Ahonen, Sanna Marttinen, Esa Aro-Heinilä, Nea Teerioja. From Waste to Traffic Fuel (W-Fuel). MTT Report 53, Jokioinen, 2012, 92 p. [http://www.wfuel.info/ee_materjalid.php].

Tiit Kallaste, Anton Laur, Anne Menert, Sirje Pädam, Ülo Kask, Janita Andrijevskaia, Livia Kask, Priit Heinla. Biogaasi tootmise ja kasutamise pilootuuring Harjumaal. MTT Raportti 54, Jokioinen 2012, 40 lk. [http://www.wfuel.info/ee_materjalid.php].

Ülo Kask, Janita Andrijevskaia, Livia Kask, Priit Heinla, Tiit Kallaste, Anton Laur, Anne Menert, Sirje Pädam. Biogaasi tootmise ja kasutamise pilootuuring Lääne-Virumaal. MTT Raportti 52, Jokioinen 2012, 36 lk. [http://www.wfuel.info/ee_materjalid.php].

MOTOR FUEL COULD BE SOON PRODUCED FROM FROM GRASSLANDS' AND ANIMAL FARMS' BIOMASS

Tiit Kallaste, Anton Laur, Sirje Pädam, Anne Menert, Ülo Kask,
Janita Andrijevskaja, Livia Kask

In the INTERREG IVA Southern Finland – Estonia Sub-programme for 2007–2013 efforts towards finding solutions to the tasks set by the EU Directive 2009/28/EC were undertaken in co-operation with Finnish and Estonian researchers in the project „*From Waste to Traffic Fuel, W-Fuel*“. Four case areas in southern Finland; Helsinki, Kotka, Salo and Turu, and two in northern Estonia; Harjumaa and Lääne-Virumaa were selected. The purpose of the project was to promote the sustainable production and use of biogas using locally-sourced biodegradable waste materials from the food and beverage industry and the agricultural and municipal sectors. The ultimate aim of the project was to upgrade the biogas (produced based on anaerobic digestion of biodegradable wastes, sludge, manure, slurry and energy crops) to biomethane with a methane content similar to natural gas, to be further used as transport fuel with the aim of reducing traffic-borne emissions, in particular CO₂. The Hinnu pig farm in Harjumaa has taken for detailed case study in present paper. The project combined waste, energy and traffic solutions in order to demonstrate a decrease in emissions, costs and the use of materials. On basis of the gathered data, the biogas potential and prerequisites of the pig farm case study were analysed. Furthermore, the environmental, economic and other regional effects of the different options were compared. By developing research-based feasibility plans, project results present solutions for public and private companies, local governments and research institutes and encourage biomethane use for transport fuel compared biogas use in CHP.

TAASTUVKÜTUSTE KASUTAMISE KOORDINEERIMINE LÕUNA-EESTI REGIOONIS

Jaanus Uiga^{1,2}, Martin Kikas¹, Marek Muiste^{1,2}

¹Tartu Regiooni Energiaagentuur, Riia 181a, Tartu 51014,

²Eesti Maaülikooli tehnikainstituut, Fr. R. Kreutzwaldi 56, Tartu 51014
e-post: jaanus.uiga@emu.ee, martin.kikas@trea.ee; marek.muiste@emu.ee

Annotatsioon

Puidu roll energiatootmises on traditsiooniliselt olnud Lõuna-Eesti regioonis kõrge: põllumajandusühiskonna jaoks oli puit peamiseks energiaressursiks. Puitu kui taastuvat energiaressurssi väärtustab ka kaasaegne keskkonnaseisundi jätkusuutlikkust taotlev energia- ja kliimapolitiika. Siiski on puidu kui kütuse positsioon energiatootmises muutumas: nõudlus väärindatud puitkütuste järele on järjest kasvav, kuid tarbimise kasv toimub kogu puiduenergia sektoris. Puidu ja biomassi kasutamise struktuur muutub järjest keerulisemaks, tuues kaasa vajaduse valdkonna paremaks koordineerimiseks ning planeerimiseks.

Käesolevas artiklis on antud ülevaade Lõuna-Eesti biomassi kasutamise arengukava loomise alustest, eeltööst, meetodikast ja sisust. Ülevaade antakse Lõuna-Eesti bioenergia ressursidest ning nende kasutamise võimalikkusest. Samuti analüüsitakse regiooni energia tarbimise struktuuri ja mahtu.

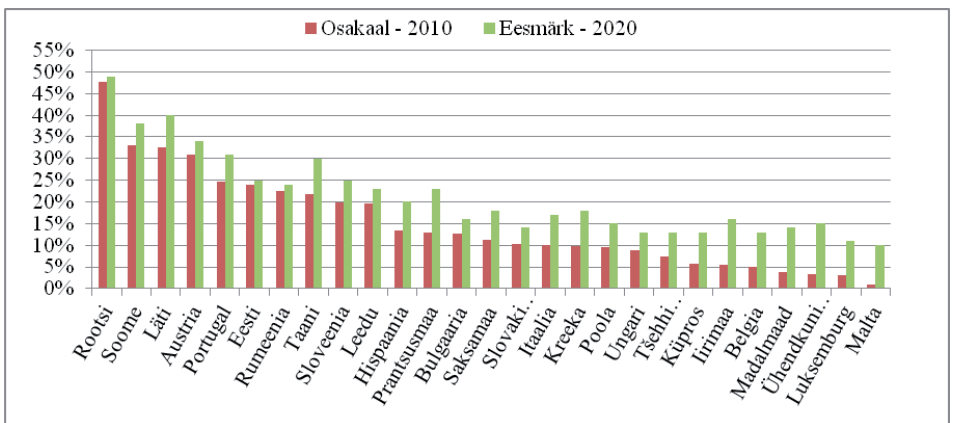
Märksõnad: puit, taastuvad energiaallikad, energia, arengukava, puitkütuste primaarenergia, ressurss, tootmine, tarbimine

Sissejuhatus

Eesti energiasektor elab läbi noorenduskuuri, mille käigus uuenevad infrastruktuur, energiakaubanduse põhimõtted ning juhtimise alused. Lühikese ajaga on käima läinud kolm arvestatava suurusega soojus- ja elektrienergia koostootmisjaama (SEK), samuti on paigaldatud tuulegeneraatoreid ning valminud kaks biogaasijaama, millele lähiajal on veelgi lisa oodata. Elektrituru avanemine ning gaasituru reformid on läbi viimas suurimat turumuudatust alates kohaliku soojatootmise erastamisest Eestis 1990. aastate keskel. Seda protsessi täiendab efektiivsuse kasv energia-

sektoris nii energia tootmise, ülekande kui tarbimise poolel. Need protsessid pole isetekkelised, vaid eeldavad valdkonna aktiivset mõjutamist Euroopa Liidu ja Eesti riigi poolt. Juba mõned aastad töötab Lõuna-Eestis Tartu Regiooni Energiaagentuur (TREA), mis toetab valdkonna arengut ning nõustab energiasektorit sõltumatu osapoolena. Taastuvkütuste kasutamise arendamine on agentuuri üks prioriteete ja peamisi tegevusi ning selle raames tehakse koostööd nii omavalitsuste, ülikoolide, ettevõtete kui kolmanda sektoriga. Valdkonna tegevuse koordineerimiseks on TREA alganud biomassil põhinevate kütuste kasutamise arengukava koostamise Lõuna-Eesti regioonis.

Eestis moodustas 2010. aastal biomassist toodetud energia 97% taastuvatest energiaallikatest toodetud energia summaarsest lõpptarbimisest (Koppel, 2011). Seega aitas biomassi kasutamine suuresti kaasa taastuvate energiaallikate üldise osakaalu jõudmiseni 24%-ni energia summaarsest lõpptarbimisest (joonis 1) (Liikmesriikide aruanded Euroopa Komisjonile taastuvatest energiaallikatest toodetud energia kasutamise ja edendamise edusammude kohta, 2011).



Joonis 1. Riiklikud üldeesmärgid seoses taastuvatest energiaallikatest toodetud energia osakaaluga lõpptarbimisest aastal 2020 ning nende täitmine aastal 2010
 Figure 1. National overall targets for share of energy consumption of energy from renewable sources in gross final consumption of energy in 2020 and its fulfillment in 2010

Et taastuenergiaallikate laialdasem kasutamine on üks EL-i põhisuundumusi ka pärast aastat 2020, näitab Euroopa Komisjoni teatis „Konkurentsi võimeline vähese CO₂-heitega majandus aastaks 2050 – teetähis“. Kava kohaselt peaks Euroopa Liit tervikuna vähendama CO₂ heidet energiatootmisest 80–95% aastaks 2050, kusjuures taastuenergia osakaal lõplikust energiatarbimisest peaks ulatuma vähemalt 55%-ni. Järelikult on taastuenergiaallikatel ning efektiivsete tehnoloogiate kasutamisel selle eesmärgi täitmisel võtmeroll. Seega on Eestis vaja koostada veel mitmeid selle valdkonna arengu prioriteete ning suundumusi määratlevaid dokumente.

Lisaks riiklikul tasandil toimivatele arengudokumentidele on vaja regionaalseid arengukavasid, mis looksid seosed riiklike ning regionaalsete prioriteetide vahel. Seetõttu on Lõuna-Eesti regiooni biomassi energeetika kasutamise arengukava sisenditeks võetud regioonides eelnevalt tehtud alus- ja ressursiuuringud ning maakondlikud ja riiklikud arengudokumendid ja -prioriteetid.

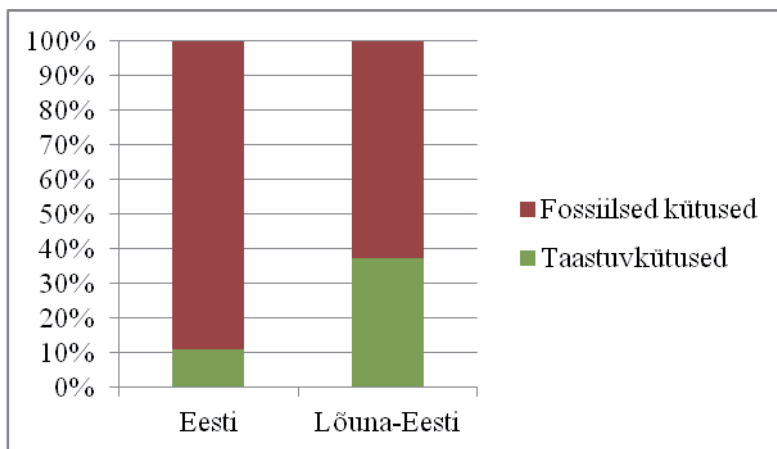
Lõuna-Eesti biomassi kasutamise arengukavas on Lõuna-Eesti regioonina käsitletud Jõgeva, Põlva, Tartu, Valga, Viljandi ja Võru maakonda. Eelmainitud maakonnad hõlmavad Eesti pindalast 1/3 (1553 tuhat hektarit e 36%). Seda piirkonda iseloomustab suur metsasus ning metsa- ja puidutööstuse suur osakaal, mis loob võimaluse selle ressursi laialdasemaks ja efektiivsemaks kasutuseks.

2011. aastal moodustasid taastuvkütused (küttepuid, puiduhake ja -jäätmed) Lõuna-Eesti regioonis 37% tarbitud kütuste primaarenergiast (joonis 2).

Arengukava ülesehitus

Lõuna-Eesti regiooni biomassi energeetika kasutamise arengukava ülesehitus on järgmine:

- ülevaade Euroopa Liidu ning Eesti energeetika suundumustest;
- biomassi energeetika kasutamise hetkeolukord Lõuna-Eesti regioonis;



Joonis 2. Taastuvkütuste primaarenergia osakaal tarbitud kütuste primaarenergiast 2011. aastal (Statistika andmebaas, 2012)

Figure 2. Share of primary energy of renewable fuels from the primary energy of fuels used in 2011 (Statistika andmebaas, 2012)

- regiooni potentsiaalne ning tehniliselt kasutatav biomassi ressurss soojusenergeetikas ja biokütuste tootmises;
- eesmärkide seadmine ja kirjeldus;
- biomassi energiatehnoloogiate ülevaade;
- meetmed, oodatavad tulemused, nende maksumus, ajakava.

Arengukava peamiseks ülesandeks on vastava sektori edendamine läbi seatud eesmärkide ning nendele vastavate meetmete ja tegevuste kirjeldamise. Meetmed ja tegevused pannakse paika töögruppide poolt, kuhu on kutsutud turuosalised. Samuti on võimalik arengukava eelversiooni lugeda veebileheküljelt www.trea.ee, kust leiab ka juhised meetmete ja tegevuste jaoks sisendite andmiseks.

Lõuna-Eesti biomassi potentsiaalne ja tehniliselt kasutatav ressurss

Biomassi energeetikas kasutamise eelduseks on biomassi potentsiaalse ning reaalselt kasutatava ressursi analüüs. Arengukava koostamisel on hinnatud biomassi potentsiaalset ressursi järgmistele taastuvatele energiaallikatele:

- metsatööstus ning selle jäätmed;

- puidujäätmed;
- rohtne biomass põllumajandusest;
- biolagunevad olmejäätmed.

Metsast saadava biomassi hindamisel kasutati statistilise metsainventeerimise (Keskkonnateabe Keskus, 2012 a) ning Maaelu Edendamise Seltsi poolt tellitud uuringu (Muiste jt, 2007) tulemusi. Rohtse biomassi ning sõnniku ressursi hindamisel lähtuti nii Põllumajanduse Registrite ja Infosüsteemide Ameti (PRIA) kui ka Statistikaameti andmetest aastate 2008–2010 kohta.

Jäätmete ressursi hinnati Keskkonnateabe Keskuse jäätmearuandluse infosüsteemi aastate 2008–2010 andmemassiivide baasil. Aastas tekkivaid settekoguseid reoveepuhastites on hinnatud OÜ Eesti Keskkonnauuringute Keskuse koostatud uuringus (Kõrgmaa, 2010). Pilliroo potentsiaalse ja tehniliselt kasutatava ressursi kogust on arvatud projekti „Roostike kasutamise strateegia Soomes ja Eestis“ raames (Kask jt, 2007).

Lõuna-Eesti biomassi ressursi kirjeldamise aluseks on kaks praegusel ajal enim levinud tehnoloogiat: põletamine ning anaeroobne kääritamine. Põletamiseks sobivad lisaks puitsele biomassile (küttepuud, raiejäätmed ja lageraiete kännud) ka teraviljakasvatusest saadav põhk, pilliroog ning jäätmed. Põhu koguste hindamisel kasutati teravilja kasvupindu ning keskmist toodangut. Jäätmete hulka arvestati lisaks puukoore- ja puidujäätmetele ka paber- ja kartongpakendid, mis klassifitseeriti kui põletatavad segaolmejäätmed.

Anaeroobseks kääritamiseks on sobiv pikaajalistelt ning kasutusest väljas olevatelt rohumaadelt saadav rohtne biomass, üle sajapealiste karjadega veise- ja seapidajate juures tekkiv sõnnik ning reoveepuhastites tekkivad setted. Kasutatavate jäätmete hulka arvestati loomsete ja taimsete kudede jäätmeid ja muid biolagunevaid jääkprodukte tööstusest, kaubandusest ning kodumajapidamistest, mida ei kajastatud põletatavate jäätmete all. Tehniliselt kasutatava ressursi hindamisel võeti arvesse tehnoloogia olemasolu ning selle rakendamise majanduslikku otstarbekust.

Metsast saadava biomassi tehniliselt kasutatav koguse erinevus potentsiaalsest on tingitud lehtpuude kändude ressursiga mitteamistamisest ning raiejäätmete realiseeritavuse vähendamist 12%-ni raie mahust.

Põhu, sõnniku ja rohumaadelt saadava märja biomassi kasutamine energeetikas on otstarbekas vaid juhul, kui transpordivahemaad on lühikesed ning toorainet ei kasutata muudel otstarvetel (näiteks rohusilo kasutamine loomasöödana). Tooraine väärtust orgaanilise väetisena kasutamisel võib samuti lugeda piiravaks teguriks, kuid tuleb arvestada, et orgaanilise väetisena saab kasutada ka kääritusprotsessi jääke. Biologunevate olmejäätmete kogumist piirab jäätmete sorteerituse aste ning tööstuses tekkivate jääkproduktide kasutamine muudel otstarvetel (näiteks õlleraba loomasöödana).

Ressursiuuringu ülevaade on esitatud tabelis 1.

Tabel 1. Lõuna-Eesti aastane biomassi primaarenergia ressurs
Table 1. Yearly primary energy from biomass resources of Southern-Estonia

Muundamise liik	Energiaallikas	Primaarenergia, TJ	Tehniliselt kasutatav ressurs, TJ
Põletamine	Metsast saadav biomass	12 357,8 ^{a, b}	10 721,9
	Puidujäätmed	2222,8 ^c	2000,5
	Pilliroog	441,7 ^d	222,2
	Põletatavad segaolmejäätmed	182,3 ^c	54,7
	Põhk	3180,5 ^{e, f}	318,1
Anaeroobne kääritamine	Rohumaadelt saadav biomass	4806,4 ^e	961,3
	Sõnnik	957,2 ^e	957,2
	Reoveesetted	14,3 ^g	14,3
	Biologunevad olmejäätmed	121,3 ^c	68,8
	Biologunevad segaolmejäätmed	30,9 ^c	9,3
	Kokku	24 315,2	15 328,1

^a (Keskkonnateabe Keskus, 2012a)

^b (Muiste jt, 2007)

^c (Keskkonnateabe Keskus, 2012b)

^d (Kask jt, 2007)

^e (Põllumajanduse Registrate ja Infosüsteemide Amet, 2012)

^f (Statistika andmebaas, 2012)

^g (Kõrgmaa, 2010)

Lõuna-Eesti aastasest kasutatavast biomassi primaarenergiast moodustavad kõige suurema osa puit ning puidujäätmed. Biogaasi tootmine on küll perspektiivne võimalus, kuid tehniliselt kasutatav ressurss moodustab väikese osa teoreetilisest. Põhjuseks on tooraine kogumisega seonduvad transpordi- ja tööjõukulutused. Biogaasi tootmist sõnnikust ja reoveemudast lihtsustab tootmise kontsentreeritus.

Biomassi kasutamine

Biomassi kasutuse hindamiseks Lõuna-Eesti regioonis on kasutatud Statistikaameti andmeid ja Keskkonnaametile esitatud aruannetes kajastatud tarbitud kütuste koguseid. Kütuste energeetikas tarbimist Lõuna-Eestis kirjeldab alljärgnev tabel (tabel 2).

Tabel 2. Lõuna-Eestis tarbitud kütuste primaarenergia 2011. aastal
Table 2. Primary energy content of fuels used in Southern-Estonia in 2011

	Haldusüksus	Taastuv- kütused, TJ	Fossiilsed kütused, TJ	sh fossiilsed transpordi- kütused, TJ	Kokku, TJ	Taastuv- kütuste osakaal, %
Statistika- ameti andmed	Jõgeva maakond	522	1342	1015	1864	28,0
	Põlva maakond	387	1140	803	1527	25,3
	Tartu maakond	3544	6012	3638	9556	37,1
	Valga maakond	625	841	677	1466	42,6
	Viljandi maakond	1329	2234	1270	3563	37,3
	Võru maakond	1004	881	719	1885	53,3
	Kokku	7411	12 450	8122	19 861	37,3
Välisõhu saastelubade aruandlus	Jõgeva maakond	183	285	-	469	39,1
	Põlva maakond	90	404	-	494	18,3
	Tartu maakond	2616	1532	-	4148	63,1
	Valga maakond	570	213	-	784	72,8
	Viljandi maakond	594	429	-	1023	58,1
	Võru maakond	804	143	-	947	84,9
	Kokku	4858	3007	-	7865	61,8

Kuivõrd välisõhu saaste aruandluse kohustus on isikutel või ettevõtetel, kelle katelseadme nimivõimsus ületab 300 kW, siis võib järeldada, et biomass moodustab 62% Lõuna-Eesti suuremate katelseadmete poolt tarbitavast kütusest. Statistikaameti andmetel, mis muuhulgas arvestab ka transpordikütuste tarbimist ning tarbimist erasektoris, on taastuvkütuste osakaal Lõuna-Eesti regioonis 37%. Jättes arvestamata transpordikütused (mida välisõhu saastelubade aruandluses ei kajastata), saame taastuvate kütuste kasutamise osakaaluks 63%, mis on sarnane välisõhu saastelubade aruandluse põhjal arvutatuga.

Seega on Lõuna-Eesti biomassi kasutamise osakaal energia tootmises Eesti keskmisega võrreldes suhteliselt heal tasemel. Selle suurendamine on võimalik kasutatavate seadmete efektiivsuse tõstmise abil ja fossiilkütuseid tarbivate katelseadmete välja vahetamisel biokütuseid tarbivate vastu.

Energeetikas tarbitava biomassi tootmine Lõuna-Eestis

Energeetikas tarbitavate tahkete biokütuste tootmismahte kirjeldab keskmine raiemaht ning sortiment (tabel 3).

Tabel 3. Keskmine raiemaht aastatel 2008–2010
Table 3. Average volume of fellings in Southern Estonia 2008–2010

Haldusüksus	Raiemaht kokku, m ³	Sh küttepuu, m ³	Sh. realiseeritavad raidmed, m ³	Energeetikas kasutatav ressurss, TJ
Jõgeva maakond	435 779	92 968	85 413	1163
Põlva maakond	465 769	83 510	91 291	1132
Tartu maakond	387 221	76 991	75 895	994
Valga maakond	386 951	76 239	75 842	989
Viljandi maakond	623 625	141 551	122 231	1724
Võru maakond	463 151	87 202	90 778	1155
Kokku	2 762 496	558 459	541 449	7158

Raiemahu hindamiseks (tabel 3) kasutati Statistikaameti andmetes kajastatud raiemahte raiedokumentatsiooni järgi, millest lahutati 35% eramet-sas planeeritud raiemahust (Keskkonnateabe Keskus, 2011).

Ülaltoodud tabelist nähtub, et praeguste raiemahtude juures on metsast saadavast biomassist võimalik toota 7158 TJ primaarenergiat. 2011. aastal tarbitud küttepuidu, puiduhakke ja -jätmete (k.a ettevõtetes ja kodumajapidamistes tekkivad puidujäätmed) primaarenergia sisaldus oli 7411 TJ. Seega toimub Lõuna-Eesti regioonis suuremahuline puitse biomassi eksportimine, mida saaks tulevikus rakendada regioonis tarbitavate fossiilsete kütuste asendamiseks.

Kokkuvõte

Lõuna-Eesti regiooni biokütuste arengukava algatamine lähtus regiooni vajadusest koordineerida valdkondliku arengut olukorras, kus mitmed uuendused toimuvad lühikese ajavahemiku jooksul. Valdkonna analüüs ning eesmärkide seadmine aitavad kogukondadel oma vajadusi paremini teadvustada ning panustada sellistesse tehnoloogiatesse, mis pakuvad li-saväärtust kogu regioonile.

Töö käigus on kirjeldatud arengukava aluseks olevat ressursiuuringut ning eeltööd arengukava algatamiseks ja koostamiseks. Ressursiuuringu esialgsete tulemuste kohaselt on Lõuna-Eesti tehniliselt kasutatav biokü-tuste ressursid piisav, et katta regiooni soojusenergiavajadus.

Biokütuste ressursi kasutamise suurendamiseks tuleb panustada tehnoloogiauuendusele nii era- kui avalikus sektoris. Investeeringute puhul tuleb eelistada võimalikult kõrge kasuteguriga tehnoloogiaid, isegi kui tasuvusanalüüs tänaste hindade juures seda ei soodusta. Energiakandjate hinnad on jätkuvas kasvus, aidates kaasa efektiivsusele suunatud lisaku-lutuste tasuvusaja vähenemisele. Energeetikas kehtib lihtne reegel: iga ühik vähem tarbitud energiat on odavam kui ükskõik kui madala hinnaga toodetud ja raisatud energiat.

Tunnustus

Arengukava ettevalmistamist toetab Euroopa Liit läbi Interreg IVC programmi projekti BIO-EN-AREA. Arengukava meeskond tahab tänada riigiasutusi, kelle poolt väljastatud teabenõuete vastused aitasid kaasa ressursianalüüsi valmimisele. Arengukava valmimisajaks on planeeritud 2013. aasta algus.



Kasutatud kirjandus:

Kask, Ü., Kask, L., Paist, A. 2007. Reed as energy resource in Estonia. – Ikonen, I., Hagelberg, E (eds). Read Up on Reed. Turku, Southwest Finland Regional Environment Centre, 102–114.

Keskonnateabe Keskus. Aastaraamat Mets 2010. 2012a. Tartu, 241 lk.

Keskonnateabe Keskus. Jäätmearuandluse infosüsteem (JATS). 2012b.

Kättesaadav: <https://jats.keskonnainfo.ee/main.php?public=1>
(05.10.2012).

Keskonnateabe Keskus. Erametsaomanike poolt kavandatud lageraiete teostamise analüüs 2009. ja 2010. aasta ortofotode põhjal. 2011.

Tartu, 13 lk. Kättesaadav: http://www.keskonnainfo.ee/failid/Uuring%202011_kavandatud_lageraiete_teostamise_osakaal1.pdf
(25.09.2012).

Koppel, E. M (koostaja). Eesti Vabariigi aruanne Euroopa Komisjonile taastuvatest energiaallikatest toodetud energia kasutamise ja edendamise edusammude kohta. 2011. Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, Tallinn, 26 lk. Kättesaadav: <http://www.mkm.ee/nreap-2/> (05.10.2012).

Kõrgmaa, V (koostaja). Reoveesete töötlemise strateegia väljatöötamine, sh ohutu taaskasutamise tagamine järelevalve tõhustamise, keemiliste- ja bioloogiliste indikaatornäitajate rakendamise ning kvaliteedi süsteemide juurutamise abil. II etapp. 2010. OÜ Eesti Keskkonnauuringute Keskus, Tallinn, 208 lk.

- Liikmesriikide aruanded Euroopa Komisjonile taastuvatest energiaallikatest toodetud energia kasutamise ja edendamise edusammude kohta. 2011. Kättesaadav http://ec.europa.eu/energy/renewables/reports/2011_en.htm (25.09.2012).
- Muiste, P., Padari A., Roostalu, H., Kriipsau, M., Astover A., Mitt, R., Pärn, L., Melts, I. MES uuringu Eestis olemasoleva, praeguse või juba kavandatud tootmise-tarbimise juures tekkiva biomassi ressursi hindamine lõpparuanne. 2007. Tartu, 88 lk.
- Põllumajanduse Registre ja Infosüsteemide Amet. 2012. Kättesaadav: <http://pria.ee/> (05.10.2012).
- Statistika andmebaas. 2012. Kättesaadav: www.stat.ee (25.09.2012).

COORDINATION OF RENEWABLE FUELS USAGE IN SOUTH-ESTONIA

Jaanus Uiga^{1,2}, Martin Kikas¹, Marek Muiste^{1,2}

¹Tartu Regional Energy Agency

²Estonian University of Life Sciences

The Biomass Plan for South-Estonia is being prepared in order to fill the gap between the development documents of national level and the level of local municipality. The development plan is being made for providing for the need of coordinating the usage of biomass and production of biomass-derived fuels in times of rapid development of the bioenergy sector.

The current biomass usage for heat production in the region is 63% (without taking transport fuels usage into consideration). The production of electricity is mostly converged into North-Eastern Estonia. Therefore, for increasing the share of biomass in energy production, the efficiency of its usage must be increased. For that technologies with highest possible efficiency must be utilized.

KAUGKÜTTE TULEVIKUPERSPEKTIIVIDEST VÄIKEASULATES ELVA LINNA NÄITEL

Jaanus Uiga, Alo Allik, Andres Annuk

Eesti Maaülikooli tehnikainstituut

jaanus.uiga@emu.ee, alo.allik@emu.ee, andres.annuk@emu.ee

Annotatsioon

Käesoleva artikli eesmärgiks on kirjeldada väikeasulate kaugküttesüsteemide arenguperspektiive. Uurimisobjektiks on võetud Elva linna kaugküttetrassid ja –katlamajad. Kirjeldades viimastes teostatud renoveerimistöid ja –mahte ning analüüsides tulevikuvõimalusi, antakse ülevaade väikeasulate kaugküttes praegu esinevatest ning tulevikus tekkivatest probleemkohtadest.

Üheks keskseks küsimuseks väikelinnade soojamajanduses on soojusenergia tarbimismahu vähenemine ning selle mõju kaugküttevõrgus teostatud või planeeritavate renoveerimiste tasuvusele ja uutele investeerimisvõimalustele. Eelmainitust tingitud mõjude kirjeldamiseks väikelinna kaugküttesüsteemile on vaadeldud senise tegevuse jätkamist, kaugküttevõrkude ühendamist, uute tarbijate liitmist ning koostootmisjaama rajamist.

Artikkel valmis Euroopa Liidu projekti „Wood Energy and Cleantech“ raames. Uuringu täismahus aruanded tehakse kättesaadavaks veebilehtedel www.energiaklass.emu.ee ja www.woodenergyproject.eu.

Märksõnad: kaugküte, koostootmine, väikelinnade soojamajandus, koostootmisgraafikud, puitkütused, investeringud soojavõrkudesse.

Sissejuhatus

2011. aastal avaldatud Riigikontrolli auditi hinnangul kasutas ligi 60% Eesti elanikkonnast kaugkütet: soojust, mis on toodetud katlamajas või elektrijaamas ja soojustorustike kaudu tarbijatele jaotatud. Üledimensioneeritud kaugküttetorustikke esines 77 kohaliku omavalitsuse territooriumil ning 38 omavalitsuse kohta puudus ülevaade täielikult (Kuldpere jt 2011).

Seega on kaugküttesüsteemide optimeeritus probleemiks juba enne Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiivist 2010/31/EL tulenevat hoonete energiatõhususe suurendamiseks rakendatavate meetmete ja nõuete mõju täielikku avaldumist. Uuendatud määruses „Energiatõhususe miinimumnõuded“, mis hakkab kehtima alates 9. jaanuarist 2013, defineeritakse, et uute ehitiste energiatõhususarvud peavad olema seni määratletust kuni 47% madalamad. Samuti suurendati oluliselt energiatõhususe miinimumnõudeid rekonstrueeritavatele ehitistele. Aastast 2021 alates peavad uued ehitatavad hooned olema juba liginullenergiahooned.

Energiatõhususe suurendamine hoonetes on muutunud prioriteetseks ka energia hinna pideva kerkimise tõttu. Konkurentsiameti poolt kehtestatud soojusenergia piirhindade keskmine oli septembri alguse seisuga 60 €/ (MW·h). Samas sarnanes enamiku tarbijate soojusenergia hind väärtusele 74,5 €/ (MW·h), mis on kõigi hindade mediaan (Konkurentsiamet 2012). Kõrgem hind on enamasti väiksemates kaugküttevõrkudes, kus kaugküttesoojuse tootmiseks kasutatakse fossiilseid kütuseid (põlevkiviõli, maagaas).

Seega ootab just väiksemaid asulaid ees aeg, mil tuleb otsustada, kas kaugküttesüsteemi on mõistlik renoveerida ning torustikes esinevate soojuskadude vähendamise ja kasutatava kütuse liigi vahetamise läbi hinda madalamal hoida või hakata hooneid järk-järgult lokaalküttele üle viima. Tuleb meeles pidada, et kaugküttetorustike ning –katlamajade renoveerimine on pikaajaline investeering, mille tasuvusajale avaldab soojusenergiatarbe vähenemine negatiivset mõju ja see võib piisavalt suure mahu korral kaugküttesüsteemidesse tehtud investeeringutest saadava rahalise kasu olematuks muuta.

Elva linna kaugküttesüsteem

Elva linna kui uuringuobjekti valiku üks põhjuseid oli asjaolu, et antud haldusüksuse ning vastava soojaettevõtte ametnikud on olnud kaugküttevõrgu renoveerimisel väga edukad. Kaugküttevõrkude haldajaks on OÜ Elva Soojus, mille osakud kuuluvad sajaprotsendiliselt Elva linna-

le. Linnas on üks ametlik kaugküttepiirkond, mis koosneb kolmest eraldi kaugküttesüsteemist. 2012/2013. aasta kütteperioodi alguseks on kõik kolm Elva linnas paiknevad kaugküttekatlamaja üle viidud biokütustele (täpsemalt hakkpuidule). Samuti on renoveeritud peaaegu kogu kaugkütetorustik. Seda tänu mitmesuguste toetusmehhanismide rakendamisele: aastatel 2005...2012 teostatud investeeringutest kaugkütetorustikesse ning -katlamajadesse kaeti toetusmeetmete abil ligi 60%.

Investeeringute tulemusena on kaugküttesoojuse hind püsinud stabiilse-
na alates 2009. aastast. Eratarbija jaoks maksab toasooja hind käesoleval
aastal koos käibemaksuga 62,7 €/MW·h, jäädes märgatavalt madalamaks
eespool mainitud mediaanhinnast (74,5 €/MW·h).

Vaatamata soojusenergia suhteliselt madalale hinnatasemele, toimub
Elva kaugküttevõrkudega ühendatud korterelamute aktiivne renoveerimi-
ne: KredEx-i poolt väljastatavat maksimaaltoetust (35%) on saanud juba
kolm kortermaja. Samuti on elanikkonna muutuse dünaamika näidanud
viimastel aastatel kergelt vähenevat trendi. Elva linna elanike arv oli seni
kõige suurem aastal 2006 (6297 inimest), kuid majanduslanguse aastail
hakkas elanikkond vähenema ning on nüüdseks jõudnud alla 6000 ini-
mese piiri.

Metoodika

Arvutused teostati praeguse olukorra ning erinevate tulevikuvõimalus-
te võrdlemiseks ja analüüsimiseks. Lähteandmetena kasutati OÜ Elva
Soojus poolt mõõdetud reaalseid tarbimisandmeid ja eelnevalt teostatud
uuringuid ning Elva linnavalitsuse antud dokumente. Hetkeolukorra kir-
jeldamisel lähtuti eeldusest, et soojusenergia vajadus on seotud välisõhu
temperatuuridega. Seose leidmisel kasutati küttekarakteristikate meetodit
(Ingermann 2003), mille abil koostati soojuskoormuse kestusgraafikud.
Tavapärast defineeritakse küttekarakteristikat kui kütteenergia vajadust
hoone ühe m³ kõetava mahu kohta sise- ja välistemperatuuride ühekraa-
dise vahe korral (Ingermann 2003). Siinjuhul käsitleti küttekarakteristi-
kat kui hoonete grupi kütteenergia vajadust sise- ja välistemperatuuride

ühakraadise erinevuse korral. Reaalsete tarbimismahtude kättesaadavuse korral on küttekarakteristika leitav valemist

$$q_k = \frac{Q_{kütte}}{KRT} , \quad (1)$$

kus q_k - hoonete grupi küttekarakteristika, MW/°C;

$Q_{kütte}$ - vaadeldaval perioodil (üks kuu) kütteks kasutatud soojushulk, MW·h;

KRT - vaadeldava perioodi kraadtundide arv, °C·h (Ingermann 2003).

Kraadtundide arvu leidmisel kasutati EMHI poolt väljastatud Tõravere mõõtejaama 2010. aasta tunnikeskiste temperatuuride mõõteandmeid, mida taandati normaalaasta kraadpäevadega, elimineerimaks erinevate aastate temperatuurikõikumiste mõju soojustarbimisele (Loigu ja Kõiv 2006). Eelmainitu tulemusena saadi 30aastase perioodi (1975...2004) keskiste temperatuuridega sarnanevad temperatuurid. Nende alusel leiti hoonete grupi kütteks vajalikud arvutuslikud tunnikeskised soojusenergia tootmisvõimsused. Selleks kasutati valemit

$$Q = q_k \cdot KRT , \quad (2)$$

kus Q - hoonete grupi kütteks planeeritav soojusenergia kulu, MWh.

Võttes vaadeldavaks andmete keskmistamise perioodiks ühe tunni, leiti hoonete grupi kütteks vajalik tunnikeskmine soojusvõimsus. Katelseadmete vajalik väljundvõimsus kaugküttetorustikesse saadi, summeerides hoonete gruppide aastased tunnikeskised soojusenergia vajadused ning soojustorustikes esinevad kaovõimsused. Kaovõimsuste arvutamisel kasutati kuude lõikes mõõdetud kadusid soojustorustikes. Täpsemad selgitused ja arvutustulemused on leitavad uuringu lõpparuandest (Uiga 2012).

Tulevikustsenaariumid

Tulevikuvõimalustena vaadeldi kolme eraldi stsenaariumi.

Tavapärase äri- ja investeerimistegevuse jätkumine. Modelleeriti olukord, kus toimub tarbimismahu langus praegu eksisteerivate hoonete renoveerimise arvelt ning uusi tarbijaid võrku ei liideta.

Kesk-, haigla ja Kirde katlamaja võrgupiirkondade ühendamine. Selle stsenaariumi korral toimub esialgu soojusenergia tarbimise suurenemine võrgupiirkondade ühendamiseks ehitatava soojatorustiku läheduses paiknevate potentsiaalsete tarbijate võrku ühendamise korral. Tekkinud summaarse soojuskoormuse katmiseks modelleeriti koostootmisjaama ehitamist, et saada elektri tootmisest lisatulu.

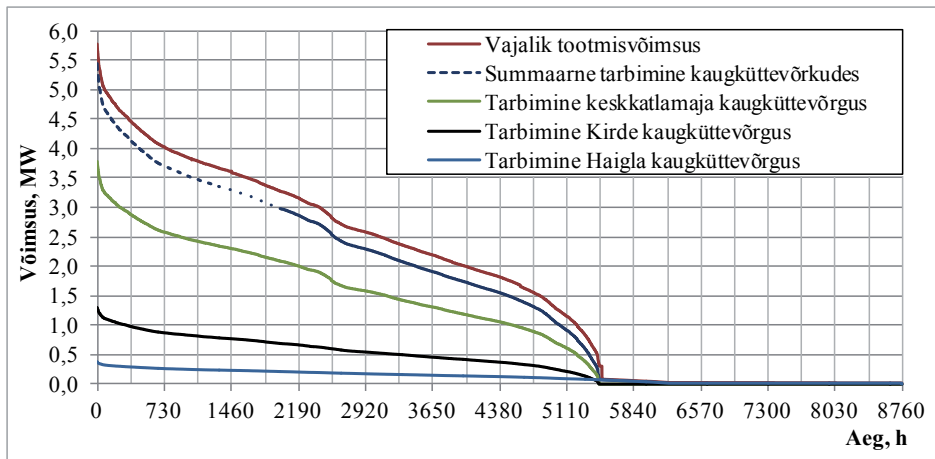
Koostootmisjaama ehitus keskkatlamaja kaugküttepiirkonda. Modelleeriti olukord, kus Nooruse 8 paiknevasse katlamajja rajatakse koostootmisjaam. Ülejäänud kahes kaugküttepiirkonnas jätkub tavapärase äritegevus. Normaalaasta kütteperioodina käsitleti tavapärase 216 päeva asemel 229 päeva, mis leiti varasemate aastate mai- ning septembrikuu tarbimisandmeid analüüsid. Arvutusaastaks 2025 eeldatakse kütteperioodi pikkuse vähenemist 216 päevani, arvestades soojusenergia tarbe vähenemist vabasoojuse efektiivsema kasutamise tõttu. Aastaringse tarbimisgraafiku tekitamiseks vajalikku sooja vee tarbimist elamutes ja tööstuses Elva kaugküttesüsteemis (nagu ka paljudes teistes Eesti väikelinnades) ei esine.

Arvutusaasta (2025) valimisel eeldati, et soojusenergia tarbimine väheneb tänu renoveerimistele 40% nii elamu- kui ka avaliku sektori ning 10% tööstus- ja kaubandussektori hoonetes. Lisatulu teenimise võimalusena kaaluti kõigis tavapärase äri- ja majandustegevusega mitte ühtivates tulevikuproгноosides ORC-tüüpi koostootmisjaama kasutuselevõttu, kus soojuskandjaks on orgaaniline termaalõli.

Tulemused ja arutelu

Eespool kirjeldatud meetodika põhjal koostati stsenaariumite soojuskoormuse kestusgraafikud nii hetkeolukorra kui ka arvutusaasta (2025) jaoks. Alljärgnevalt (joonis 1...joonis 4) on antud ülevaade modelleerimiste tulemustest ning nende põhjal loodud soojuskoormuse kestusgraafikutest.

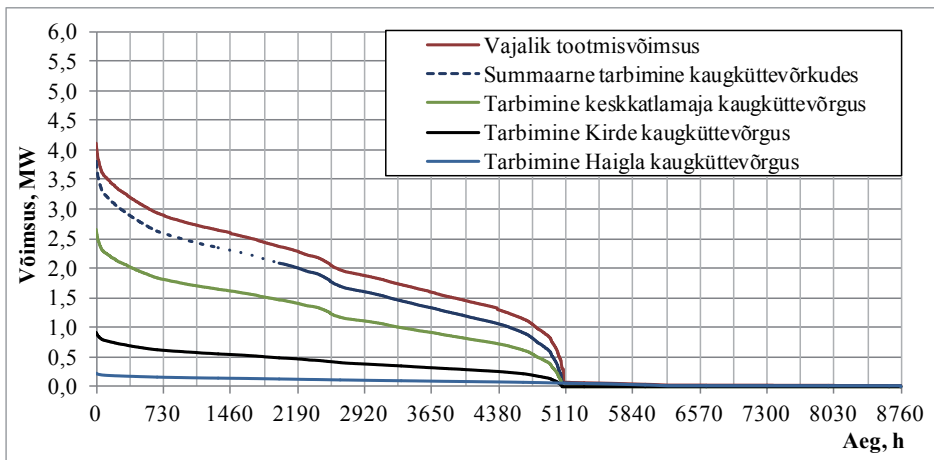
Jooniselt 1 võib näha, et praegune maksimaalne summaarne soojusenergia tootmisvõimsus Elva kaugküttevõrkudes on 5,77 MW. Kütteperioodi keskmine tootmisvõimsus jääb aga 2,79 MW piirimaile. Tarbimisest enamiku (68%) moodustab keskkatlamaja kaugküttevõrk.



Joonis 1. Soojuskoormuse arvutuslikud kestusgraafikud Elva linna kaugküttevõrkudes.

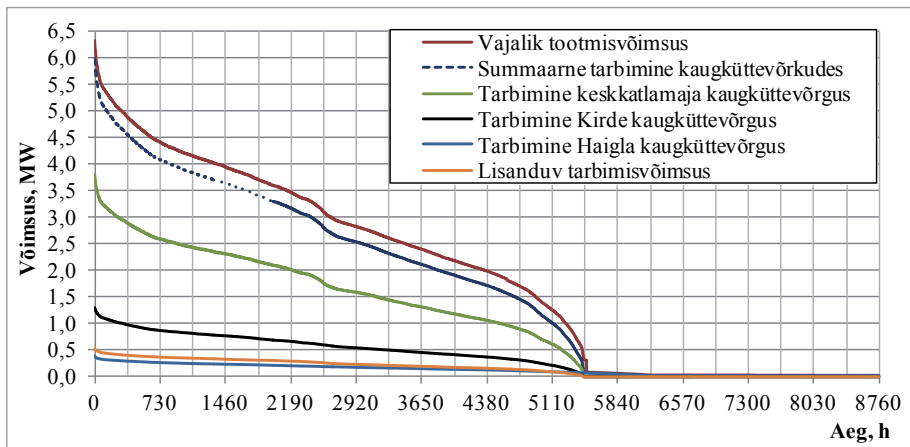
Figure 1. Calculated load duration curves of the district heating networks of Elva.

Aastaks 2025 on arvutuslik soojuskoormuse kestuskõver muutunud laugemaks, tipnedes 4,11 MW juures. Koormuskestusgraafikutelt nähtav n-ö hüpe on tekkinud andmete sorteerimise tulemusena, kuna soojuskoormused jaotuvad öiste ning päevaste temperatuuride järgi.



Joonis 2. Soojuskoormuse arvutuslikud kestusgraafikud Elva kaugküttevõrkudes aastal 2025.

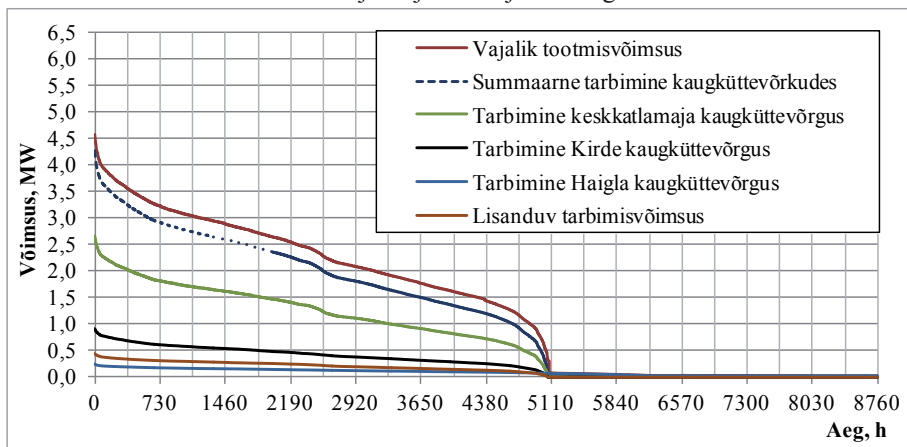
Figure 2. Calculated heat load duration curves of the district heating networks of Elva in 2025.



Joonis 3. Soojuskoormuse arvutuslikud kestusgraafikud lisanduvate tarbijate korral Elva kaugküttevõrkudes baasaastal.

Figure 3. Calculated load duration curves of the district heating networks of Elva in case of adding new consumers to the system.

Stsenaariumi korral, kus kaugküttevõrguga liidetakse uusi tarbijaid, ulatuks vajalik maksimaalne tootmisvõimsus 6,3 MW-ni. Lisanduvate tarbijatena tulevad Elva linnas kõne alla mõned tööstushooned ning omavalitsusele kuuluvad hooned, mille jaoks on kütuse kallinemise tõttu kaugküttesüsteemiga liitumise võimalikkus teravamalt päevakorda kerkinud. Lisanduvate eramajade ja kahe juba kaugküttevõrku ühendatud



Joonis 4. Soojuskoormuse arvutuslikud kestusgraafikud lisanduvate tarbijate korral Elva kaugküttevõrkudes arvutusaastal 2025.

Figure 4. Calculated load duration curves of the district heating networks of Elva in 2025 in case of adding new consumers to the system.

eramu tarbimine on üldises bilansis marginaalne. Samal põhjusel on eramajade kaugküttevõrku ühendamine küsitav ka teistes Eesti väikelinnade kaugküttevõrkudes.

Isegi pärast uute kaugküttevõrgu tarbimisvõimsuste tutvustamist on aastaks 2025 langenud vajalik maksimaalne kaugküttesüsteemi tootmisvõimsus 4,5 MW-ni, kusjuures esimese stsenaariumiga sarnaselt langeb keskmine tootmisvõimsus kütteperioodil 2 MW piirimaile.

Koormuskestusgraafikute põhjal arvutati tulevikustsenaariumite soojus- ning elektrienergia toodangumahud, selleks vajaminevad kütusekogused ja kaugküttetorustiku kaod (tabel 1).

*Tabel 1. Kokkuvõtte tulevikustsenaariumite analüüsi tulemustest.
Table 1. Summary of the calculation results.*

Aasta	Näitaja	I Senise tegevuse jätkamine	II Võrgupiirkondade ühendamine, koostootmisjaama rajamine	III Koostootmis- jaama rajamine keskkatlamaja võrgupiirkonda
Baasaasta	Vajaminev puitkütuse kogus, m ³ /a	29 118,6	36 318,8	32 453,7
	Toodetav soojusenergia MW·h/a	15 362,4	16 781,4	15 362,4
	Kaod soojavõrgus, %	10,2	9,6	10,2
	Toodetav elektrienergia, MW·h/a	-	3 900,6	2 520,2
2025	Vajaminev puitkütuse kogus, m ³ /a	20 571,4	26 036,6	23 124,3
	Toodetav soojusenergia MW·h/a	10 845,5	12 023,1	10 845,5
	Kaod soojavõrgus, %	13,4	12,5	13,4
	Toodetav elektrienergia, MW·h/a	-	2 900,0	1 795,1

Soojuskoormus ja sealt lisandväärtusena tulenev elektritootmise potentsiaal on kõrgeim kõigi võrgupiirkondade ühendamise stsenaariumi puhul. Samas suurendab soojatrasside ning kõrgsurvepumpplate ehitamise vajadus kaugküttevõrkude ühendamiseks vajalikku algkapitali ning seega

oleks praeguste hinnatasemetel juures koostootmisjaama rajamine otstarbekas ainult keskkatlamaja võrgupiirkonda. Selle stsenaariumi puhul langeb toodangu maht 15 362 MWh-lt 10 846 MWh-ni, samal ajal kui elektrienergia tootmine väheneb baasaasta 2520 MWh tasemelt 2025. aastaks 1795 MWh-ni. Tulemuseks on vaid 35% madalam elektrienergia toodang kui võrgupiirkondade ühendamise stsenaariumis. Seega on viimane stsenaarium energiamüügi mahtude ning lisanduva hakkpuidu koguse suhtarvu arvestades tulusam.

Kokkuvõte

Väikeasulate kaugküttevõrkudes kasutatakse soojusenergiat peamiselt korterelamute ja avaliku sektori hoonete kütmiseks. Seega tähendab elanikkonna vähenemine ja energiatõhususe suurenemine tulevikus väiksemat soojusenergia tarbimisvõimsust. Artiklis kirjeldatud Elva linna soodne kaugküttesüsteemi olukord on tingitud asjaolust, et vajalikud investeeringud on juba teostatud ning seetõttu ei mõjuta tulevikus toimuv järk-järguline energiatarbe vähenemine kaugküttevõrkudes toimuvat nii drastiliselt. Väikeasulate kaugküttevõrkudes, kus investeeringud alles ees seisavad, peab arvestama, et tagamaks kaugküttesüsteemi majanduslikult otstarbekat tööd ning tarbijale taskukohast soojusenergiat, on renoveerimiste planeerimisel vaja arvesse võtta tarbimismahtude vähenemist. Üheks tarbimismahtude muutumise analüüsimise vahendiks on soojuskoormuse kestusgraafikud. Suuremahuliste investeeringute tegemise asemel lokaalküttele üleminek võib olla mitmete väiksemate kaugküttepiirkondade jaoks parim lahendus.

Tänuavaldus

Artikli autorid tänavad Elva linnavalitsuse, OÜ Elva Soojuse ja EMHI töötajaid ladusa koostöö eest andmete väljastamisel.



EUROPEAN UNION
EUROPEAN REGIONAL DEVELOPMENT FUND
INVESTING IN YOUR FUTURE



CENTRAL BALTIC
INTERREG IV A
PROGRAMME
2007-2013

Kasutatud kirjandus

- Ingermann, K. 2003. Soojusvarustussüsteemid. TTÜ kirjastus, Tallinn, 71 lk.
Konkurentsiameti kodulehekülj: <http://www.konkurentsiamet.ee/>
(20.09.2012)
- Kuldpere, K., Jaksen, M., Saadve, J. 2011. Riigi tegevus soojusvarustuse jätkusuutlikkuse tagamisel. Riigikontroll, Tallinn, 68 lk.
- Loigu, E., Kõiv, A. 2006. Eesti kraadpäevad. TTÜ Keskkonnatehnika instituut, Tallinn, 69 lk.
- Uiga, J. 2012. Üleminek fossiilsetelt kütustelt puitkütustele – Elva linna keskküttevõrgu juhtumiuuring. Eesti Maaülikool, Tartu, 61 lk.

FUTURE PERSPECTIVES OF SMALL-TOWN DISTRICT HEATING NETWORKS IN ESTONIA

Jaanus Uiga, Alo Allik, Andres Annuk
Estonian University of Life Sciences

Due to the constantly rising price of fossil fuels, energy efficiency and reasonable use of energy is increasingly becoming increasingly popular. Smaller Estonian municipalities are already facing problems with obsolete district heating networks. These problems will most likely deepen in light of higher standards in insulation and energy efficiency of buildings, which in turn will lower the heat demand. Comparison of calculation results of different scenarios reveals that the district heating networks on Elva can be exploited sustainably by continuing business as usual activities even in case of lowered heat demand. That might not be the case in regions where large-scale investments are yet to be made.

SOOJUSPUURAUKUDE MÕJU PÕHJAVEELE

Mikk Gaškov, Argo Jõelett

Tartu Ülikooli loodus- ja tehnoloogiateaduskonna geoloogia osakond
gaskoff@ut.ee

Annotatsioon

Geotermaalne energia ehk maasoojus on taastuv ja roheline ressurss, mida kasutatakse elektri tootmiseks ja hoonete kütmiseks. Eesti geoloogilistes tingimustes on tänapäevaste tehnoloogiatega kättesaadav madalatemperatuuriline (7-15 °C) ressurss, mida soojuspumpade abil on võimalik kasutada kütmiseks ja tarbevee soojendamiseks. Soojuse ammutamiseks maapõuest on erinevaid viise: horisontaalsed maakollektorid ja puuraukudel põhinevad kinnised või avatud süsteemid. Lisaks saab suveperioodil maad või põhjavett kasutada jahutamiseks. Samas on põhjavesi elutegevuseks olulise tähtsusega ressurss ning selle kahjustamise riskid tuleb miinimumini viia.

Märksõnad: geotermaalne energia, soojuspump, põhjavesi, modelleerimine.

Sissejuhatus

Kivimid ja põhjavesi sisaldavad soojust, mis on pärit Maa varajasest ajaloost (jääksoojus), radioaktiivsete elementide lagunemisel tekkivast energiast ning pealmistes kihtides salvestuvast päikesekiirgusest. Maasoojust jagatakse kõrge- ja madalatemperatuuriliseks (vastavalt üle ja alla 150 °C) ning sügavaks ja madalaks (üle või alla 400 m) ressursiks. Kättesaadavas sügavuses esinevad kõrged temperatuurid, mida kasutatakse geotermaalse elektri tootmiseks, on tavaliselt seotud vulkaaniliste aladega (nt Island, Filipiinid jne). Eesti asub geoloogiliselt jahedas kohas, paiknedes paksu maakoorega Balti kilbi nõlval. Kõrgeimad puuraukudes mõõdetud temperatuurid jäävad Eestis 18 kraadi kanti (Jõelett 2006).

Maailmas ja sh ka Eestis kasutatakse küttelahendustena üha enam maasoojussüsteeme. Põhjavee või pinnase umbes 7-15 °C temperatuuri tõstetakse soojuspumba abil, nii et see on kütmiseks sobilik. Eesti Soojuspumba Liidu (ESPEL) hinnangu kohaselt oli 2010. aasta alguseks paigal-

datud Eestis umbes 5000 maasoojuspumpa.

Maast võib soojust ammutada nii horisontaalselt väikesele sügavusele paigaldatud soojuskontuuriga (maakollektor) kui ka vertikaalsete soojuspuuraukudega. Kasutusel on avatud ja kinnised süsteemid. Kinnise soojussüsteemi puhul on ühte või mitmesse puurauku paigaldatud soojuskontuur, milles ringlev madala külmumistemperatuuriga vedelik kannab maasisest soojust soojusvahetisse, kus see põhjustab soojuspumba külmaaine aurustumist. Avatud soojussüsteemi puhul pumbatakse ühest puurkaevust põhjavett, mis soojusvaheti läbimise järel jahedamana teise puurkaevu juhitakse. Maakollektoriga analoogne on lahendus, kus soojuskontuur uputatakse veekogu põhja. Käesolevas töös vaadeldakse eelkõige soojuspuuraukude mõjusid. Maakollektori eeliseks on väikesed rajamiskulud, kuid see vajab võrreldes vertikaalsete süsteemidega suurt pindala. Kõige suurema kasuteguriga on avatud süsteem, mille puhul on aga kõige suurem põhjavee reostamise oht.

Soojuspump

Soojuse kandumine külmemalt kehalt (kivimid või põhjavesi) soojemale (nt radiاتور) saab toimuda ainult lisaenergia abil. Soojuspumpades kasutatakse madala keemistemperatuuriga vedelikke. Selline vedelik aurustub põhjavee temperatuuril ja võtab selle käigus põhjaveelt aurustumissoojuse jagu energiat. Järgmises etapis veeldatakse aur rõhu tõstmisega ja vabaneb energia, kandudes üle soojemale kehale (nt vesi küttesüsteemis). Kuna tsüklis tehakse mehaanilist tööd, siis on vaja tarvitada välist energiat, milleks tavaliselt on elekter. Soojuspumbalt saadud soojusenergia ja kasutatud elektrienergia suhet nimetatakse soojuspumba kasuteguriks (ingl k *coefficient of performance* - *COP*). Kasutegur arvutatakse valemiga $COP = Q/W$, kus Q on soojemale keskkonnale antud soojushulk ja W soojuspumba poolt tehtud töö. Soojuspumba poolt tehtud töö muutub üldjuhul lõpuks samuti soojuseks, seega võetakse külmemalt keskkonnalt selle võrra vähem energiat. COP sõltub külmema ja soojema keskkonna temperatuuridest ja soojuspumba tehnilisest lahendusest. Tavaliselt jääb COP vahemikku 3-5 (Jõelet 2006). Enim leiavad soojuspumbad kasutust jahutusseadmetes, näiteks külmkapis, kus soojust pumbatakse külmkapi seest välja.

Põhjavesi ja soojuseressurs

Soojuspuuraukude rajamisel ja käitamisel esineb paratamatult risk kahjustada põhjavett kui tähtsat loodusvara. Lisaks võib liiga tihedalt paiknevate või üledimensioneeritud soojussüsteemide korral toimuda kivimite tugev jahutamine, mis vähendab soojuspumpade efektiivsust.

Põhjavesi on Eestis peamine joogiveeallikas ja seetõttu on puuraukude rajamine ja kasutamine täpselt reguleeritud. Samas esineb ka põhjendamatu vastuseisu soojuspuuraukude rajamisele. Hoolika tegutsemise korral on riskid minimeeritud. Soojuspuuraukude kasutamise sagenemisel tiheasustusaladel tekib küsimus, kuidas süsteeme dimensioneerida, et varude kasutamine oleks jätkusuutlik. Üheks lahenduseks võiks olla soojuse salvestamine suvisel ajal, kas jahutusseadmete jääksoojust maasse juhtides või näiteks päikesepaneelide abil.

Metoodika

Soojussüsteemide mõju hindamiseks kasutati vaatlusandmeid ja modelleerimist. Vertikaalsete soojussüsteemide mõju modelleerimiseks kasutati tarkvaraprogrammi Processing Shemat (Clauser 2003).

Kinnise vertikaalse kontuuri mõju modelleerimiseks koostati 3D-mudel mõõtmetega 130 x 170 x 150 meetrit, puuraugu sügavuseks oli 100 m. Modelleeriti erineva konfiguratsiooniga puuraukude süsteeme: üksik auk, kaks auku kümne meetrise vahega ja neli auku ruudukujulise asetusega (küljepikkus 10 m). Kõikidel juhtudel kasutati sama küttekooormust, milleks oli aasta keskmisena 10 W/m. (Gaškov 2011)

Uuriti lühi- ja pikaajalist mõju. Lühiajalise mõju modelleerimisel jagati aasta erineva küttevajadusega perioodideks. Ligikaudne küttekooormuse jaotus tuletati kraadpäevade meetodiga (Loigu ja Kõiv 2006). Sügisele (okt-nov) ja kevadele (apr-mai) vastaval ajal oli küttekooormus 10 W/m, talvel (dets-märts) 20 W/m ning suvel (juuni-sept) toimus taastumine. Lisaks katsetati olukorda, kus talvel toimub kümne päeva jooksul kaks korda intensiivsem kütmine, kuid kevadel ja sügisel on sama pikad ilma küt-

teta perioodid. Mõlemal juhul on aasta keskmine küttekoormus 10 W/m. Pikaajalise mõju uurimiseks koostati soojuspuuraugu töömudel 30aastase tööperioodi jaoks ühtlasel koormusel ja sama pika taastumisperioodi jaoks (Gaškov 2011). 100 m töötava intervalliga auk, mis võtab maast soojust keskmiselt 10 W/m, toodab 8760 kWh soojusenergiat aastas. See pole piisav tavalise eramu täielikuks kütmiseks, kuid annab siiski aimu temperatuurivälja käitumisest.

Avatud süsteemi soojuspuurkaevude töötamisega kaasnevate temperatuurivälja muutuste kirjeldamiseks loodi samuti 3D-mudelid. Mudelisse söödeti ühe puurkaevuga jahedat vett (esimesel aastal 5 °C, järgnevatel 4,5 °C), mille aasta keskmiseks mahuks oli 0,5 l/s, ja teise puurkaevuga eemaldati sama kogus vett mudelist. Puurkaevude vahekaugus oli 20 m, pumpamine toimus kümne meetri intervallis sügavusel 8–18 m. Sarnaselt kinnise süsteemi modelleerimisega jaotati aasta neljaks erineva pumpamismahuga perioodiks (vastavalt 0,5–1–0,5–0 l/s). Modelleeritud soojussüsteemi aastane küttehulk on ligikaudu 35 000 kWh ehk peaaegu kaks korda suurem kui tavalisel eramul. (Jõeleht jt 2012)

Töös on esitatud andmed vaadeldavatest kinnistest ja avatud soojussüsteemidest vastavalt Haabneemest (Viimsi vald) ning Oisu külast (Järvamaa). Töö käigus võeti ka veeproove mitmetest soojuspuuraukudest üle Eesti. Haabneeme on paigutatud temperatuuriloger, mis töötab seal alates 2007. aastast. (Jõeleht jt 2012)

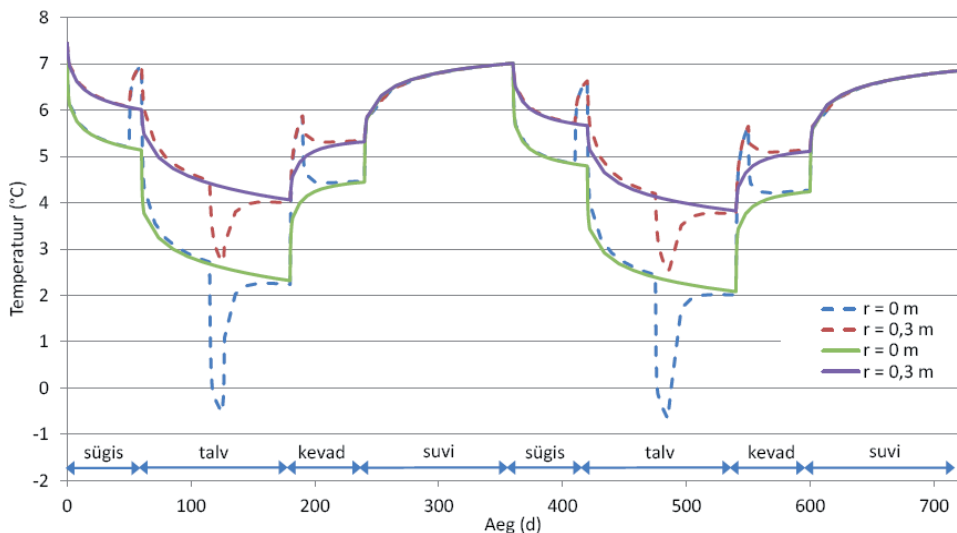
Termiline mõju

Kinnine kontuur

Modelleerimine näitab, et temperatuur langeb puuraugus ja selle lähistel koormuse sisselülitamisel alguses kiiresti, seejärel protsess aeglustub ning temperatuur hakkab lähenema tasakaalulisele olekule kuni koormuse muutmiseni. Esimesel viiel päeval toimuv langus on järgneval 55 päeval toimuvast langusest suurem. Suurema koormuse rakendumisel toimub uus langus, aga koormuse vähenemisel temperatuur tõuseb; alguses on see temperatuurirõõs samuti kiire, kuid hiljem tõusutempo langeb.

Aasta lõikes erinev küttekooormuste jaotus ei mängi taastumisperioodi lõpptemperatuuri osas rolli, kui aasta keskmine koormus jääb samaks.

Joonisel 1 on pidevjoonega tähistatud temperatuurid, mille arvutamisel oli sügisel ja kevadel ööpäeva keskmine soojavõtt puuraugust 10 W/m, talvel 20 W/m ja suvel 0 W/m. Kriipsjoonega on tähistatud temperatuurid, mille arvutamisel on küttegaafikus 10päevane periood koormusega 40 W/m talvel ning koormusvabad perioodid sügisel ja kevadel. Iga aasta-aja lõpuks on temperatuur sama. Seega võib pikaajalise mõju arvutamisel võtta aluseks keskmise küttekooormuse. Tulemused näitavad, et temperatuur puuraugus peegeldab eelnevate päevade-nädalate küttekooormust,



Joonis 1. Arvutatud temperatuurikäik kaheaastase perioodi jooksul soojuspuuraugus ($r = 0$ m) ja 30 cm kaugusel keskmest. Aasta on tinglikult jaotatud erineva soojuskooormusega perioodideks. (Jõelett jt 2012)

Figure 1. Calculated temperatures for two years of operation in borehole ($r = 0$ m) and 30 cm away from it. The year is divided into periods with different heating power.

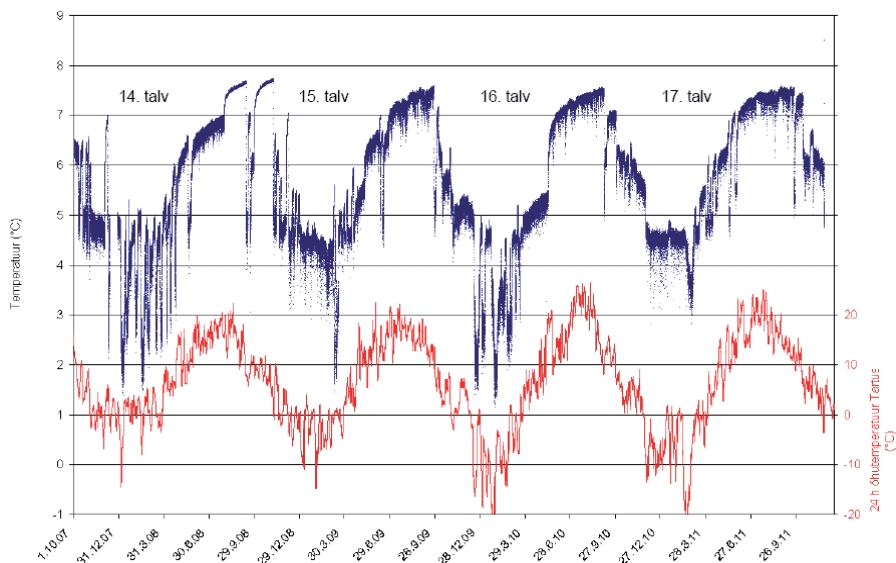
tarbimise lakkamisel toimub kiire taastumine. (Jõelett jt 2012)

Pikaajalise mõju (30 aastat tööd, 30 aastat taastumist) puhul on tempera-

tuuri käitumine võrreldav lühiajalise tööga: temperatuur langeb alguses kiiresti, hiljem langus aeglustub ja soojusväli tasakaalustub. Tasakaalu-temperatuur sõltub rakendatavast koormusest, kivimi omadustest ja põh-
javee liikumise kiirusest.

Erinevate konfiguratsioonidega soojuspuuraukude süsteemide modelleerimisel selgus, et üksikud või reas asetsevad kinnised kontuurid on eelistatumad, võrreldes ruudukujulise asetusega (Gaškov 2011). Ruudukujulises süsteemis jahtub puuraukudevaheline ala maha ega osale enam taastumises ning ilma kunstliku soojusvälja taastamiseta kasutegur langeb.

Vaatlused Viimsi vallas Haabneemes asuvas kinnise kontuuriga puuraukus näitasid temperatuuri käitumist olukorras, kus soojuspump on juba aastaid töötanud ning temperatuur on jõudnud tasakaalulisse olukorda (joonis 2). Iga suve lõpuks toimub taastumine samale tasemele, mis näitab, et süsteem on õigesti dimensioneeritud. Hästi on näha temperatuuri muutus soojuspumba sisse- ja väljalülitamisel ning koormuse muutu-



Joonis 2. Monitooritud temperatuur Haabneeme soojuspuuraukus 100 m sügavusel. (Jõelett jt 2012)

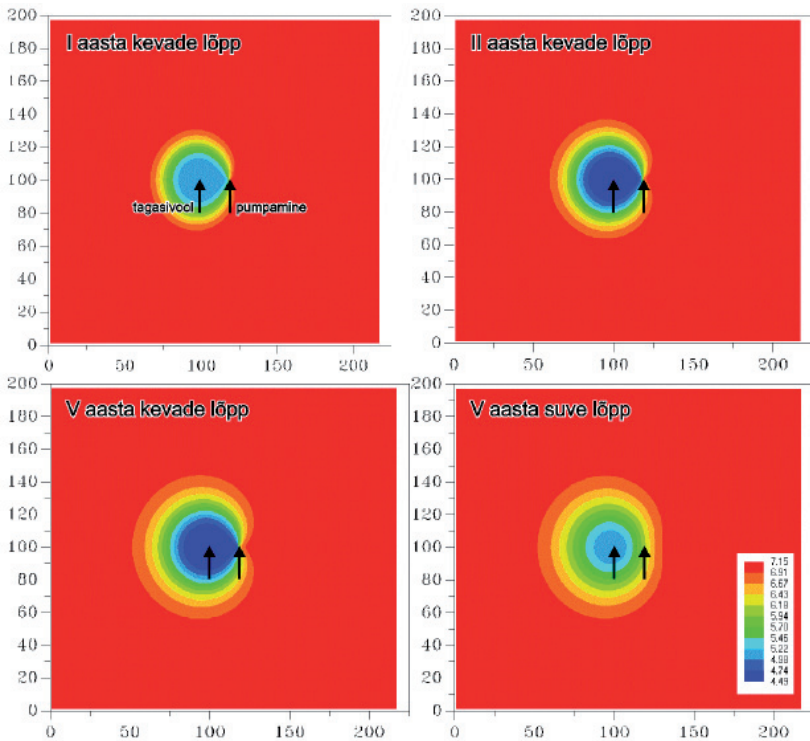
Figure 2. Measured temperatures in Haabneeme borehole at the depth of 100 m.

misel.

Avatud süsteem

Modelleerimise tulemused näitavad, et tagasivoolu suurkaevu ümber tekkinud jahutatud ala raadius on ligikaudu võrdne suurkaevudevahelise kaugusega (joonis 3). Pumbatava vee temperatuur püsib jätkuvalt kõrgem kui tagasijuhitava vee temperatuur, kuna pumbatavasse kaevu voolab vett ka teistest suundadest peale tagasivoolukaevu suuna.

Jahutatud ala ulatus kujuneb suurelt jaolt välja teise kütteperioodi



Joonis 3. Modelleeritud temperatuur avatud süsteemi soojuspuurkaevude ümbruses sügavusel, mis vastab puurkaevude keskkohale. Tagasivoolukaevu ja pumbatava kaevu asukohad on tähistatud nooltega, nende vahekaugus on 20 m. (Jõelett jt 2012)

Figure 3. Calculated temperatures around injection (left) and pumping (right) wells at the depth of center of the wells. Wells are marked with arrows.

lõpuks (joonis 3, II aasta kevad), edasine laienemine toimub aeglaselt. Madalate temperatuuride ala püsib ligikaudu sama suur, mõnevõrra laieneb üleminekuliste temperatuuride vöönd. Suvel toimub soojusvälja taastumine ja ühtlustumine. (Jõeleht jt 2012)

Vaatlused näitavad, et suured, ligikaudu 40 kW võimsusega süsteemid töötavad ilma tõrgeteta, kui pumpamismahud on korrektselt valitud (Jõe-leht jt 2012).

Muud mõjud

Töötavatest soojuspuuraukudest võetud keemilised analüüsid ei näita põhjavee koostise muutust, võrreldes ümberkaudsete puuraukude veega. Mõjud kivimite lõhelisusele on minimaalsed, kuna jäätumine võib aset leida vaid väga piiratud alal puuraugu ümbruses. Mineraalide lahustuvus ei muutu oluliselt ja probleeme sellega ei ole täheldatud. Avatud süsteemis ei teki õigete lahenduste korral probleeme vee tagasijuhtimisega ega õhutamisega. (Jõe-leht jt 2012)

Kokkuvõte

Maasoojuse kasutamine kütmiseks on Eestis võimalik ning aitab vähendada fossiilsete kütuste kasutamist. Tegemist on kasvava turuga, mis õige regulatsiooni ja asjatundliku tegutsemise korral keskkonnale ega põhjaveele probleeme ei tekita.

Kasutatud kirjandus

- Clauser, C., *ed.* 2003. Numerical Simulation of Reactive Flow in hot Aquifers using SHEMAT/Processing Shemat. Springer Verlag, Heidelberg-Berlin.
- Gaškov, M. 2011. Temperatuurivälja muutused soojuspuuraukude kasutamisel. Magistritöö, Tartu Ülikool, geoloogia osakond, 28 lk.
- Jõe-leht, A. 2006. Soojuspuuraukude mõju keskkonnale. Aruanne, Tartu Ülikool, 39 lk.
- Jõe-leht, A., Gaškov, M., Polikarpus, M. 2012. Soojussüsteemi puurkaevu ja -augu mõju põhjavee ja pinnase füüsikalistele omadustele ning põhjavee keemilisele koostisele Eesti tingimustes. Aruanne, Tartu

Ülikool, geoloogia osakond, 48 lk.

Loigu, E., Kõiv, T-A. 2006. Eesti kraadpäevad. TTÜ keskkonnatehnika instituut, 69 lk.

GROUND SOURCE HEAT PUMPS INFLUENCE ON GROUND-WATER

Mikk Gaškov, Argo Jõelet

Geothermal energy is a sustainable and green resource which is used to generate electricity or heat buildings in many parts of world. In Estonia geothermal gradient is very low, but heat from groundwater could be used for heating purposes with the help of ground source heat pumps (GSHP). There are different ways to collect the heat from the ground - horizontal collector and systems based on boreholes and wells. On the other hand, ground water is very important resource and risk of contamination has to be minimized.

AHJUDE UURING PROJEKTI ECOHOUSING RAAMES

Mart Hovi¹, Andres Menind¹, Külli Hovi¹, Argo Ladva¹, Annes Andresson²

¹ Eesti Maaülikool, tehnikainstituut

² OÜ Ahjutarve

mhovi@emu.ee

Annotatsioon

Projekti Ecohousing partnerid Eesti Maaülikoolist uurisid koos eksper-
tidega taastuenergia juurutamise raames tahkekütuse ahjude olukorda
Lõuna-Eestis ning katsetasid 12 ahju. Tulemused näitavad, et kuigi kolle,
lõõristik ja akumuleeriv osa peaksid funktsioneerima tervikuna, esineb
mõnel uuemal kütteseadmel konstruktsioonilisi vigu. Sellest tulenevalt
on suitsugaas kõrge temperatuuriga, mis põhjustab kasuteguri langemist
ja tuleohtu. Lihtne suitsugaasitermomeeter lõõri viimases osas võimaldab
kütmise ajal jälgida ahju tööd, reguleerida materjalibilanssi ning seeläbi
tõsta ahju kasutegurit.

*Märksõnad: Ecohousing, kasutegur, termograafia, pottahi, moodulahi,
tellisahi, küttepuu*

Sissejuhatus

Soome Töõefektiivsuse Instituudi (TTS) eestvedamisel käivitati 2011.
aasta mais EÜ rahastatud INTERREG IVA sarjas projekt „Ecohousing”,
mille partneriteks on uurimisasutused Soomest, Eestist ja Lätist. Projektil
on kaks põhisuunda: uurida biomassi ja päikeseenergiat kasutavaid kom-
bisüsteeme ja taastuvaid kütuseid ning suurendada kodumajapidamiste
tõhusamat energiakasutust alates kodumasinatest kuni hoonete piirete
soojapidavuseni.

Eesti Maaülikooli ülesandeks on taastuvkütuste uurimine ja katsetamine
ja nende sobivuse analüüs ning katlalabori sisustamine kursuste ja õp-
pepäevade läbiviimiseks. Lisaks varustame projekti kodulehte õppe- ja
nõuandematerjalidega ning osaleme pilootprojektina internetikeskkon-
nas toimiva energiatõhusat ja ökoloogilist majapidamist propageeriva
nõustamissüsteemi käivitamises. Samuti kogume ning valmistame ette
materjale väljaantava käsiraamatu tarbeks, mille koostavad Läti partnerid

Balti Keskkonnafoorumist. Projekti käigus on maaülikoolis toodetud ja partnerite abil katsetatud mitmeid taastuvkütuse- ja jäätmebrikette. Sisustatud on katlalabor, mis peatselt installeeritakse lõplikult, et täita plaanitud ülesandeid – avatud töötoad ja kursused kõigile soovijatele nii maaülikoolist kui väljastpoolt.

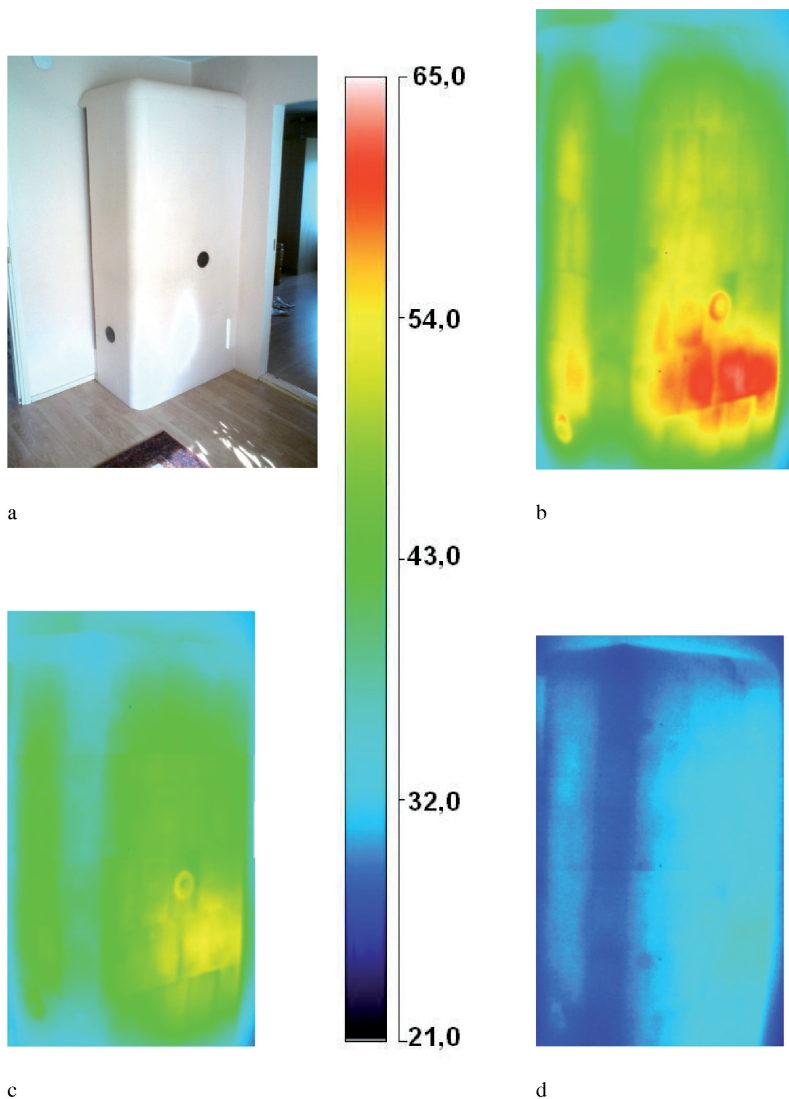
Soomes, Eestis ja Lätis tehtavast turu-uuringust peaks selguma, missuguseid väikemajapidamisse sobivaid bioenergiat kasutavaid katlaid ning koldeid on müügil ja kasutuses.

Klassikaliste ahjude uuring

Kuna väikemajapidamises on ahi tihti põhiline kütteseade, on autorid projekti käesolevas faasis keskendunud juba valmishitatud ahjude seisundi hindamisele, ehitatavate ahjude tehniliste parameetrite optimeerimisele ning Euroopa standardi EN 15544:2009 juurutamisele Eestis. Projekti raames on tegeletud ahjude termograafia ja efektiivsuse mõõtmisega ning koostatud eksperthinnanguid.

Koostöös praktikute ja ekspertidega on autorid jõudnud järeldusele, et meil levinud ahjudel esineb puudujääke kolde ja lõõride konstruktsioonis. Kolde mõõdnud peaksid lähtuma põlemisarvutusest ja lõõristiku konstruktsioon soojuslevi teooriast. Seni on aga kolde mõõdnud tuletatud põhiliselt ahju ukse suurusest ning lõõristiku lahendus ehituslikust mugavusest ja tõmbevajadusest. Hästi toimiva kolde saamiseks peaksime lähtuma arvutuslikust kütusekogusest. Küttepuid vajab põlemiseks ruumi ja aega, sest põleb pika leegiga. Ülearu avar kolle vähendab aga kiirgussoojuse ülekannet kolde seintele, sest kiirgussoojuse ülekande intensiivsus on pöördvõrdeline kauguse ruuduga.

Suitsugaasid, mis väljuvad koldest mööda lõõre, annavad oma soojuse edasi lõõri seintele. Seega peavad lõõride pikkused ja nende ristlõige vastama tekkinud suitsugaaside kogusele. Lõõride sisepindade siledus ja sujuvad üleminekud lõõride vahel kindlustavad suitsugaaside kiiruse *ca* 1,2–2,0 m/s. Mida pikem on suitsugaaside teekond, seda rohkem soojust kantakse ajaühikus üle suitsulõõri seintele ja seda suurem on kütteseadme



Joonis 1. Ahju termograafia a – ahju üldvaade, millest tehti termofotod; b – 4 tundi pärast siibri sulgemist; c – 8 tundi pärast siibri sulgemist; d – 21 tundi pärast siibri sulgemist

Figure 1. Owen thermography a – the Picture of the general view of the oven; b – 4 hours after shutting down; c – 8 hours after shutting down; d – 21 hours after shutting down

kasutegur. Siin on kõige enam konstruktsioonilisi mõõdalaskmisi: domineerima kipuvad paralleelsed ja lühikesed lõõrid. Neid on meistril lihtsam ehitada ja seni ei olnud ka arvutusmetoodikat, mis võimaldaks leida suitsugaaside optimaalse teekonna pikkuse ahjus.

Euroopa ahjustandard EN 15544:2009 näeb ette, et kasutegur oleks keskmiselt vähemalt 78%. Kõrge temperatuur koldes, vähemalt 700 kraadi, ja korstnasse suunatud suitsugaaside temperatuur ca 200 kraadi kindlustab peale kõrge kasuteguri veel kütuse puhta põlemise ja selle, et väljuvates suitsugaasides olev CO, NO₂, põlemata orgaanika ja lendtuhk on ELi poolt kehtestatud normide piirides. Kui ahjul on kütmise ajal kõrge kasutegur, peab soojus eralduma ahju pinnalt piisava võimsusega etteantud aja jooksul. Seega ahju välispind (kest) peab soojuse ruumi üle kandma ühtlaselt ja vajaliku võimsusega. Vastasel juhul ei jätku külmema ilma korral soojusest kõetava ruumi kütmiseks.

Kütteperioodil katsetasid artikli autorid Tartus ja mujal Lõuna-Eestis mitmeid erineva konstruktsiooniga ahje, tuvastamaks tüüpilisi konstruktsioonivigu. Põhiliselt olid vaatluse all erineva vanusega pott- ja tellisahjud. Uuritud 12-st ahjust vanima on ehitanud 1940. aastal pottseppmeister Hermann ning uusima 2010. aastal pottseppmeister Koppel. Uuritud ahjudel oli nii pikki kui ka lühikesi lõõristikke ning lisaks eelmainitud klassikalistele ahjudele uuriti ka ühte lühikese lõõristiku ja uudse konstruktsiooniga moodulahju.

Ahju peaks kütma sisemise ukse suletud asendis ja täielikult avatud välimise uksega. See tagab kiire põlemise.

Lõuna-Eestis katsetatud seitsme ahju termograafilise uuringu kohta võib lähemalt lugeda lõputööst (Ladva 2012). Alljärgnevalt on toodud näide ühest sellisest mõõtmisest.

Ahi nr 7 (joonis 1a) on valminud 1953. aastal. See on ebastandardse kujuga potikiviahi. Ahi asub hästi soojustatud maja teisel korrusel ja kütab



Joonis 2. Moodulahju pinnatemperatuuride mõõtmise üldvaade. Pinnaandurite järjekord alt lugedes on 2-4-5-7-3-8-6.

Figure 2. Surface temperatures measurements of modular oven

kokku ligikaudu 45 m² põrandapinda. Ahju pandi korraga umbes 10 kg puid. Mõõtmise ajal oli välistemperatuur 0 °C. Toa temperatuur puude süütamise hetkel oli 21 °C

Joonisel 1b on näha soojuspilt 4 tundi peale ahju siibri sulgemist. Ahju temperatuur on suurim kolde kõrgusel, kus see on tõusnud 65 °C-ni. Ahju külje temperatuur ulatub üle 50 °C, nurgad on soojenenud 43–47 °C-ni. Toa temperatuur on tõusnud 1 kraadi võrra ning pildistamise hetkel oli toas sooja 22 °C.

Joonisel 1c on näha ahju temperatuuri muutumine 8 tundi pärast ahju siibri sulgemist. Ahju pinna temperatuur on jätkuvalt suurim kolde taga, 52 °C. Ahju külje temperatuur ulatub 45 °C-ni. Nurkade temperatuur on ligikaudu 40 °C. Toa temperatuur on 23 °C

Jooniselt 1d on näha, et ahju pinna temperatuur on ligikaudu 32 °C. Nurkade temperatuur on umbes 25–30 °C. Sellel pildil on ahju siibri sulgemisest möödunud 21 tundi. Toa temperatuur oli 22 °C.

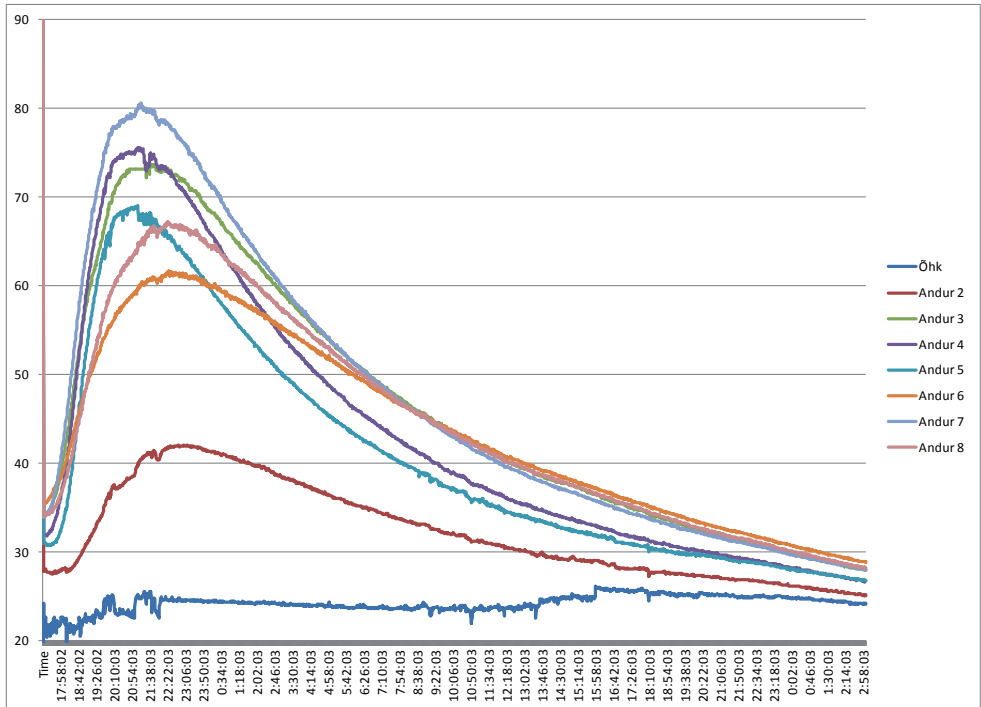
Moodulahju katsetus

Moodulahju võrdlemiseks klassikaliste ahjudega tegid artikli autorid läbi detailse analüüsi, et anda soovitusi ka ahju konstruktsiooni edasiseks täiustamiseks. Kirjeldatud töövõtteid rakendati suuremal või vähemal määral ka eelpool mainitud klassikaliste ahjude katsetamisel.

Uuritud moodulahi (joonis 2) on valminud käesoleva sajandi alguses. Ahi koosneb spetsiaalmodulitest, mis moodustavad kolde ja lõõristiku. Selle ümber on kest, mis tagab soojuse ühtlase ülekande ruumi. Ahju pind on kaetud keraamiliste plaatidega. Vastavalt standardile tuleb jagada kogu ahju pind võrdseteks elementideks ja mõõta keskmisi temperatuure kuni ahju täieliku jahtumiseni. Saadud tulemustest saab arvutada ahju väljundvõimsuse ja ruumi antud energia.

Kütusena kasutatud 14 kg kase halupuidu keskmiseks niiskuseks oli mõõdetud $W_t=15,2\%$, millest järelduvalt on kütteväärtus 15 543 kJ/kg (Lepa jt., 2001) ehk 4,32 kWh. Seega kulutati ahju kütmisel 217,6 MJ

energiat. Lähtudes Wagneri võrrandist (Ebler 2004), leitakse ahju kasutegur otsesel meetodil. Lihtsusustusena on arvutustes kasutatud temperatuuri mõõtmisi ahju tagakülje keskel seitsmest punktist (vt joonis 3). Andmetööstusest nähtub, et ahju kasuteguri keskvärtus oli 78%. Ahjule tehti ka termograafiline analüüs, nagu on kirjeldatud eelnevas osas.



Joonis 3. Ahju pinnatemperatuuride mõõtmistulemused vaatlusperioodil. Andur 1 (õhk) tähistab ümbritseva keskkonna temperatuuri. Pinnatemperatuuride keskmise järgi on leitud hetkevõimsused. Andurite järjekord ahjul on toodud joonisel 2.

Figure 3 Measurement results of surface temperatures

Järeldused klassikaliste ahjude mõõtmistulemustest

Mida pikem on lõõristik, seda madalam on lahkuva suitsugaasi temperatuur, mis tõstab ahju kasutegurit. Lühikese lõõriga ahjudel väljuvad suitsugaasid temperatuuriga isegi üle 400 °C. Ideaalne oleks temperatuur ca 200 °C, aga ka alla 350 °C võib lugeda rahuldavaks. Liiga madalatel temperatuuridel võib omakorda ahju kütmise erinevatel etappidel tekkida suitsugaasi kastepunkt.

Suitsugaasi koostise analüüsile tuginedes võib väita, et põlemiskeemia oli kõigil vaadeldud ahjudel korras.

Järeldused moodulahju mõõtmistulemustest

Uuritud moodulahju lõõristik on avar ja lühike, mistõttu on raskendatud soojusvahetus. Kolde konstruktsioon ja sellest tulenev põlemisprotsess on gaasianalüüsile tuginedes hea. Ahju pind soojeneb pärast kütmist ühtlaselt ja annab soojuse köetavale ruumile üle 18 tunni jooksul. Ahi vajaks kitsamaid ja pikemaid lõõre, mis on konstruktsiooniliselt raskesti saavutatavad.

Kaks rööbiti kulgevat lõõri ahju külgedel võivad tekitada küll piisava küttepinna, kuid suitsugaasi teekond on napp ja efektiivset soojusvahetust on raske korraldada. Tulemuseks võib olla ebapiisav soojusvahetus, mis avaldub põlemisgaaside lubamatult kõrges temperatuuris korstnas. Täpsema tulemuse saamiseks on vajalikud täiendavad mõõtmised.

Ahju igapäevane kasutaja saaks reaajas informatsiooni ahju siibritagusele tahmaluugile monteeritud suitsugaasitermomeetrilt, nagu on kujutatud joonisel 4. Sellise pidevalt jälgitava näidiku põhjal on ahju kasutajal võimalik kujundada optimaalseid ja säästlikke kütmisvõtteid.

Kokkuvõte

Uuring näitab, et tänapäeval on pottseppadel suund ehitada paksema seinaga ahje, sest need püsivad kauem soojad. Seega peab neid harvem kütma. Paksuseinaliste ahjude ehitamine eeldab aga, et maja oleks hästi soojustatud, kuna paksuseinaliste ahjude temperatuur ei tõuse nii kõrgele ja seega jaguneb ruumi antav soojusenergia pikema aja peale. Halvema soojustusega majade puhul võib paksuseinalise ahju võimsus jääda liiga väikseks ja külmemate ilmade korral ei suuda see tuba ära kütta. Siin on kõige enam etteheiteid just telliskiviahjude ehitajatele. Paksuseinaliste telliskiviahjude ehitamine on meile üle võetud. Soomest, kuhu see omakorda jõudis Venemaalt. Euroopas telliskiviahjusid ei ehitata. Senikaua, kui puuduvad reaalsed mõõtmistulemused, on raske objektiivselt põhjendada ühe või teise konstruktsiooni eeliseid ning eksiarvamustel põhinevaid seisukohti ümber lükata.



Joonis 4. Suitsugaasi termomeeter paigutatud läbi tahmatopsi
Figure 4. Flue-gas thermometer in soot hatch

Viimasesse tahmatopsi tuleks paigaldada statsionaarne suitsugaasi termomeeter. Lühikese lõõriga ahjude suitsugaasi lahkumistemperatuur korstnasse on liiga kõrge, mis tähendab suurt soojuskadu, kuid võib põhjustada ka tuleohtu. Seega peaks ahju projekteerimisel leidma võimaluse piisava soojusvahetuspinna loomiseks lõõristikus. Seda sätestab ka vastav standard EN 15544:2009.

Mida öelda ahju kohta, kui kolde temperatuur on 700 kraadi ja suitsugaasid siibri taga 450 kraadi? Sellise ahju kasutegur on 35%. See on küttepuude raiskamise masin!

Kasutatud kirjandus

Ebler, G., “Fachkunde für Hafner, aebvhpt”, Wien, 2004.

Ladva, A. Ahjude termograafiline vaatlus eksperthinnangu eesmärgil bak töö EMÜ 2012.

Lepa, J., Jürjenson, K., Normak, A., Hovi, M. Kütused soojusenergia tootmiseks EPMÜ 2001.

Ecohousing – projekti koduleht: <http://www.ecohousing-project.eu> Saadaval 29.09.2012.

EXAMINATION OF OVENS FOR PROJECT ECOHOUSING

Mart Hovi, Andres Menind, Külli Hovi, Argo Ladva, Annes Andresson

Partners from EMU of Project Ecohousing and external experts examined the deployment of renewable energy within the solid fuel ovens in southern Estonia. 12 ovens were tested. The results show that the fireplace, piping and accumulative part should function compatibly. However, sometimes it is not so. Constructional errors occur for some newer heating devices. As a result, the temperature of flue gas is high which causes heat-loss and inflammability. Simple smoke thermometer can help in the observation of the behaviour of the equipment.



**CENTRAL BALTIC
INTERREG IV A
PROGRAMME
2007-2013**



**EUROPEAN UNION
EUROPEAN REGIONAL DEVELOPMENT FUND
INVESTING IN YOUR FUTURE**

AEGLASEKÄIGULINE OTSETOIMELINE PÜSIMAGNETGENERAATOR TUULEAGREGAATIDELE

Ants Kallaste¹, Toomas Vaimann¹, Ott Pabut²
Tallinna Tehnikaülikool

¹Elektrotehnika aluste ja elektrimasinate instituut

²Masinaehituse instituut

ants.kallaste@ttu.ee, toomas.vaimann@ttu.ee, otpabut@hotmail.com

Annotatsioon

Tallinna Tehnikaülikooli elektrotehnika aluste ja elektrimasinate instituut ning masinaehituse instituut on viimasel ajal uurinud võimalusi aeglasekäiguliste püsimagntgeneraatorite kasutamiseks tuuleagregaatides. Mainitud uuringute tööstuspartneriteks on ettevõtted Goliath Wind ja my!Wind. Nimetatud generaatorite kasutamiseks on mitmeid võimalusi ja eelseid. Antud artiklis kirjeldatakse erinevaid aeglasekäigulise püsimagntgeneraatori rootorilahendusi, kasutades selle konstrueerimisel erinevaid magneeteid ning antakse ülevaade juba valminud 5 kW generaatorist.

Märksõnad: tuulegeneraator, püsimagnt

Sissejuhatus

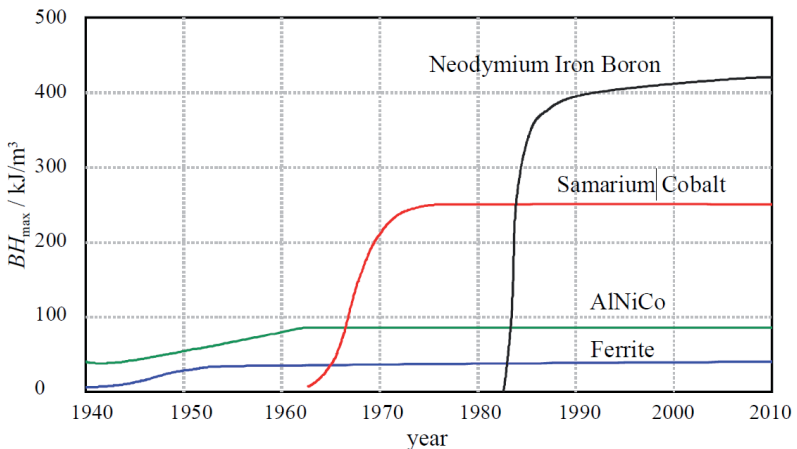
Maailmas on üha enam hakatud tähelepanu pöörama energia tootmisele taastuvatest energiaallikatest. Tuuleenergiast nähakse antud valdkonnas suurt potentsiaali. Sellest tulenevalt on hakatud rõhku panema tuulegeneraatorite arendamisele ning nende võimalikult optimaalsele kasutamisele. Tuulikutes kasutatakse mitmeid eri tüüpi generaatoreid. Vanim ning enim levinud generaatori tüüp, mida elektrituulikutes kasutatakse, on induktioonmasin [Muller jt., 2002]. Antud lahendus aga nõuab üldiselt tuulikuga ülekande kasutamist, mis omakorda põhjustab madala töökindluse masinates. Töökindluse tõstmiseks on hakatud rohkem rõhku panema otsetoimelistele tuulikutele, milles on kasutamist leidnud peamiselt püsimagntmasinad [Bianchi jt., 1996]. Antud töös vaadeldaksegi üht eritüübilist otsetoimelist tuulegeneraatorit.

Püsimagnetid

Püsimagnetite kasutusele võtmine generaatorites võimaldab valmistada energaetiliselt efektiivseid masinaid, mille kasutamine tuulikutes on atraktiivne. Suurte tööstuslike püsimagnetmasinate arendus on veel uus ning pakub palju erinevaid lahendusi.

Püsimagnetite valikus lähtutakse üldiselt püsimagneti energiatihedusest. Joonisel 1 on toodud püsimagnetite areng vastavalt nende energiatiheduse kasvule.

Just muldmetallidest magnetid on andnud tõeke püsimagnetmasinate arengusse. SmCo-magnetid on olnud üldiselt liiga kallid, et oleksid leidnud kasutamist. Samas NdFeB-magnetid on energiatiheduse poolest veidi paremad kui SmCo, kuid pikka aega on probleemiks olnud nende temperatuuritaluvus. NdFeB-magnetid on aga viimase kümne aasta jooksul teinud läbi suure arengu korrosioonikaitstes ja temperatuuritaluvuses [Pyrhönen jt., 2010] ning seetõttu on NdFeB üks peamisi magnetmaterjale, mida kasutatakse suurtes elektrimasinates.



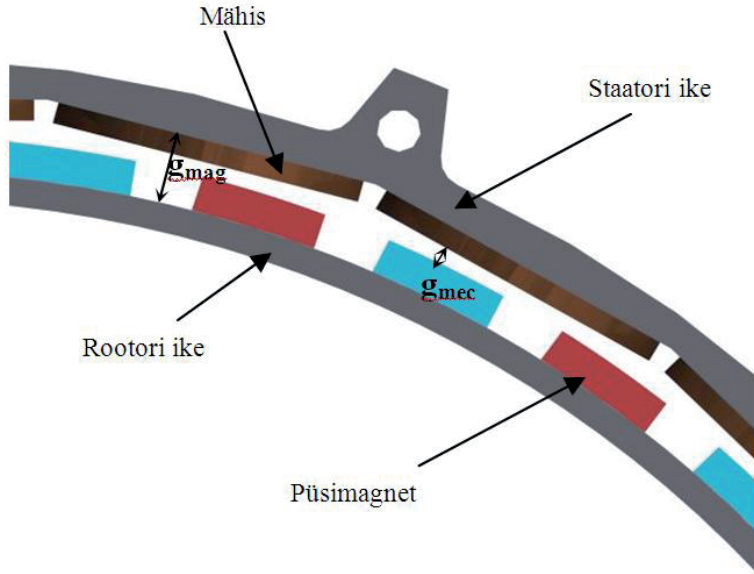
Joonis 1. Magnetmaterjalide areng magneti energiatootlikkuse järgi
Figure 1. Maximum energy product (BH)_{max} development of permanent magnet materials

Generaatori topoloogia valik

Otsetoimegeneraatorid, mida kasutatakse tuulikutes, on suured, rasked ja kallid võrreldes generaatoritega, mis on kasutusel ülekandega tuulikutes [Shrestha jt., 2010]. Samas pakuvad otsetoimetuulikud oluliselt suuremat töökindlust, kuna seal kasutatakse vähem mehaaniliselt kuluvaid osasid. Otsetoimelise tuuliku mass on suur, sest kasutatav standardne generaatorilahendus on võetud aeglasekäigulistelt hüdrogeneraatoritelt. Generaatori topoloogia valikul ongi üheks eesmärgiks võetud konstrueerida võimalikult väikese massiga generaator, mis sobiks kasutamiseks otsetoimelistes tuulikutes.

Generaatori elektrilise osa võib jagada kaheks – aktiivosaks ja passiivosaks. Generaatori puhul koosneb aktiivosa magnetväljaallikast, milleks võib olla nii elektromagnet kui püsomagnet, ning mähjustest, millesse elektrienergia genereeritakse. Passiivosa kasutatakse magnetvälja suunamiseks ning suure energiatiheduse saamiseks õhupilus. Oma erikaaludelt on nii aktiiv- kui passiivosa sarnaste suurustega – raual (Fe) 7870 kg/m³, vasel (Cu) 8940 kg/m³ ja NdFeB-magnetil 7500 kg/m³. Kusjuures tavaliselt moodustab masinate poole generaatori kaalust passiivosa. Kuna passiivosa on vajalik ainult magnetvälja suunamiseks ja magnetvälja tugevdamiseks ning ei ole otseselt vajalik elektri genereerimiseks, siis teoreetiliselt võime selle staatoris ära jätta. Sellisel juhul väheneb oluliselt magnetvälja tihedus õhupilus, kuid kasutades haruldasi muldmetalle, on siiski võimalik saavutada õhupilus vähemalt 0,25 T suurune väli [Spooner jt., 2005]. See on piisav elektrimasina valmistamiseks ning võimaldab valmistada kerge konstruktsiooniga suure läbimõõduga masinaid. Tulemuseks on generaator, mis kaalub 20–30 % vähem võrreldes sarnase disainiga masinaga, milles on kasutusel raudsüdamikud. Masina saavutatav kasutegur on suurem kui 90% [Spooner jt., 2005]

Töös ongi lähtekonstruktsiooniks võetud rauavaba staatoriga generaator [Spooner jt., 2005]. Kuid rauavaba konstruktsiooni uurimisel jõuti järeldusele, et siiski on mõistlik kasutada ka rootori iket, kuna sellisel lahendusel on sarnased omadused, mis rauavabal konstruktsioonil. Liiks annab selline lahendus parema magnetvoo tiheduse õhupilus ning

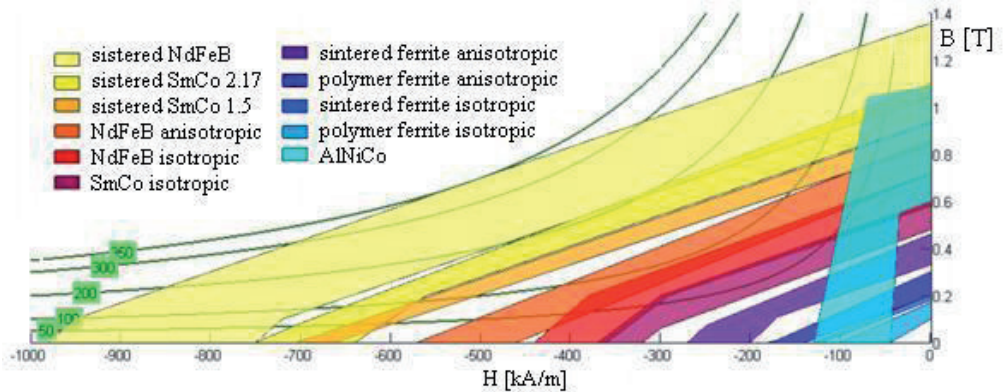


Joonis 2. Generaatori konstruktsioon
Figure 2. Construction of the generator

ka konstruktsiooniliselt on lihtsam antud masinat valmistada. Lõpptulemuseks leiti, et parimaks generaatori lahenduseks otsetoimetuulikus on generaatori konstruktsioon, mis on toodud joonisel 2. Sellist masinat nimetatakse uuerevabaks püsिमagnetitega kolmefaasiliseks generaatoriks. Niisugune lahendus võimaldab valmistada muldmetallist magnetitega suure raadiusega aeglasekäigulisi kergeid masinaid, millel on väike käivitusmoment. Väike käivitusmoment tuleneb konstruktsioonist, kuna nii rootori kui staatori vastastikused ferromagnetilised pinnad õhupilus on praktiliselt ühtlase suurusega. See tähendab, et magnetiline takistus on antud masinal suvalises rootori asendis ühesugune ning selle tõttu ei saa antud masinal esineda kleepuvusmomenti. Kleepuvusmomendi puudumine on väga oluline, kuna tuuliku puhul töötab generaator enamuse ajast väikesel momendil võrreldes nimimomendiga, mis tähendab, et kleepuvusmoment võib põhjustada soovimatut kiiruse kõikumist (vibratsiooni) või isegi takistada generaatori käivitumist.

Generaatori konstruktsioon

Generaatori projekteerimisel võeti aluseks, et generaator sobiks töötama 5 kW allatuule tuulikul ning vastaks eelpool kirjeldatud generaatori topoloogiale. Püsिमagnetite valikul lähtuti generaatori magnetite energiatihedusest. Kõige suurem energiatihedus on NdFeB-magnetitel (joonis 3), mis valitigi esimese generaatori valmistamiseks.



Joonis 3. Demagnetiseerimiskõver erinevatel püsिमagnetmaterjalidel
Figure 3. Demagnetization curves of different magnetic materials

Generaatori projekteerimise tulemusel konstrueeriti generaator. Parameetrid, millele generaator vastama pidi, on toodud tabelis 1 ning konstrueeritud laboratoorne mudel on toodud joonisel 4.

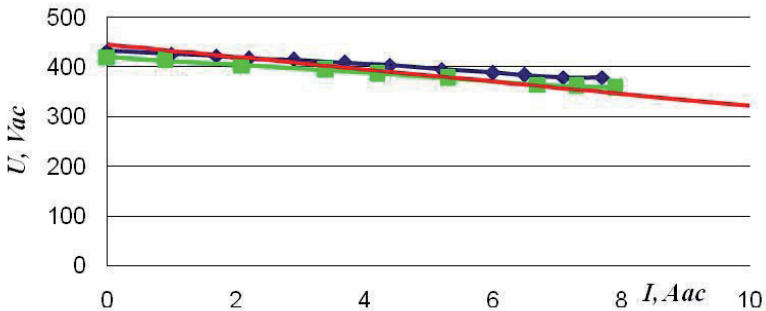
Tabel 1. Projekteeritud generaatori nimiaandmed
Table 1. Designed generator parameters

Võimsus/Power	5 kW
Pöörlemiskiirus/Rotational speed	230 rpm
Nimipinge/Nominal voltage	340 Vac
Nimivool/Nominal current	8,5 Aac
Mähised/Coils	24
Poolused/Poles	40
Generaatori läbimõõt/Generator diameter	690 mm



Joonis 4. Projekteeritud generaatori prototüüp NdFeB-magnetitega
Figure 4. Prototype machine with NdFeB magnets

Valmistatud generaatoril viidi läbi ka katsetus, mille tulemusi võrreldi arvutustes saadud tulemustega. Saadud tulemused on esitatud joonisel 5. Projekteeritud generaator on mõeldud rakendamiseks allatuult tuulikutes, mis on rakendatud elektrivõrguga koos töötamiseks. Prototüüp-tuulik on valmistatud (joonis 6) ning sellel viiakse läbi katsetusi.



Joonis 5. Generaatori koormuskarakteristik vastavalt katse (sinine ja roheline) ja arvutuse (punane) tulemustega
Figure 5. NdFeB generator load characteristic. Blue and green lines are measured lines and red is calculated

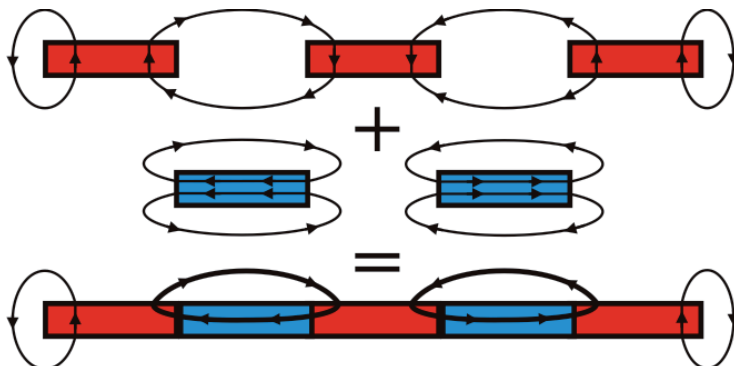


Joonis 6. Allatuult elektrituuliku prototüüp
Figure 6. Prototyp downwind windmill

Võimalikud lahendused, kasutades erinevat magneti materjali

Kuna 2011. aastal on oluliselt tõusnud NdFeB-magneti hind, siis on uuritud võimalusi teiste magnetmaterjalide kasutamiseks antud generaatoris. Esmalt võeti uurimise alla teine enimlevinud ning suure magnetilise energiaga muldmetallmagnet SmCo (joonis 3). Antud materjal on veidi nõrgemate magnetiliste parameetritega kui NdFeB-magnetid ning on loogiline, et sellisel juhul ei tohiks olulisi muutusi olla generaatori konstruktsioonis. NdFeB-generaatoris saadi magnetiliseks tiheduseks generaatori õhupilus 0,66 T. Selleks, et tagada sama magnetvootihedus SmCo-masinas, on vaja suurendada magneteid. Arvutuslikult leiti, et kui ehitada samade parameetritega SmCo-masin, mis vastaks NdFeB-masinalle, tuleb generaatoris kasutatavate magnetite paksust suurendada 1,2 korda, mille tulemusel suureneb kogu generaatori kaal 1,12 korda.

Lisaks võeti uurimise alla madala energiatihedusega magnetmaterjalid. Jooniselt 3 on näha, et AlNiCo magnetmaterjal võimaldab küll saada suurt koertsitiivjõudu, kuid kahjuks koormusel kukub tema magnetvoo tihedus järsult ning on oht magnet demagnetiseerida. Sellise magneti kasutamine generaatoris on kirjeldatud nähtuse tõttu keeruline ning ei ole soovitatav. Teiseks võeti uurimise alla võimalus kasutada ferriitmagneteid, aga kuna nende energiatihedus on väike ning koertsitiivjõud madal, siis on traditsioonilise magnetite paigutusega peaaegu võimatu saada antud generaatori

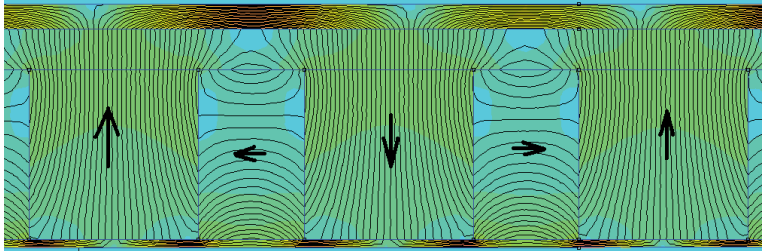


Joonis 7. Halbachi magnetite paigutuse põhimõte
Figure 7. Principle of Halbach array

tüübi juures mõistlikku väljatugevust. Selleks, et tõsta magnetvoo tihedust õhupilus, said uurimise alla võetud eri paigutusega magnetite lahendused. Üheks võimalikuks lahenduseks osutus Halbachi paigutus. Sellises lahenduses paigutatakse magnetitepooluste vahele radiaalsuunalised magnetid, mis aitavad magnetvälja suunata mööda soovitud teekonda (joonis 7).

Selline lahendus võimaldab oluliselt tõsta magnetvoo tihedust õhupilus ning tekib reaalne võimalus kasutada ferriitmagneteid. Sellise lahenduse üks miinuseid on, et sama energia ülekandmiseks läbi õhupilu, võrreldes muldmetallidega, on vaja oluliselt rohkem magnetmaterjali, mis omakorda tõstab oluliselt generaatori massi. Samas on ferriitmagnetite hinnad tunduvalt madalamad kui muldmetallide hinnad.

Ferriitmasinal on teostatud FEM (lõplike elementide meetod) analüüs, mille välja jaotus on toodud joonisel 8, kus on näha ka magnetite paigutussuunad ja välja jõujooned. Analüüsi tulemusena leiti, et sellise lahendusega on võimalik saavutada õhupilus magnetvootiheduseks 0,37 T, mis on 44% väiksem kui muldmetallmasinatel. Sellest tulenevalt on vajalik mitte ainult kasutada oluliselt rohkem magnetmaterjali, vaid ka generaatori laius peab suurenema, et saavutada samade väljundparameetritega masinat, nagu muldmetalli puhul. Kuna aga ferriitmaterjal on oluliselt odavam, siis kokkuvõttes jääb sellise generaatori hind muldmetallmasinatega võrreldes konkurentsivõimeliseks.



Joonis 8. FEM arvutus tulemus ning PM magnetiseerituse suunad
Figure 8. FEM calculation results and PM magnetization direction

Kokkuvõte

Antud töös uuriti uut tüüpi tuulegeneraatorit, milleks on uurdevaba otse-toimeline püsomagnetmasin. Töös käsitleti generaatori topoloogia valiku tingimusi ning toodi välja antud generaatoritüübi eelised ning vaadeldi erinevaid püsomagnetmaterjale ja käsitleti nende võimalikku rakendamist antud generaatoris.

Tulemuse saamiseks uuriti kolme erineva magnetmaterjali kasutamist generaatoris ja selle baasil projekteeriti lõplik lahendus. Arvutustest on näha, et kuigi NdFeB-magnetitega generaator on kaalult kõige kergem, kuid kuna antud materjali hind on väga kõrge, siis pakuvad sellele lahendusele konkurentsi ka kaalult veidi raskem SmCo-magnetiga masin ning oluliselt raskem ferriitmasin.

Kasutatud kirjandus

- Bianchi, N., Lorenzoni, A., Permanent magnet generators for wind power industry: an overall comparison with traditional generators. International Conference on Opportunities and Advances in International Electric Power Generation, 18–20 March 1996, Durham, 49–54.
- Muller, S., Deicke, M., DeDoncker, R. W., Doubly fed induction generator systems for wind turbines. IEEE Industry Application Magazine, vol. 8 no. 3, May-June 2002, 26–33.
- Pyrhönen, J., Nerg, J., Kurronen, P., Puranen, J., Haavisto, M., Permanent Magnet Technology in Wind Power Generators. XIX International Conference on Electrical Machines – ICEM 2010, Rome. 2010, 1–6.
- Shrestha, G.; Polinder, H.; Bang, D.; Ferreira, J.A. “Structural Flexibility:

A Solution for Weight Reduction of Large Direct-Drive Wind-Turbine Generators” Energy Conversion, IEEE Transactions on. Volume: 25 , Issue: 3, 2010, 732–740.

Spooner, E., Gordon, P., Bumby, J.R., French, C.D., Lightweight ironless-stator PM generators for direct-drive wind turbines. Electrical Power Applications, IEEE proceedings, Volume 152, Issue 1, 2005, 17–26.

SLOW-SPEED DIRECTLY DRIVEN PERMANENT MAGNET GENERATOR FOR WIND APPLICATIONS

Ants Kallaste, Toomas Vaimann, Ott Pabut

Department of Fundamentals of Electrical Engineering and Electrical Machines in Tallinn University of Technology have been researching the possibilities for using slow-speed ring-shaped permanent magnet generators in wind energy applications. Goliath Wind Ltd and my!Wind Ltd are the industrial partners for this project. There are different benefits and solutions for these generator types. This paper is describing different rotor solutions for slow-speed ring-shaped permanent magnet generators using different magnet types and presents an overview of a finished 5 kW generator.

PÖÖRLEVATE ELEKTRIMASINATE DIAGNOSTIKA STAATORISIGNAALIDE ANALÜÜSI MEETODIL

Toomas Vaimann, Ants Kallaste, Aleksander Kilk
Tallinna Tehnikaülikool
Elektrotehnika aluste ja elektrimasinate instituut
toomas.vaimann@ttu.ee, ants.kallaste@ttu.ee, aleksander.kilk@ttu.ee

Annotatsioon

Kõik masinad, ükskõik kui kvaliteetselt projekteeritud, arvutatud või ehitatud, riknevad teatud hetkel oma elutsükli jooksul. Kui töös olevate masinate olukorda ei monitoorita ning võimalikke diagnostikameetmeid ei rakendata, võivad rikete resulteeruvad tagajärjed olla suure majandusliku väljamineku allikaks, aga ka üleüldiselt väga ohtlikud. Isegi väikesed ning algul tühisena tunduvad rikked võivad aja möödudes ja süvenedes võtta katastroofilised mõõtmed. Artikkel kirjeldab elektrimasinates enamlevinud rikkeid ning peamisi diagnostikameetodeid, mille abil on võimalik rikkeid ennetada ning tuvastada.

Märksõnad: elektrimasinad, asünkroonmasinad, diagnostika.

Sissejuhatus

Taastuvenergia kasutamine ja genereerimine on muutumas tänapäeva maailmas järjest olulisemaks. CO₂ heitmete määrad ning alternatiivsete energiaallikate otsingud fossiilsete kütuste osakaalu vähendamiseks on loonud eeldused tuuleenergeetika ja hüdrojaamade arenguks ja esilekerkimiseks. Tänu sellele tendentsile on tuuleenergeetika tööstuse mõttes üks kõige kiiremini arenevaid tööstusharusid maailmas. Sellistes jaamades on seni enamlevinud generaatoriteks asünkroonmasinad, mida eelistatakse nende lihtsuse ja madalate tootmiskulude tõttu.

On terve rida eri rikkeid, mis ohustavad elektrimasinate töökindlust. Enamik nendest rikestest saavad alguse väikestest kõrvalekalletest normaaltalitlusest. Suurim mure selliste kõrvalekallete puhul on asjaolu, et kui neid võimalikult varases staadiumis ei avastata ja nendega ei tegeleta, võivad nad arenedes saavutada katastroofilised mõõtmed. Üks võimalus elektrimasinate rikete varajaseks avastamiseks on masinate diagnostika.

Diagnostilistel eesmärkidel on võimalik mõõta ja jälgida masina mitmeid eri parameetreid. Nendeks on näiteks vibratsioonid, soojuskaod, müra, kõrvalekalded geomeetriast, pöörlemiskiirus, elektrilised parameetrid (pinge, vool, sagedus, takistus jne). Nimekiri on pikk ja pidevalt täienev. Samuti on diagnostika rakendatav väga erinevates tööstusharudes.

Põhilised rikked elektrimasinates

Elektrimasinad on suurema osa olemasolevate seadmete ja tööstuslike protsesside kriitiliseks komponendiks. Enamgi veel: tihti kasutatakse masinaid väga vastutusrikaste ülesannete täitmisel, kus ootamatud rikked võivad tahes tahtmata kaasa tuua mõttetuid riske inimeste ja seadmete ohutusele, aga ka suuri majanduslikke kahjusid. Kuna maailmas on enim kasutatavad asünkroonmasinad, siis edaspidi on välja toodud mõned levinumad rikked, mis esinevad just seda tüüpi elektrimasinates.

Purunenud rootorivardad

Üks tavalisematest rikestest asünkroonmasinate puhul on lühisrootori varraste purunemine. Joonisel 1 on toodud näiteks ülekoormuse tõttu purunenud rootorivardad.



Joonis 1. Ülekoormuse tõttu purunenud rootorivardad (Fišer ja Lavric 2008).
Figure 1. Broken rotor bars due to heavy duty operation (Fišer and Lavric 2008).

Sellise rikke esilekerkimisel on tavaliselt põhjuseks tootmispraak halva kvaliteediga joote või valu näol. Teine üsnagi sage põhjus on näiteks rootori kiilumise tõttu esinev liigvool (Lindh 2003). Samas on mitmeid teisi põhjusi, miks rootorivardad mõranema ja purunema hakkavad.

Rootorivarraste purunemisel on kõige raskemaks juhtumiks olukord, kus purunenud vardad asuvad järjest üksteise kõrval. Praktikas ongi see enimlevinud juhtum, sest üldiselt ei reageerita sellisele rikkele piisava kiirusega. Kuna purunenud varda takistus muutub väga suureks, võrreldes korras varda omaga, hakkab rootorivool ebaproportsionaalselt jagunema. Vool, mis ei saa läbi katkise varda voolata, otsib omale teed järgmistest tervetest varrastest, mille tõttu voolu väärtus neis varrastes kasvab. Kuna neis varrastes on ka normaalsest suurem voolutihedus, hakkavad need üle kuumenema ning aja möödudes pragunema ja purunema. Kui sellisele rikkele tähelepanu ei pöörata, areneb rike edasi järgmistesse varrastesse, kuni kogu rootorimähis on hävinenud.

Laagrite rikked

Laagrite rikkeid võib lühisrootoriga asünkroonmootorite puhul lugeda kõige tavalisemaks vigastuseks. Joonis 2 näitab üht tüüpilist riknenud laagrit sellises masinas. Tavaliselt eristatakse kaht tüüpi rikkeid: esiteks defektid üksikutes laagripunktides ja teiseks üldine karedus (Vitek jt 2011).



Joonis 2. Laagri pinnakihi vigastus (Lindh 2003).
Figure 2. Flaking of the bearing (Lindh 2003).

Üksikute punktide defektide puhul saab vibratsioonisignaalide spektraalkomponentide karakteristikute järgi ennustada laagrite sisemise ringi, välimise ringi, veerevate elementide ja kogu laagri kui terviku

rikkeid. Need rikkesagedused võivad esineda ka staatorivoolu spektris põhiharmooniku ümbruses (Schoen jt 1995). Kuigi rikkesignaaliid on tavaliselt graafikult selgesti loetavad, on neid siiski staatorivoolu analüüsi puhul madala amplituudi ja taustamüra tõttu raske jälgida (Immovilli jt 2010).

Vastupidiselt üksikute punktide defektidele ei oma üldine karedus kindlat karakteriseerivat sagedust, vaid on kindlatel sageduse ribalaiustel pigem aimatav. Selle tõttu diagnoositakse üldist karedust viisil, kus laagritest mitteolenevad rikkesageduslikud spektraalkomponendid eemaldatakse analüüsitava spektrist ja kasutatakse allesjäävat signaaliosa laagrite rikete tuvastamiseks. Kuna üldine karedus on sage laagririke, on selle diagnostika meetodeid maailmas laialdaselt uuritud (Vitek jt 2011).

Õhupilu ebaühtlus

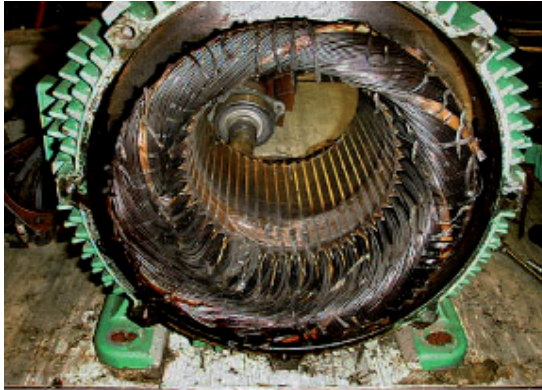
Õhupilu ebaühtlus tekib elektrimasinates tootmises esinevate mõõdalaskmiste, aga ka masina eksploatatsioonist tulenevate põhjuste tõttu. Tüüpiliseks ja normaalseks loetakse nii staatilise kui ka dünaamilise ekstsentrilisuse puhul 10% kõikumist kogu õhupilu ulatuses (Nandi jt 2001). Õhupilu ebaühtlus põhjustab ebaühtlust magnetväljades, mis väljendub vibratsioonides, akustilises müras, laagrite kulumises ja/või rootori hälbes. Ebaühtlus suurendab ka staatori-rootori hõõrdumise võimalust, mis võib masinat tõsiselt kahjustada (Hong jt 2011).

Staatiliseks ekstsentrilisuseks nimetatakse olukorda, kus radiaalse õhupilu minimaalne laius on fikseeritud (Hong jt 2011). Seda põhjustavad staatori kere ovaalsus, staatori kere või laagrite väär paigutamine tootmisel või parandusel ja üldiselt ebaühtluse tase ajas ei muutu (Nandi jt 2001).

Dünaamilise ekstsentrilisuse puhul on rootori keskpunkt pöörlemistelje keskpunkti suhtes nihkes ja punkt, kus õhupilu on minimaalse laiusega, pöörleb rootoriga kaasa (Hong jt 2011). Sellist nähtust võivad põhjustada kulunud laagrid, paindes võll, rootori asümmeetriline soojuslik paisumine või suuremahuline staatiline ekstsentrilisus (Nandi jt 2001).

Staatori rikked

Kõige sagedasemateks staatoririketeks võib lugeda mähise keerdude vahelisi lühiseid, mida illustreerib joonis 3. Teiseks sagedaseks rikkeks on lühised staatori laminaatide vahel.



Joonis 3. Lühistatud staatori mähised.
Figure 3. Short-circuited stator windings.

Staatori mähiste rike saab tavaliselt alguse lühisest üksteise kõrval asuvate mähiskeerdude vahel. Seda võib põhjustada mähise isolatsiooni riknemine, mis omakorda annab võimaluse voolu tõusuks ja mähiste ülekuumenemiseks. Ülekuumenemine võib omakorda areneda tõsiseks rikkeks mähise faaside või faasi ja maa vahel, mille tagajärjeks on pöördumatud kahjustused nii mähistes kui ka staatori keres.

Kirjeldatud rikkeid on oluline tuvastada võimalikult varajases staadiumis, et ennetada tõsiseid vigastusi terves masinas. Kirjeldatud probleemid on kordades võimendatud masinates, kus kasutatakse näiteks sagedusjuhtimist, sest muunduri lülitustel tekivad suured pingekõikumised.

Diagnostika võimalused

Tänapäeva arenenud riikides on installeeritud rohkem kui 3 kW elektrimootoreid inimese kohta ja enamik sellest installeeritud võimsusest kuulub asünkroonmootoritele (Boldea ja Nasar 2002). Paari viimase aastakümne jooksul on hakatud masinate diagnostika vastu järjest suurenevat

huvi tundma. Seoses sellega on avaldatud palju uurimusi ja teadustöid, mis antud valdkonnaga tegelevad. Uuritud on ka mitmeid diagnostikameetodeid, millest mõnda üksikut ka antud artiklis kirjeldatakse. Rikke ennetamiseks sobiva diagnostikameetodi valikul tuleb silmas pidada, et masina töösükli häirimine ei ole antud olukorras sobiv. Seega tuleks eelistada meetodeid, mille rakendamisel ei tule masinate töös mingeid muudatusi teha. Samuti tuleb silmas pidada, et järjest rohkem masinaid töötavad kahasse sagedusmuunduritega, mis oma kõikuva sageduse ja enda poolt genereeritavate harmoonikutega rikete diagnoosimise ning rikkesageduste tuvastamise keerulisemaks teevad.

Kiire Fourier' teisendus

Fourier' analüüs on väga hästi rakendatav juhul, kui analüüsitakse statsionaarseid signaale. Seda on kasutatud palju ka elektrimootorite diagnostikas. Iseenesest ei ole tegu parima võimaliku meetodiga elektrimasinate puhul, sest tihti muutuvad signaalid ajas ning sel juhul on rikkesignaalide normaaltalitlusest eristamine Fourier' meetoditel raskendatud. Tänapäeval on Fourier' teisendust kirjeldatud põhjustel edasi arendatud ja diagnostilistel eesmärkidel kasutatakse tihti näiteks lainikute analüüsi, mida selles artiklis pikemalt ei selgitata.

Klassikalist Fourier' teisendust kasutatakse staatorivoolu ühe faasi jälgimiseks. Selleks eemaldatakse 50 Hz ergutuskomponent läbi madalpääsfiltri ja koostatakse saadava signaali tunnusjoon. Voolutrafo tunnetab faasivoolu ja saadab selle 50 Hz kitsastõkkefiltrisse, kus vähendatakse põhikomponenti. Analoogsignaali võimendatakse ja filtreeritakse madalpääsfiltri abil. Filtreerimine eemaldab mittesooitud kõrgsageduslikud komponendid, mis põhjustavad diskreetsushäiret, samal ajal kui võimendus suurendab analoog-digitaalmuunduri sisendi kasutuspiirkonda maksimumini. Analoog-digitaalmuundur diskreedib filtreeritud voolusignaali etteantud diskreetimisagedusega, milleks on 50 Hz täisarvuline kordaja. Seda protsessi korratakse kogu diskreetimisperioodi vältel, mis on piisav nõutava kiire Fourier' teisenduse saavutamiseks.

Parki vektori analüüs

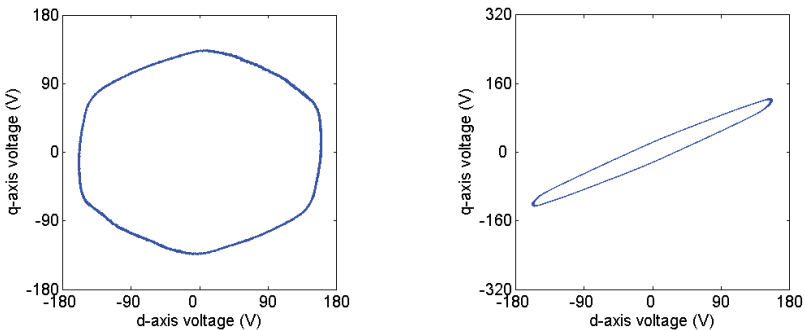
Asünkroonmootorite kolmemõõtmeliste nähtuste kirjeldamiseks saab kasutada kahemõõtmelist taustsüsteemi. Selleks vajalikud teisendused saab teha, kasutades Parki vektorit (või Clarke'i vektorit):

$$\begin{cases} i_{\alpha} = i_a \\ i_{\beta} = \sqrt{2/3}(i_b + i_c) \end{cases},$$

kus i_a , i_b , ja i_c tähistavad faasivoolusid, i_{α} ja i_{β} voolu piki- ja põikikomponente.

Parki vektori väljundiks on ringikujuline tunnusjoon, mille keskpunkt asub koordinaatide alguspunktis. Tegu on väga lihtsa tunnusjoonega, mis võimaldab tuvastada masina normaaltalitlusest kõrvalekallet mistahes rikke puhul, jälgides tunnusjoone erinevust ideaalsest ringist.

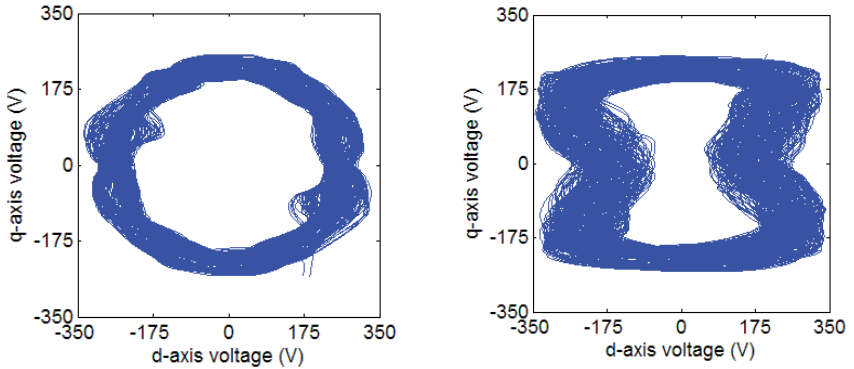
Sama teisenduse saab teha juhul, kui kasutada voolu asemel pingesignaali (Vaimann jt 2011). Pinge kasutamine rikkeindikaatorina annab tihti paremaid tulemusi kui voolu kasutamine, sest pinge ei ole otseselt momenti poolt mõjutatav ja seda hoitakse üldiselt konstantse väärtuse juures. Samuti on nii juhtimisega kui ka juhtimiseta elektrimasinate diagnostika pingeanalüüsi puhul võimalik. Joonis 4 näitab staatori pingest tulenevat Parki vektori tunnusjoont korras ja rikkis rootori puhul. Joonis 5 näitab



Joonis 4. Staatori pinge Parki vektori tunnusjoon korras (vasakul) ja rikkega (paremal) rootori puhul (Vaimann jt 2011).

Figure 4. Stator voltage Park's vector pattern of a healthy (left) and a faulty (right) rotor (Vaimann *et al* 2011).

sama sagedusmuunduriga juhitud mootori puhul. Sagedusmuunduriga töötava masina tunnusjoonte kuju erinevus on tingitud sageduse kõikumisest ja sagedusmuunduri poolt tekitatavates lisaharmonikes ning müras, mis vähendab oluliselt rikete tuvastamiseks kasutatavate sagedusribade osakaalu. Selle tõttu on sagedusmuunduriga juhitud masinate rikete tuvastamine tunduvalt keerulisem.



Joonis 5. Staatori pinge Parki vektori tunnusjoon korras (vasakul) ja rikkega (paremal) rootori puhul, juhitud läbi sagedusmuunduri.
Figure 5. Stator voltage Park's vector pattern of a healthy (left) and a faulty (right) rotor, that has been supplied through a frequency converter.

Kokkuvõte

Erinevate diagnostikameetmete ja -vahendite kasutamine on muutumas üha vajalikumaks, kuna vastutusrikkaid ülesandeid täitvate masinate arv kasvab ajas pidevalt. Rikked, esialgu isegi tähtsusetud ja väikesed, tuleks võimalikult varajases staadiumis tuvastada, et ennetada nende arenemine sellisele tasemele, kus nendega tegelemine võimatuks või majanduslikult mõttetuks kujuneb.

Üldjuhul on võimalik masina talitlusest ja olukorrast aimu saada artiklis kirjeldatud diagnostikameetodite abil. Mingi kindla diagnostikameetme ja indikaatorparameetri valikul tuleb lähtuda masina, tema talitluse ja temaga kahas oleva sisseseade iseärasustest. Masina eluea pikendamisel mängib reaalaja diagnostika väga suurt rolli.

Kasutatud kirjandus

- Boldea I., Nasar S., *The Induction Machine Handbook*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2002.
- Fišer R., Lavric H., On-line detection and diagnostics of induction motor rotor faults using spectral analyses of stator current. - Proceedings of the 5th International Symposium on Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering, Doctoral School of Energy and Geotechnology, January 14-19, Kuressaare, Estonia, 2008, pp. 7-11.
- Hong J., Lee S., Kral C., Haumer A., Detection of Airgap Eccentricity for Permanent Magnet Synchronous Motors based on the d-axis Inductance. - Proceedings of the 8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, September 5-8, 2011, Bologna (Italy), ID-96.
- Immovilli F., Bellini A., Rubini R., Tassoni C., Diagnosis of Bearing Faults in Induction Machines by Vibration or Current Signals: A Critical Comparison. - IEEE Transactions on Industry Applications, July/August 2010, vol. 46, no. 4, pp. 1350–1359.
- Lindh T., On the condition monitoring of induction machines. Lappeenranta: Lappeenranta University of Technology, 2003. 148 p.
- Nandi S., Ahmed S., Toliyat H., Detection of rotor slot and other eccentricity related harmonics in a three phase induction motor with different rotor cages. - IEEE Transactions on Energy Conversion, September 2001, vol. 16, no. 3, pp. 253-260.
- Vaimann T., Kallaste A., Kilk A., Sensorless Detection of Induction Motor Rotor Faults Using the Clarke Vector Approach. - Scientific Journal of Riga Technical University, vol. 29, 2011, pp. 43-48.
- Vitek O., Janda M., Hajek V., Bauer P., Detection of Eccentricity and Bearings Fault Using Stray Flux Monitoring. - Proceedings of the 8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, September 5-8, 2011, Bologna (Italy), ID-218.
- Schoen R., Habetler T., Kamran F., Bartfield R., Motor bearing damage detection using stator current monitoring. - IEEE Transactions on

Industry Applications, November/December 1995, vol. 31, no. 6,
pp. 1274–1279.

DIAGNOSTICS OF ROTATING ELECTRICAL MACHINES USING ANALYSIS OF STATOR SIGNALS

Toomas Vaimann, Ants Kallaste, Aleksander Kilk

All machines, no matter how well they are designed, calculated or produced have the tendency to fail at some point of their existence. If the condition of the machines in use is not monitored in any way and the maintenance is forgotten, the resulting failures may pose a large economic and safety risk. Even the small and at first not important faults can end in catastrophic measures. This paper describes the main faults that occur in electrical machines and the diagnostic methods that can be used to detect these faults.

HOONE ELEKTRISÜSTEEMI INNOVATSIOONID JA ARUKA VÕRGU ARENDUS

Valeri Saikovski¹, Raivo Teemets²

¹TTÜ elektriainjamite ja jõuelektronika instituudi doktorant,

AS YIT Emico käidukorraldaja, valeri.saikovski@yit.ee

²TTÜ elektriainjamite ja jõuelektronika instituudi dotsent, raivo.teemets@ttu.ee

Annotatsioon

Autorid arendavad edasi konverentsi TEUK XIII artiklit „Innovatiivsed lahendused hoone elektrisüsteemis“ (Saikovski 2011), lähtudes nn aruka võrgu kui tervikliku ja keskkonnasõbraliku elektrivarustusüsteemi põhimõtetest. Käesolev artikkel sisaldab autoritepoolset klassifikatsiooni hoone elektrisüsteemide innovatsioonide kohta. Kirjeldatakse ka võimalusi uuenduste elluviimiseks ning tutvustatakse ühe konkreetse objekti võimalikku arendusplaani.

Märksõnad: arukas võrk, elektrisüsteem, elektromehhaaniline süsteem, innovatsioonide klassifitseerimine, rahavoog, infovoog, energiavoog, käidufunktsioonid, innovatsiooniplaan.

Sissejuhatus

Automaatika uued võimalused ja energia tootmise kaasaegsed tehnoloogiad (sealhulgas taastuvenergia) nõuavad teadusliku nägemuse muutmist elektrisüsteemist ja võrgu arendamisest kõikidel tasanditel, eelkõige süsteemi keskjuhtimises. See oligi põhjuseks, miks 10-12 aastat tagasi loodi aruka võrgu (AV) teooria. Käesolev artikkel kirjeldab, mil viisil saab hoonet aruka võrgu suunas renoveerida.

Tavapärase elektromehhaanilise süsteemi ning aruka võrgu definitsioon ja piirid

Tavapärane süsteem

Tavapärast süsteemi käsitame kui elektromehhanilist süsteemi, milles on üks toiteallikas. On võimalik ka selline toitestruktuur, mis sisaldab reservkaableid või toidet kahe alajaama kaudu. See ei muuda põhimõtteliselt situatsiooni, sest ühes regioonis asuvad alajaamad on seotud sama toiteallikaga järgmisel kõrgepingeastmel (nt 35-110 kV). Probleemid ühes

elektrivarustuse allikas põhjustavad elektrivarustuse tundlikkust ja võib tekkida elektrikatkestus. Sellega on seotud piiratud võimalus reguleerida võimsusvooge, radiaalne topoloogia ja ühesuunaline infovoog. Tehnoloogiline tasand on igapäevases käidus seotud personali professionaalsusega: manuaalne taaskäivitus, kohapealne otsene ülevaatus ja otsustusvõime hädaolukorras. Andurite ja lülitite kogus ning mõnede seadmete kontrollerite olemasolu ei mõjuta põhimõtteliselt olukorda. Kirjeldatud elektrisüsteemis on olulisteks probleemkohtadeks süsteemi varustuskindlus ja võimalik kahjum. Rahalise efektiivsuse hinnang on teisejärguline probleem. Ülaltoodud kirjeldus sarnaneb suuremas osas Rando Pikneri esituga (Pikner 2010).

Nimetame sellise süsteemi tavaliseks elektromehhaaniliseks süsteemiks (TEMS). TEMSi osade arendamine ja käidu muudatused ongi käesoleva uuringu eesmärk.

Igas elektrivarustussüsteemis on primaarahelad. See on nii energiatootja kui ka tarbija põhiline energiavoo kanal. Selle kanali tehnilised lahendused on sarnased nii genereerimise kui ka tarbimise poolel. Need ei ole oluliselt muutunud juba viimase 50-70 aasta jooksul. Ainult võrgu innovatsioonid ei muuda seda kanalit. Ainuvõimalik on siin innovatsioon uutesse tehnoloogilistesse protsessidesse elektrienergia tootmises ja tarbija tehnoloogilistesse seadmetesse. TEMSis on olemas osa, mis tegeleb energiaülekande reguleerimise, juhtimise ja parameetrite edastamisega. Seda ülesannet täidavad praktikas sekundaarahelad. Kus on see piir, et elektrivõrku saaks nimetada arukaks võrguks?

Aruka võrgu lühikirjeldus käesoleva uuringu lõikes

Kirjeldame analoogilisel TEMSiga uusi põhimõtteid järgivat arukat võrku (AV). Võrgu kõik funktsioonid on jagatud kolme gruppi:

1. Energiavoo primaarfunktsioonid: hajutatud tootmine, võrgu topoloogia, tsentraliseeritud koormuse tootjapoolne reguleerimine.
2. Infovoo sekundaarfunktsioonid: pidev jälgimine ehk kaugjälgimine (mõõtmine, kontrollimine), otsuste langetamine, tsentraliseeritud juhtimine tarbija tasandil.

3. Käidufunktsioonid: automaatne või poolautomaatne taaskäivitamine, iseparenemine, toimingud reaalajas.

Kirjeldame aruka võrgu eripärasid ja uusi võimalusi võrreldes TEMSiga (tabel 1).

Joonis 1. Aruka võrgu kirjeldus (Rando Pikneri versioon).

Table 1. Smart-grid description (the Rando Pikner's version).

ARUKAS VÕRK	PLOKK 1 Energiavoog - primaarahelate topoloogia	hajutatud tootmine
		võrgu topoloogia
		tsentraliseeritud koormuse reguleerimine tootja tasandil
	PLOKK 2 Infovoog – sekundaar- ahelate funktsioonid	tsentraliseeritud juhtimine tarbija tasandil
		pidev jälgimine-mõõtmine ja kaugjälgimine
		otsuste langetamine
		tsentraliseeritud juhtimine
	PLOKK 3 Käidufunktsioonid	automaatne või poolautomaatne taaskäivitamine
		iseparenemine
		reaalajastu

Elektrivõrgu arendamise etapid hoone renoveerimisel on järgmised.

1. Uurida kontrolleriite ja teiste lokaalsete juhtimissüsteemide olemasolu ja nende ühendust hoone ülejäänud elektrisüsteemiga.
2. Selgitada välja kaugjuhtimise võimalus ja kontrollahelate seisukord käesoleval momendil.
3. Uuring olemasolevate seadmete kaugjuhtimise kohta ja reguleerimisvõimaluse leidmine, arvestades minimaalsete lisakulutustega.
4. Kõigi seadmete kontroll ja juhtimise analüüs. Otsus iga konkreetse seadme kontrolli-, avarii- ja käidurežiimi kohta.
5. Kogu objekti elektrisüsteemi (ES) täpsustamine ja lõplike parameetrite määramine. Hoone välisvõrguühenduse parameetrite kontroll.

Kirjeldatud võrk ei sisalda otseselt rahavoogu. Oletame, et kõik juhtimisprogrammid sisaldavad lõpptarbijat puudutatavat infot rahavoo kohta otsuste langetamise staadiumis ning energia tootmises. Rohkem tuleb rahavoogudega arvestada objekti arendamise korral. Konkreetse objekti võimalikku innovatsiooniplaani kirjeldatakse edaspidi.

Tavapärase süsteemi arendamine. Parendatud tavavõrgu ja aruka võrgu piirid

TEMSi arendamine aruka võrgu suunas sisaldab mitmeid vaheetappe. Igas etapis tuleb elektrisüsteemi hindamisel lähtuda aruka võrgu kriteeriumitest. Aruka võrguna võib käsitleda sellist võrku, mis sisaldab aruka võrgu põhikriteeriumitele vastavaid osi. Artikkel pakub konkreetseid kriteeriume, et oleks võimalik ka elektrisüsteemi osa defineerida aruka võrguna. Nimetame seda osa lokaalseks arukaks võrguks (LAV).

Arukas võrgus peab tekkima tagasiside võrgu komponentide vahel, et tagada piisav infoedastus võrgu teiste osade juhtimissüsteemidele. Tähtsaks tingimuseks on kontrolleri olemasolu lõpptarbija seadmes, kuid see ei muuda veel võrku arukaks. Peab olema sekundaarahelate nõutav tehnoloogiline ja programmeerimise tasand, et tagada piisav reguleerimine ja tagasiside. Vältimatult on vaja juhtimiskeskust, mis aitaks realiseerida võimalust langetada üht või mitut lõpptarbijat puudutatavat otsust.

Kirjeldatud süsteem on lokaalne arukas võrk. Selle termini kasutamine tähendab, et programmeerimise tasand ja võrgu struktuur tagavad ka käidufunktsioonide täitmise. LAVi eripära on järgmine:

- minimaalne sõltuvus inimeste otsustest, kuna on olemas tehnoloogiline kontseptsioon ja reageerimise põhimõtted;
- kahe-suunaline infovoog;
- reaalajastamine ja iseparenemise võimalus.

Innovatsioonide klassifitseerimine

Tehnoloogilised uuendused võivad tarbija elektrisüsteemi mõjutada alljärgnevalt mainitud viisidel:

- 1) oluliselt väheneb lõpptarbija võimsus,

- 2) muutuvad juhtimisvõimalused,
- 3) suurenevad ohutus ja mugavus,
- 4) ilma tehniliste parameetrite muutuseta tekivad uued käidufunktsioonid või kaasneb mingi muu positiivne mõju (nt töö- või looduskeskkonna paranemine),
- 5) muutuvad mõned genereerimise tehnilised näitajad,
- 6) muutuvad genereerimise mittetehnilised parameetrid, nt lisandub keskkonnasõbralikkus.

Uuendused, mis muudavad hoone elektrisüsteemi arukaks võrguks, oleme jaganud kolme gruppi.

A Lõpptarbijat puudutavad innovatsioonid.

A1 - Võimsust või muid näitajaid muutvad tehnilised uuendused.

A2 - Uuendused juhtimises ja automaatikas.

A3 - Käidufunktsioone parendavad uuendused.

B Genereerimist või võrku puudutavad innovatsioonid.

B1 - Uued tehnoloogilised protsessid, mis on vajalikud genereerimise arendamiseks.

B2 - Uuendused võrgu parameetrite jälgimises, võrgu juhtimises ja andmete edastamises.

B3 - Käidufunktsioone parendavad uuendused.

C Mittetehnilised innovatsioonid.

C1 - Lõpptarbijat puudutavad uuendused, mis muudavad töökeskkonna paremaks ja ohutumaks.

C2 - Uuendused, mis vähendavad energiatootmisega kaasnevat mõju keskkonnale.

A-tüüpi innovatsioonid rakenduvad lõpptarbija energiasüsteemis kas tänu uuele tehnoloogiale (A1) või juhtimisautomaatika kasutamisele (A2). Tarbitava võimsuse vähenemine ei too otseselt kaasa muutust arukaks-mittearukaks, vaid mõjutab ainult primaarahelate parameetreid ja hinna-voogusid. Juhtimise uuendamine arendab võrku LAV suunas, mõjutades

sealhulgas ka käidufunktsioone. Näiteks LED-valgustuse kasutamine ja sellega kaasnev lõpptarbija võimsuse vähenemine on lõpptarbija jaoks tehnoloogiline innovatsioon A1, kuid dimmerdatavate valgustite ja programmeeritavate kontrolleri kasutamine valgustuse juhtimiseks on A2-tüüpi innovatsioon.

B1-tüüpi kuuluvad koostootmisjaamad, jäätmeid kasutavad elektrijaamad, tuulegeneraatorid ja päikesepatareid. Tuleb arvestada, et B-tüüpi kuulub vaid suure võimsusega päikesepatareide kasutamine. B2-tüüpi kuuluv uuendus on selle poolest A2-tüüpi uuendusega sarnane, et see ei muuda võimsusi või tehnoloogilisi protsesse, vaid viib need kaugjälgimise, reageerimise ja otsuste langetamise osas järgmisele tasandile.

B-tüüpi innovatsioonide tulemusel tekib uue põlvkonna hajatootmine. Keerulisema võrguarenduse korral on B2-uuenduste abiga võimalik LAV-kriteeriumit arvestades muuta lõpptarbija arukaks võrguks.

On võimalikud olukorrad, milles LED-valgustus ei mõjuta kuigi oluliselt elektrisüsteemi tehnilisi parameetreid: nt värviline fassaadivalgustus on lihtsalt ilusam või töökeskkond natuke ohutum. See on juba C-tüüpi innovatsioon. Analoogiliselt eelmisega on väiksed elektrituulikud ja päikesepatareid tihti lihtsalt varuenergiaallikad lõpptarbija ja B-tüübi alla ei tohi neid liigitada.

Elektrit on võimalik toota ka vähevõimsate taastuvenergiaallikate abil, mis ei mõjuta oluliselt ei lõpptarbija ega ka elektrisüsteemi. Nad ei ole võrguga pidevas ühenduses ja neid ei saa koos elektrisüsteemiga reguleerida. Sestap pole neil pikemalt põhjust peatuda.

Innovatsioonide realiseerimine

Uut hoonet ehitada või olemasolevat renoveerida on võimalik lihtsate majanduslike kriteeriumide alusel (näiteks üldmaksumus ja tasuvusperiood). Hoone elektrivõrgu arendus võib viia aga uuendusi nõudvate muudatusteni. Võib ka juhtuda, et konkreetse hoone elektrisüsteem ei suuda kasutada arenenud välisvõrgu võimalusi. Seda on võimalik vältida, kui renoveerida

hoone elektrisüsteemi ja arendada välisvõrku sarnaste põhimõtete alusel. Artikli autorite arvates sobiks selleks aruka võrgu põhimõte. Meie uurimistö eesmärgiks on esitada plaan, mille kohaselt iga väikese või suure hoone elektrisüsteeme renoveerides peab samm-sammult liikuma aruka võrgu väljaarendamise suunas.

Püüame pakkuda universaalset TEMSi arendamise plaani LAViks. Tuleb modelleerida TEMS ja saadud mudelit eesmärgi saavutamiseks kohandada. Primaarahelat kirjeldab mudel, mis oli esitatud TEUK XIII konverentsi artiklis (Saikovski 2011). See mudel sisaldab automaatjuhtimissüsteeme kui väikest osa mudelis, kuid uue eesmärgi saavutamiseks tuleb teha olulisi täpsustusi.

Konkreetsed objekti innovatsiooniplaan

Esmalt esitame lühikokkuvõtte eelmises uurimistöös toodud põhimõtetest, kuidas hoone elektrisüsteemi renoveerida.

1. Majanduslikud ja tehnilised parameetrid peavad moodustama üldsüsteemi, mida on mugav koos kasutada ja mis võimaldab erinevaid variante korrektselt võrrelda.
2. Uuringu juhis on uusehitise ja hoone renoveerimise jaoks sarnane. See kehtib ka modelleerimise ja tulemuste esitamise vormi kohta.
3. TEMSi üldmaksumust tuleb arvestada kehtivates hindades (isegi kui on teada varasem ehitusmaksumus), et renoveerimisvariante saaks hinnata korrektsete kriteeriumide alusel.
4. Renoveerimisplaan koostamisel on vaja eelnevalt hinnata ehitustehnoloogiat ja arvestada käidunõuetega.

Järgnevalt kirjeldame hoone elektrisüsteemi üleminekut arukasse võrku.

Hoone TEMSi kuuluvad

- jaotusseade (peajaotuspunkt, hooneosade jaotuspunktid, lõpp-tarbija jaotusseade);
- kütte, veevarustuse, ventilatsiooni ja kanalisatsiooni (KVVK) elektrisüsteem;
- muud üldtarbijad (trepikojad, parklad jne);

- hooneosa elektrisüsteem: valgustussüsteem, hooneosa KVVK, tehnoloogiline osa, olmeseadmed, automaatika ja reguleerimis-seade, arvutid ja muud elektroonilised seadmed.

TEMSi eripära on selles, et automaatika ja reguleerimisseade on hajutatud ja see täidab lokaalseid funktsioone: konkreetse seadme (tööpink, valgustuseosa, põrandaküte) juhtimine, eraldiasetseva ruumi parameetrite kontroll ja juhtimine või eraldi süsteemi (küte, ventilatsioon, tänava-valgustus jne) juhtimine.

Kaasaegses hoones sisaldab KVVK elektrisüsteem kontrollereid ja lokaalset juhtimist, kuid sageli ei moodusta see integreeritud süsteemi. Ühendust teiste elektrisüsteemiosadega esineb harva. Meie uuringust lähtuvalt peab seega esimene samm olema järgmine: **uurida kontrolleriite ja teiste lokaalsete juhtimissüsteemide olemasolu ja nende ühendust hoone ülejäänud elektrisüsteemiga.**

Oluline on teada ka seda, millist seadet on üldse võimalik tehniliselt reguleerida. Tavaliselt seadet ei reguleerita või pole tema võimsuse võimalik muutus oluline. Tihti juhitakse seadet lokaalselt (nt liikumisandur, hämarlüliti, programmikell vms). Sellest tulenevalt on järgmiseks sammuks **selgitada välja kaugjuhtimise võimalus ja need kontrollahelad, kus käesoleval momendil lokaaljuhtimine olemas on.**

Seoses kontrollahelatega on võimalik olukord, et 100% kaugjuhtimine on rahakulu tõttu ebaotstarbekas, kuid olemasolevaid kontrollahelaid täius-tades on võimalik käidu tegevust oluliselt lihtsustada. Seadet on võimalik hoones viia osalisele kaugjuhtimisele, kui paigaldada lisaplokid või kasu-tada sama seadme reguleeritavat varianti.

Reguleerimisfunktsioonide jaoks tuleb paigaldada täiendavad kilbid või lisasektsioon olemasolevasse kilpi. Samuti on vaja paigaldada kilbikomponendid, mis tagavad efektiivse ja mugava juhtimise (releed, kontak-torid, voolutrafod jne). Kirjeldatud sammu võtame kokku alljärgnevalt:

olemasolevate seadmete kaugjuhtimise uuring ja reguleerimisvõimaluste leidmine, minimeerimaks lisakulusid. Kirjeldatud samm võib olla seotud valgustusüsteemiga, ammu paigaldatud KVVK ja tehnoloogiliste seadmetega ning olemasoleva juhtimiskeskuse funktsioonide laiendamise, sealhulgas lisakaabelduse paigaldamisega. Valgustite juhtimiseks piisab tihti sellest, kui asendada tavaseadmed dimmerdatavate seadmetega ja paigaldada lokaalne juhtimissüsteem. Valgustus võib juba olla lokaalselt juhitav mingi hooneosa või valgustusliigi piiril (turva-, tänava-, korusevalgustus, rentniku ruumi valgustus) ja kaugjuhtimise realiseerimiseks piisab lisakaabeldusest ja juhtimiskeskuse paigaldamisest hoonesse.

Pärast kirjeldatu teostamist tuleb analüüsida kogu hoone elektrisüsteemi ja võtta vastu otsus seadmete kohta, mida eelmiste sammude käigus ei muudetud. Mõne seadme tehnoloogiline reguleerimine võib osutada liiga keeruliseks või ebaotstarbekaks. Tingimata peab kõige olulisemate seadmete seisukorda kontrollima, et võimaliku avariilukorra või ebanormaalse talitluse korral saaksime vastava signaali. Kokkuvõtvalt kirjeldame nimetatud sammu selliselt: **kõigi seadmete kontroll ja juhtimise analüüs, otsus iga konkreetse seadme kontrolli, avarii- ja käidutalitluse kohta.**

Viimasena täpsustatakse jaotussüsteemi üldisi omadusi ja määratakse keskseadme parameetrid. See samm on seotud jaotuskeskuse komponentide ja kaabelduse analüüsiga ning käidufunktsioonide eripära arvestamisega. Tuleb otsustada, kas paigaldada ühe hoone tsentraalne juhtimiskeskus või omavahel ühendatud lokaaljuhtimiskeskused. Lokaaljuhtimine võib osutada vajalikuks käidufunktsioonide täitmisel. Aruka lokaalvõrgu puhul on vältimatu hoone elektrivõrgu ühendus välisvõrguga ja probleemideta primaarahelate juhtimine. Viimast etappi kirjeldame selliselt: **kogu objekti elektrisüsteemi täpsustamine ja lõplike parameetrite määramine, hoone välisvõrguühenduse parameetrite kontroll.**

Kirjeldatud renoveerimiseeskiri on samasugune nii olemasolevate hoonete kui ka uusehitiste elektrisüsteemi projektide koostamisel. Iga sammu täitmise korral tuleb kontrollida ka tehniliste uuenduste majanduslikku põhjendatust. Mingil momendil võib see tähendada plaanide korrigeeri-

misest ja kulukatest variandidest loobumist. Ka on võimalik olukord, mil piiratud rahaliste võimaluste puhul tuleb hoone elektrisüsteemi arendada mitmes etapis, jälgides samas, et igas etapis oleks LAV põhimõtte täidetud.

Kokkuvõte

Kõik muudatused hoone energia- ja elektrisüsteemis on otstarbekas teostada aruka võrgu teooria raames. Arukat lokaalset võrku tuleb luua samm-sammult, kooskõlas olemasolevate finantsvõimalustega. Läbiviidavad uuendused on vaja eelnevalt klassifitseerida ja prognoosida nende mõju elektrisüsteemile. Rahavoogude kontroll ja usaldusväärsete ehitusmeetodite kasutamine võimaldab ebaotstarbekate sammude vältimist.

Kasutatud kirjandus

- Pikner, R., 2010. Uue põlvkonna elektrisüsteem ja selle komponendid, Tallinn.
- Saikovski, V., 2011. Innovatiivsed lahendused hoone elektrisüsteemis: struktuuri modelleerimine, lahenduse realiseerimise majanduslikud ja tehnilised aspektid. Lõpliku variandi valiku algoritm. TEUK XIII, Tartu.

RENOVATION OF THE NETWORK ALGORITHM TOWARDS SMART GRID

Valeri Saikovski, Raivo Teemets

New opportunities for automation and advanced technologies in the production of energy (including renewable energy) require a change in the scientific vision, the development of electrical systems and network on all levels, in particular the system of central governance. The same was the reason why smart grid theory was created 10-12 years ago.

This article describes the renovation of the network algorithm in direction smart grid. They also provide the authors with his original vision of the end-user and network innovations classification in generation level and end-consumer level.

PUIDU NIISKUSMÕÕTJATE VÕRDLUS LAIENDATUD MÕÕTEPIIRKONNAS

Valdek Tamme^a, Regino Kask^a, Peeter Muiste^a, Hannes Tamme^b

^aEesti Maaülikool, Kreutzwaldi 5, 51014 Tartu, Eesti

^bTartu Ülikool, Ülikooli 18, 50090 Tartu, Eesti

valdek.tamme@emu.ee, regino.kask@emu.ee,

peeter.muiste@emu.ee, htamme@ut.ee

Annotatsioon

Puidu niiskussisalduse kiireks määramiseks kasutatakse laialdaselt portatiivseid elektrilisi takistus- ja mahtuvus-tüüpi niiskusmõõtjaid. Laiendatud mõõtepiirkond (24% kuni 100% MC kuivkaalu suhtes) on oluline niiskussisalduste vahemik puidu energiasäästliku atmosfäärilise eelkuivatuse ja ka puidu päikesekuivatuse monitooringu seisukohalt. Laiendatud mõõtepiirkonnas ei ole puidu niiskussisalduse (MC - *moisture content*) mõõtmised portatiivsete niiskusmõõtjatega kahjuks enam praktilisteks vajadusteks piisava täpsusega. Laiendatud mõõtepiirkonnas mõõtmisel soovitavad seadmete manuaalid niiskussisalduse täppismääramiseks kombineerida mõõtmisi kuivkaalumeetodiga.

Käesolevas töös võrreldi omavahel viit erinevat puidu niiskusmõõtjat juhtivatelt tootjatelt. Võrreldi nende skaala (kuvari) näitude kokkulangevust vastavate katsekehade jaoks kuivkaalumeetodil määratud absoluutsete ja suhteliste keskmiste niiskussisaldustega. Katsekehad, mõõtmetega 100 x 60 x 60 mm (pikkus x laius x paksus), olid valmistatud viiest erinevast puuliigist (*Pinus sylvestris*, *Picea abies*, *Alnus glutinosa*, *Betula pendula*, *Populus tremula*) ja neid kuivatati kliimakambris võrdsetes tingimustes (32 °C ja 98% RH) soovitud niiskussisalduseni. Kõik puidu niiskussisalduse mõõtmised viidi läbi ruumis, mille temperatuur oli 20 °C. Kokku oli eksperimentis 429 katsekeha.

Iga puuliigi lõikes uuriti erinevate niiskusmõõtjate näitude hajuvust katsekehade kahel erineval keskmisel niiskusetasemel. Hajuvuse mõõtmistulemuste alusel hinnati niiskusmõõtjate ümberkalibreerimise võimalusi laiendatud mõõtepiirkonnas. Iga puuliigi lõikes uuriti ka niiskusmõõtjate näidu ja puidu tegeliku keskmise niiskussisalduse vahelisi seoseid. Katse-

tulemuste alusel leiti valemid, mille abil saab korrigeerida niiskumõõtja näitu ja kuivkaalumisel saadud tegeliku keskmise niiskussisalduse erinevusi. Takistus-tüüpi niiskumõõtja kalibreerimiskõvera analüüsi tulemusena leiti, et laiendatud mõõtepiirkond võiks (niiskumõõtjate ümberkalibreerimise vajadust silmas pidades) olla 24% MC kuni 100% MC.

Märksõnad: puidu kuivatus, puidu niiskumõõtja, kalibreerimine.

Sissejuhatus

Portatiivsed elektrilised puidu niiskumõõtjad jagunevad oma tööprintsibiilt kaheks: alalisvoolul töötavad takistus-tüüpi niiskumõõtjad ja kõrgsageduslikul vahelduvvoolul (sagedustel 2-3 MHz) töötavad mahtuvus-tüüpi niiskumõõtjad. Takistus-tüüpi niiskumõõtjad peavad mõõtmise ajal olema mõõteelektroodide vahendusel puiduga vahetus galvaanilises kontaktis ja otseselt registreeritavaks füüsikaliseks suuruseks on elektroodide vahemiku elektriline takistus. Mahtuvus-tüüpi niiskumõõtjaga mõõtes muutub mõõtja tundliku osa surumisel vastu puidu pinda sisendvooluringis elektrimahtuvus, mis on omakorda seostatav puidu niiskussisaldusega. Otsest galvaanilist kontakti puiduga mahtuvus-tüüpi niiskumõõtjaga mõõtmise käigus ei teki, kõrgsagedusvool levib puidus nn nihkevooluna.

Takistus-tüüpi niiskumõõtjatel on ajalooliselt põhiliseks ja ka kõige täpsemaks mõõtepiirkonnaks peetud puidu absoluutse (kuivkaalu suhtes) niiskuse vahemikku 4%-20% MC ja laiendatud mõõtepiirkonnaks vahemikku 20%-30%. Piirkonda, milles puidu absoluutne niiskus on 30%-100% MC, on aga peamiselt niiskumõõtja näitade suure hajuvuse tõttu peetud mittekalibreeritavaks (Edwards 1974, Rozema 2010). Viimaste uuringute valguses (Tamme jt. 2012) võib suhtumine probleemse piirkonna kalibreeritavusse muutuda.

Mahtuvus-tüüpi niiskumõõtjate traditsiooniline usaldusväärne mõõtepiirkond on 2%-30% MC, kuigi mõõteriista näidik on suuteline kuvama ka kõrgemaid (kuni 40% MC) väärtusi. Puidu niiskussisalduste usaldusväärne mõõtmine vahemikus 24% kuni 100% MC on oluline puidu energiasäästliku atmosfäärilise eelkuivatuse ja ka puidu päikesekuivatuse monitooringu seisukohalt.

Käesoleva artikli eesmärgiks oli võrrelda puidu niiskusemõõtjaid piirkonnas 24%-100% MC ja saada sobivaid korrektsioonivalemeid mõõtjate kalibreerimise täpsustamiseks.

Materjal ja meetodika

Puidu niiskus

Kuivkaalumethod on kõige usaldusväärsem meetod tegeliku keskmise niiskusesisalduse määramiseks, olenemata puuliigist ja algsest niiskusesisaldusest. Kuivkaalumethodiga hinnatakse teiste niiskusesisalduste määramiseks kasutatavate meetodite täpsust, sellepärast nimetatakse kuivkaalumethodit mõnikord ka absoluutseks meetodiks.

Nimetatud meetodil saadud katsekeha kuivkaalu kasutades arvutatakse välja absoluutne ja suhteline niiskusesisaldus. Absoluutset ja suhtelist niiskusesisaldust arvutatakse järgmiste valemitega.

$$W_{\text{abs}} = \frac{m_1 - m_2}{m_2} 100\% \quad (1)$$

$$W_{\text{suht}} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} 100\% \quad (2)$$

- W_{abs} - puidu absoluutne niiskusesisaldus, %
- W_{suht} - puidu suhteline niiskusesisaldus, %
- m_1 - niiske puidu mass
- m_2 - absoluutselt kuiva puidu mass

Valemitest (1) ja (2) on tuletatud hästi tuntud üleminekuvalemid absoluutselt niiskuselt suhtelisele, ja vastupidi:

$$W_{\text{abs}} = \frac{100W_{\text{suht}}}{100 - W_{\text{suht}}} \quad (3)$$

$$W_{\text{suht}} = \frac{100W_{\text{abs}}}{100 + W_{\text{abs}}} \quad (4)$$

Keskliste võrdlemine

Niiskusmõõtjasse programmeeritud kalibreerimise tabeli (kalibreerimiskõvera) ülesandeks on viia vastavusse mõõdetav elektriline suurus (elektritakistus või elektrimahtuvus) konkreetse füüsilise suurusega (s.o puidu tegelik keskmine niiskussisaldus protsentides kuivkaalu suhtes). Praktikas tuleb aga ette olukordi, kus niiskusmõõtja tootjapoolne kalibreerimine (nn algupärane kalibreerimine) ei ole päris täpne või siis ei vasta see päriselt valitud katsetingimustele. Sel juhul vajatakse lisaks algupärasele kalibreerimisele ka statistiliselt usaldusväärset regressioonikõverat, mis seoks puidu niiskusmõõtja skaala näidud puidu tegeliku (kuivkaalumise abil määratud) keskmise niiskussisaldusega. Erandjuhul võib regressioonkõvera asendada ka sobivalt valitud korrektsioonivalemiga. Viimane meetod ei ole nii range, kuid praktikas sama hea kui regressioonikõver.

Materjal

Töös kasutati sanglepast (*Alnus glutinosa*), arukasest (*Betula pendula*), harilikust haavast (*Populus tremula*), harilikust männist (*Pinus sylvestris*) ja harilikust kuusepuidust (*Picea abies*) katsekehasid mõõtmega 60 x 60 x 100 millimeetrit. Harilikust männist (*P. sylvestris*) ja harilikust kuusepuidust (*P. abies*) katsekehad olid jaotatud kaheks: lülipuidust ja maltspuidust katsekehad. Katsekehi, mida uurimuses kasutati, oli kokku 429 ning nendega tehti kokku 10 296 mõõtmist. Igast puuliigist oli valmistatud 61 katsekeha.

Katsekehad saeti toorest puidust, esialgu 60 x 60 mm prussideks ning seejärel 100 mm pikkusteks tükkideks. Need märgistati puuliikidele vastavalt: sanglepast katsekehad LM, harilikust kasest katsekehad KS, harilikust haavast katsekehad HB, hariliku männi maltspuidust katsekehad MA MA ja lülipuidust katsekehad MA LÜ, hariliku kuuse maltspuidust katsekehad KU MA ja lülipuidust katsekehad KU LÜ.

Ekspereiment

Katseid teostati kahel erineval niiskustasemel. Esimene mõõtmine toimus kohe pärast materjali lahtisaagimist - mõõdeti toorest puitu. Teine mõõt-

mine toimus puidu kiudude küllastuspunktist allpool, kui niiskusesisaldus oli alla 30%. Mõõtmisülgavus oli 1/3 katsekeha paksusest, arvestatuna katsekeha pinnast. Mõõtesuund oli puiduki suunaga risti (ja tangensiaal- ses suunas, lühendatult „tang“). Katsekehade temperatuur oli mõõtmiste ajal 20 °C.

Puidu niiskuse mõõtmisel kasutati järgnevaid niiskusemõõtjaid (joonis 1). James Instruments Inc. NDT T-M-170 (kasutati katsetes takistus-tüüpi niiskusemõõtjana) <www.ndtjames.com>
Gann Hydromette HT 85T <www.gann.de>
Brookhuis Micro-Electronics BV FMD 6 <www.brookhuis.com>
Brookhuis Micro-Electronics BV FMW <www.brookhuis.com>
Ahlborn Almemo 2890-9 sensoriga FHA636MF <www.ahlborn.com>



Joonis 1. Katsekehade niiskussisalduse mõõtmiseks kasutatud niiskusemõõtjad. (Foto: Tamme, 2012)
Figure 1. Moisture meters used in the experiment for measuring the moisture content in specimens. (Photo: Tamme, 2012)

Tulemused ja arutelu

Keskmete niiskusesisalduste võrdlus ja erinevuste korrigeerimine

Erinevate mõõtmismeetoditega saadud keskmete niiskusesisalduste võrdlus on toodud tabelites 1 ja 2 (Karu 2011).

Tabel 1. Toore puidu mõõtmisel kasutatud niiskusemõõtjate keskmete näitude erinevused „ δ , % MC“ võrdluses tegelike keskmete absoluutse ja suhtelise niiskusesisaldusega (vt. valemeid 1 ja 2). Tangentsiaalsihilise mõõtesuuna tähiseks on tabelites „tang“.

Table 1. Difference „ δ , % MC” in the average readings of moisture meters used for undried wood in comparison with actual average absolute and relative moisture contents (see formulae 1 and 2). The symbol for tangential direction in tables is „tang”.

			(δ) NDT T-M-170		(δ) GANN HYDROMETTE HT 85T		(δ) BROOKHUIS FMD 6	
	W_{abs}	W_{suht}	Abs. - tang.	Suht. - tang.	Abs. - tang* 	Suht. - tang** 	Abs. - tang	Suht. - tang.
Sanglepp	105,7	51,2	-74,0	-19,5	-69,8	-15,3	-73,1	-18,6
Kask	85,2	46,0	-51,2	-12,0	-42,8	-3,6	-51,4	-12,2
Haab	107,0	51,6	-69,5	-14,1	-59,6	-4,2	-74,4	-19,0
Männi maltspuut	77,8	43,0	-42,0	-7,2	-36,1	-1,3	-45,7	-10,9
Männi lülipuit	34,2	25,5	-6,2	2,5	-6,3	2,5	-7,8	0,9
Kuuse maltspuut	48,2	31,8	-8,1	8,3	-13,7	2,6	-13,0	3,4
Kuuse lülipuit	31,3	23,9	-0,5	6,9	-5,2	2,3	-3,1	4,4

*) Korrektsioonivalemitega (tabel 3) täielikult korrigeeritavad erinevused.

**) Korrektsioonivalemitega (tabel 3) ja valemiga (4) täielikult korrigeeritavad erinevused.

Table 2. Puhta tegehtel absoluuse niiskuse tasemetel 24% kuni 31,6% kasutatud niiskusemõõjate keskmise näitade erinevused „ δ , % MC“ võrdluses tegelike absoluuse ja suhtelise niiskuseisaldusega.

Table 2. Difference „ δ , % MC“ in the average readings of moisture meters used for actual absolute wood moisture contents of 24% to 31,6% in comparison with actual absolute and relative moisture contents.

	W _{abs}		W _{suht}		Abs. tang.		Suht. tang.		Abs. tang.		Suht. tang.		Abs. tang.		Suht. tang.		Abs. tang.		Suht. tang.	
			(δ)	NDT T-M-170	(δ)	GANN HYDRO-METTE HT 85T	(δ)	BROOK-HUIS FMD 6	(δ)	AHLBORN ALMEMO 2890-9	(δ)	BROOK-HUIS FMW								
LM	31,6	24,0	-6,0	1,6	-9,7	-2,1	-8,4	-0,9	-13,2	-5,6	14,0	21,6								
KS	30,3	23,2	-3,8	3,3	-5,5	1,6	-5,1	2,0	-9,6	-2,5	-3,3	3,8								
HB	29,9	22,9	-4,6	2,3	-5,6	1,3	-6,3	0,6	-8,7	-1,7	-0,6	6,3								
MA-MA	24,0	19,3	-3,2	1,5	-3,7	1,0	-2,4	2,3	-6,7	-2,0	-4,3	0,3								
MA-LÜ	27,0	21,2	-6,8	-1,1	-4,7	1,1	-4,1	1,7	-8,6	-2,8	-6,8	-1,0								
KU-MA	23,8	19,2	0,8	5,4	-3,3	1,3	0,6	5,2	-6,4	-1,8	-0,3	4,3								
KU-LÜ	27,1	21,3	-3,2	2,6	-4,8	1,0	-1,2	4,6	-8,6	-2,8	-4,0	1,7								

Tabel 3. Korrektsioonivalemid erinevatele puuliikidele niiskusemõõtja Gann Hydromette HT 85T skaala lugemite teisendamiseks tegelikuks absoluutseks niiskussisalduseks (autor V. Tamme). Valemite rakenduspiirkond on abs. niiskuste vahemikus ~24%-100%, temperatuuril 20 °C, mõõtesügavusel 1/3 materjali paksusest (materjali paksus ~60mm). Valemitega täielikult korrigeeritavad erinevused (δ) on tabelites 1 ja 2 esile tõstetud tärnidega (*) (**) ja paksu kirjaga.

Table 3. Correction formulae for converting the display readings of the moisture meter Gann Hydromette HT 85T to the actual (absolute) moisture content for different tree species (author V. Tamme). The formulae apply to the absolute wood moisture content range of ~24%-100% and the temperature of 20 °C at the electrode measuring depth of 1/3 of wood thickness (wood thickness ~60 mm).

Sanglepp (LM)	$\log(\text{niiskus abs., \%}) = 0,0372 * (\text{Gann näit, \%}) + 0,678$
Kask (KS)	$\log(\text{niiskus abs., \%}) = 0,026 * (\text{Gann näit, \%}) + 0,845$
Haab (HB)	$\log(\text{niiskus abs., \%}) = 0,024 * (\text{Gann näit, \%}) + 0,894$
Mänd, maltspuit (MA-MA)	$\log(\text{niiskus abs., \%}) = 0,0238 * (\text{Gann näit, \%}) + 0,897$
Mänd, lülipuit MA-LÜ	$\log(\text{niiskus abs., \%}) = 0,0186 * (\text{Gann näit, \%}) + 1,019$
Kuusk, maltspuit KU-MA	$\log(\text{niiskus abs., \%}) = 0,0219 * (\text{Gann näit, \%}) + 0,928$
Kuusk, lülipuit KU-LÜ	$\log(\text{niiskus abs., \%}) = 0,0164 * (\text{Gann näit, \%}) + 1,066$

Arutelu

Korrektsioonivalemite (vt tabel 3) tuletamise ideoloogia põhineb töö (Tamme jt 2012) tulemustel. Korrektsioonivalemitega täielikult korrigeeritavad erinevused tabelites 1 ja 2 on tähistatud paksukirjaliselt ja täрни(de)ga *) ja **). Viimasel juhul (**)) vajatakse korrigeerimiseks lisaks ka üleminekuvalemit (4). Korrektsioonivalemite usaldatavust kontrolliti detailsema regressioonianalüüsiga, mille põhjal on mudelid tervikuna ja regressiooni parameetrid eraldi võetuna statistiliselt olulised ($p - \text{väärtus} < 0,05$). Võib ka oletada, et männi maltspuidu ja kuuse maltspuidu korrektsioonivalemid annavad parema kooskõla juhul, kui saematerjal sisaldab võrdsetes osades nii maltspuitu kui ka lülipuitu. Praktikas tavaliselt see nii ongi. Korrektsioonivalemite tuletamine teiste takistus-tüüpi niiskusemõõtjate (FMD-6, NDT James ja Ahlborn FHA636MF) jaoks eeldaks eelnevalt nende kalibreerimiskõvera analüüsi. Mahtvus- tüüpi niiskus-

mõõtja Brookhuis FMW näitude hajuvus osutus Rozema kriteeriumide järgi (Rozema 2010) kahjuks liiga suureks (vt Karu 2011). Selle seadme näol on siiski tegemist pigem niiskuse indikaatoriga kui mõõteriistaga. Katsetes ei kasutatud niiskusemõõtja NDT James mahtuvuslikku režiimi ebapiisava mõõtetäpsuse (+/-5%) ja vähese mõõtesügavuse (ca 1–2 mm) tõttu.

Kokkuvõte

Selles artiklis toodud korrektsioonivalemid aitavad leevendada kitsas-kohta praktikas, mis on seotud märja puidu niiskusesisalduse piisavalt realistliku ja kiire määramisega laialt kasutatavate mõõteriistade abil – näiteks palkide atmosfäärilisel eelkuivatamisel, küttepuude kuivatamisel konvektsioonkuivatis või päikesekuivatis jne. Siiski oleks mõõteseadmete kohapealse kontrolli huvides vajalik praktikas tehtavaid puidu niiskusesisalduse mõõtmisi kombineerida kuivkaalumise meetodiga.

Kasutatud kirjandus

- Edwards, N. C. 1974. Procedure for the determination of species correction data for electrical resistance type moisture metres. - CSIRO Div. For. Prod. (Unpublished divisional report), 10 p.
- Karu, M. 2011. Niiskusemõõtjate mõõtetäpsus erinevatel puidu niiskustasemetel. Bakalaureusetöö metsatööstuse erialal. Tartu.
- Rozema, P. 2010. Do's and don'ts in respect to moisture measurement. - The Future of Quality Control for Wood&Wood Products. The Final Conference of COST Action E 53. 4 – 7th May 2010, Edinburgh.
- Tamme, V., Muiste, P., Kask, R., Padari, A., Tamme, H. 2012. The research of electrode effects on wood drying above fiber saturation point. - 12th International IUFRO Wood Drying Conference „Challenges and Opportunities Related to Tropical Lumber Drying“. July 30 to August 03, 2012. Belém, Para, Brazil.

Tänuavaldus:

Käesolev uurimus on valminud SA Keskkonnauuringute Keskuse (KIK) projekti Nr. 906 "Energiasäästu ja keskkonnanahoiu võimaluste uurimine puidu konvektiivkuivatamisel" raames.

COMPARISON OF WOOD MOISTURE METERS IN EXTENDED MEASURING RANGE

Valdek Tamme, Regino Kask, Peeter Muiste, Hannes Tamme

For fast detection of wood moisture content resistance-type and capacitance-type hand-held electrical moisture meters are widely used. An extended measuring range (24% to 100% MC of dry weight) is a significant moisture content range in terms of monitoring both the energy efficient atmospheric pre-drying and solar drying of wood. However, in an extended measuring range, moisture content measurements with hand-held wood moisture meters no longer provide sufficient accuracy for practical needs. For precise determination of moisture content, moisture meter manuals recommend combining measurements with the oven dry method in an extended measuring range.

This research compared five different wood moisture meters by leading manufacturers. The scale (or display) readings were compared with the absolute and relative average moisture contents determined for the relevant specimens with the oven dry method.

The specimens made of five different tree species (*Pinus sylvestris*, *Picea abies*, *Alnus glutinosa*, *Betula bendula*, *Populus tremula*) with the dimensions of 100 x 60 x 60 mm (length x width x thickness) were used. They were dried in a climatic test chamber under the same conditions (32 °C and 98% RH) until the desired moisture content was achieved. All wood moisture content measurements were conducted at a room temperature of 20 °C. For the experiments in total 429 specimens were used. For every tree species variance in the readings of different moisture meters was examined at two different average moisture content levels of the specimens. Based on the variance of measurement results the moisture meters were evaluated in terms of their recalibration options in the extended measuring range.

Relationships between the readings of the moisture meters and the actual average wood moisture content were also studied for every tree species.

Based on the test results correction formulae for correcting the differences between the moisture meter reading and the actual average moisture content obtained with the oven dry method were found.

As a result of the calibration curve analysis of the resistance-type moisture meter it was determined that the extended measuring range could (keeping in mind the need for recalibration of the moisture meters) cover 24% MC to 100% MC.

EELTÖÖTLUSMEETODI MÕJU BIOETANOOLI SAAGISELE

Marti Tutt, Timo Kikas, Jüri Olt
Tehnikainstituut, Eesti Maaülikool, Kreutzwaldi 56, Tartu
e-post: marti.tutt@emu.ee

Annotatsioon

Töö eesmärgiks oli rakenduse leidmine üleliigsele põhule ning põllumajandusjätmetele. Selleks uuriti erinevate eeltötlusmeetodite mõju tselluloosi lagunemisele ja bioetanooli toodangule, et selle põhjal leida sobivaim eeltötlusmeetod bioetanooli tootmiseks nisupõhust. Materjali eeltötlusel kasutati temperatuuri 130 °C vähendamaks energiakulusid, kuna lisaks kemikaalidele ja ensüümidele moodustavad teise põlvkonna bioetanooli tootmisel just energiakulud peamise osa kütuse omahinnast. Proove töödeldi lahjas väävelhappe, soolhappe, lämmastikhappe või kaaliumhüdrosiidi lahuses. Tselluloosi lagundamisel suhkruteks saadi parim tulemus, 316,7 g·kg⁻¹ biomassi kohta, kasutades lämmastikhappe eeltötlust. Sellest võib järeldada, et lämmastikhape eemaldab hästi taimerakkudest hemitselluloosi ning jätab tselluloosi kiud ensüümidele kergesti ligipääsetavaks. Madalaim glükoosi saagis, 221,3 g·kg⁻¹ saadi HCl lahust kasutades. Suurim etanooli saagis, 104,3 g·kg⁻¹ saadi kasutades eeltötlust KOH lahuses.

Märksõnad: biomass, nisupõhk, glükoos, etanool, ensüümid.

Sissejuhatus

Biokütuseid jagatakse esimese, teise ja kolmanda põlvkonna kütuseks peamiselt kasutatava tooraine ja tootmistehnoloogia järgi. Teise põlvkonna biokütuseid toodetakse lignotselluloosest biomassist, nagu rohhtaimed, puit ning taimsed- ja põllumajandusjätmed (Nigam ja Singh, 2011). Maailmas kõige enam toodetud teise põlvkonna biokütuseks on bioetanool (GRFA, 2011). Lignotselluloosest biomassist toodetud biokütuste peamiseks eelisteks on, et need ei konkureeri otseselt toiduainetööstusega ning on võimalik ära kasutada kogu taime maapealne osa. Teise põlvkonna biokütuste miinusteks on väga energiamahukas tootmisprotsess ning suuri investeeringuid nõudvad seadmed (Stevens jt., 2004).

Nisupõhk valiti erinevate bioetanooli tootmiseks sobivate toorainete hulgas välja peamiselt seetõttu, et nisu on enim kasvatatav teravili Euroopas. Näiteks aastal 2004 toodeti Euroopas ligikaudu 132 miljonit tonni nisupõhku, millest vaid väike osa kasutati ära loomasöödana või allapanuks. Suurem osa nisupõhust ei leia põllumajanduses või tööstuses rakendust ning kvalifitseerub jäätmeteks (Sarkar jt., 2012). Suurendades nisupõhu kasutust bioetanooli toomiseks, oleks võimalik vähendada jäätmeteks mineva biomassi kogust ning tõsta taastuvenergia osakaalu Euroopa transpordisektoris.

Selleks, et toota lignotselluloosest biomassist bioetanooli, on vaja materjali eelnevalt töödelda. Tselluloosi kiud on taimedes kaetud ligniini ja hemitselluloosi kihiga, mille tõttu on tselluloos ilma eelneva töötlemiseta, mis lõhuks seda struktuuri, bakteritele ja ensüümidele väga raskesti ligipääsetav. Eeltöötlusega saavutatakse ligniini struktuuri lõhkumine, hemitselluloosi eemaldamine ning tselluloosi kristalse struktuuri osaline lagunemine, mis muudab tselluloosi osakesed ensüümidele kergesti ligipääsetavaks (Yang jt., 2009). Biomassi eeltöötluks kasutatakse mitmeid erinevaid meetodeid, näiteks AFEX (*Ammonia fiber expansion*) või auruga lõhkamine, mis annavad väga kõrgeid saagiseid, ligikaudu 70–90% tselluloosist lagundatakse suhkruteks. Mõlema meetodi miinuseks on protsessi toimumiseks vajalikud äärmuslikud tingimused. AFEXi puhul temperatuur 70–200 °C ja rõhk 5–30 bar, auruga lõhkamise korral temperatuur 180–240 °C ning rõhk 10–40 bar (Dien jt., 2006; Yang jt., 2009).

Töö eesmärgiks oli leida rakendust üleliigsele põhule ning põllumajandusjäätmetele. Selleks uuriti erinevate eeltöötlusmeetodite mõju tselluloosi lagunemisele ja bioetanooli toodangule nisupõhust. Lisaks uuriti materjali veega loputamise mõju proovide glükoosi ja etanooli saagisele.

Biomass

Kuna nisupõhk on kõrge tselluloosisisaldusega ja ei konkureeri otseselt toiduainetööstusega, siis on ta sobiv materjal bioetanooli tootmiseks. Nisupõhu proovid on koristatud Eesti Maaülikooli katsepõllult 2011. aasta

augustis. Proove analüüsiti Eesti Maaülikooli taimebiokeemia laboris, et määrata kindlaks nende tuha-, tselluloosi-, hemitselluloosi- ning ligniinisaldus, tulemused on toodud tabelis 1. Proove analüüsiti vastavalt AOAC 973.1 (Association of Official Analytical Chemists) standardmeetodile. Materjal oli eelnevalt purustatud 1–3 mm suurusega tükkideks ning kuivatatud, niiskusesisaldus alla 10%.

Tabel 1. Biomassi proovide tuha-, tselluloosi-, hemitselluloosi- ja ligniinisaldus
Table 1. Content of ash, hemicellulose, cellulose and lignin in biomass samples

Proovi nimetus	Tuhk %	Hemitselluloos %	Tselluloos %	Ligniini %
Nisupõhk	3,57	31,01	46,47	7,94

Materjalid ja meetodika

Antud töös kasutati eeltötluseks lahjas lämmastikhappe, väävelhappe, soolhappe või KOH lahuses kuumutamist koos sellele järgnenud hüdroolüüsiga ensüümide toimetel. See meetod on lihtne, kasutab odavaid kemikaale ning vajab protsessi toimumiseks mõõdukaid tingimusi. Mii-nuseks on väiksem glükoosi saagis ning kõrvalproduktide teke, mis võivad hiljem takistada fermentatsiooni.

Proovide suuruseks oli 100 g eelnevalt peenestatud ja kuivatatud biomassi (niiskusesisaldus <10%), millele lisati 1000 ml 1%-list happe või aluse lahust (massiprotsendi järgi). Seejärel kuumutati proove $t = 60$ minutit temperatuuril $T = 130$ °C ning rõhul kuni $p = 3$ bar. pH reguleeriti vahemikku $pH = 4,5-5,5$, sest kasutatud ensüümid inaktiveeruvad, kui $pH < 4$ või $pH > 6$. Eeltötlusele järgnes ensüümide toimetel taimse materjali hüdroolüüs. Selleks kasutati Danisco US Inc. poolt toodetud ensüümide segu Accellerase 1500, mida lisati kontsentratsiooniga 0,3 ml/g biomassi kohta. Hüdroolüüsi protsess toimus $t = 24$ tundi pideval segamisel 120 ± 15 p/min ning temperatuuril $T = 50$ °C, mille käigus enamus biomassist lahustus ning eelnev paks mass (tahke osa 10%lisest lahusest), muutus pruuniks vedelikuks. Peale hüdroolüüsi lõppu määrati proovides glükoosi sisaldust reflektomeetriliselt, kasutades Reflectoquant glükoosi & fruktoosi määramise testi ning reflektomeetrit RQflex 10. Seejärel lisati proovidele 2,5 g kuivpärm *Saccharomyces cerevisiae*. Fermentatsioon

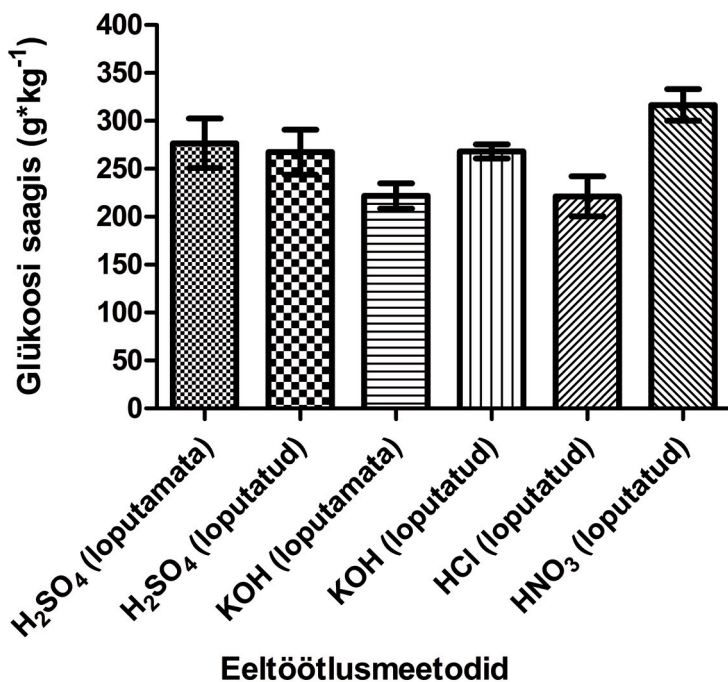
toimus toatemperatuuril 21 ± 2 °C seitsme ööpäeva jooksul hapnikuvaestes tingimustes 1000 ml klaaskolbides, mis olid pealt suletud kääritustoruga. Käärimise lõppemisel mõõdeti lahuse alkoholi kontsentratsiooni reflektomeetriselt Reflectoquant-alkoholi testiga.

Kõikide proovide korral tehti vähemalt kolm paralleelkatset. Joonistel on kasutatud keskmistatud tulemusi, mõõteviga on näidatud vertikaalsete joontega. Andmeid töödeldi programmidega Microsoft Excel ja Graph-Pad Prism 5.

Tulemused

Töös uuriti erinevate eeltötlusmeetodite mõju nisupõhus leiduva tselluloosi lagunemisele ning bioetanooli toodangule. Tselluloosi lagundamisel suhkruteks saadi parim tulemus, $316,7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ biomassi kohta, kasutades lämmastikhappega eeltötlust, tulemused joonisel 1. Sellest võib järelda, et lämmastikhape eemaldab hästi taimerakkudest hemitselluloosi ning jätab tselluloosi kiud ensüümidele kergesti ligipääsetavaks. Madalaim glükoosi saagis, $221,3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, saadi HCl lahust kasutades. Kuigi mõlemal juhul kasutati võrdset kogust sama protsentuaalse koostisega happelahust, siis lämmastikhappe kasutamisel saadud 30% võrra suurem glükoosi saagis tõestab, et soolhape on liiga nõrk ega sobi biomassi eeltöötlemiseks.

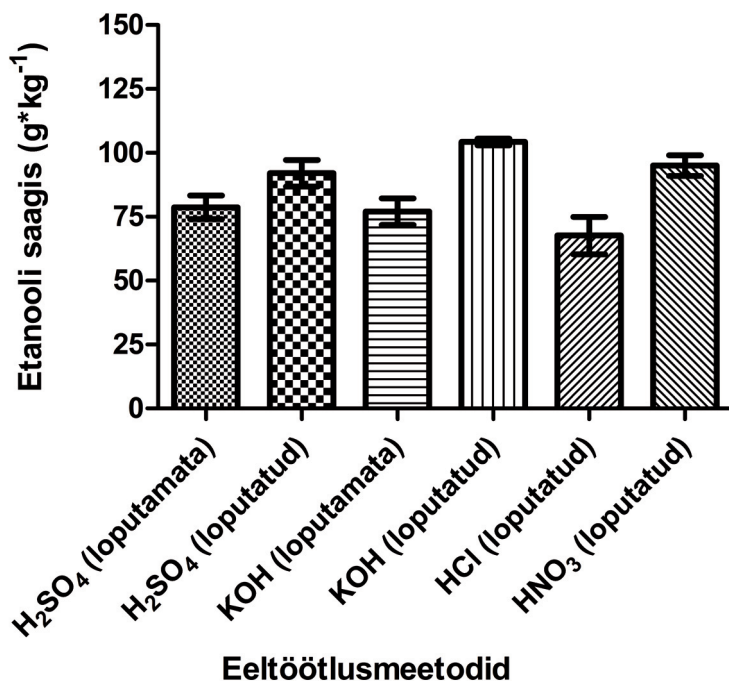
Nisuproovides, mida töödeldi väävelhappe või KOH lahusega, kasutati kahte lähenemist. Pooltel juhtudel loputati proovi tahket osa peale eeltötlust destilleeritud veega, ülejäänud proovidel tahke osa veega loputamist ei toimunud. Selgus, et väävelhappelise eeltötluse korral destilleeritud veega loputamine saadavat suhkru kontsentratsiooni ei muuda, erinevused jäävad mõõtevee piiridesse, kuid suurendab tunduvalt hiljem käärimisel saadavat etanooli kogust, tulemused joonistel 1 ja 2. Määratud glükoosi saagised on vastavalt $276,7$ ja $267,3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ning etanooli saagised $78,7$ ja $92,0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ biomassi kohta. See on seletatav asjaoluga, et happelise eeltötluse käigus tekib lahusesse kõrvalprodukte, mis hiljem takistavad fermentatsiooni, kui nende kontsentratsiooni proovis ei vähendata materjali korduva loputamisega enne hüdrolüüsi algust.



Joonis 1. Erinevate eeltötlusmeetodite mõju glükoosi saagisele
 Figure 1. The influence of different pretreatment methods on the glucose yield from wheat straw samples

Aluselise eeltötluse puhul proovi tahke osa loputamine suurendas nii suhkrute saagist kui ka etanooli saagist. Lahustunud ligniin on tuntud inhibiitor ensüümide aktiivsusele (Berlin jt., 2006), kuid proovi vedela ja tahke osa eraldamise ning materjali loputamiseega saab suurema osa lahustunud ligniinist eemaldada. Suurim etanooli saagis, 104,3 g·kg⁻¹ saadigi kasutades KOH lahusega eeltötlust koos proovi tahke osa loputamiseega (joonis 2). Üllataval kombel saadi lämmastikhappega töödeldud proovide käiritamisel etanooli 95,0 g·kg⁻¹, kuigi selle eeltötlusega saavutati kõige suurem glükoosi saagis. See on seletatav asjaoluga, et aluselisel eeltötlusel tekkivad kõrvalproduktid takistavad tselluloosi lagunemist suhkruteks, kuid ei mõjuta fermentatsiooni protsessi. Samas kui happelisel eeltötlusel tekkivad kõrvalproduktid (furfuraal) inhibeerivad

eelkõige fermentatsiooni ning neid ei õnnestu täielikult eemaldada isegi tahke osa korduval veega loputamisel, mis seetõttu vähendab etanooli saagist (Helle jt., 2003).



Joonis 2. Erinevate eeltötlusmeetodite mõju etanooli saagisele nisupõhust
Figure 2. The influence of different pretreatment methods on the ethanol yield from wheat straw samples

Suurim hüdrolyüsi efektiivsus oli lämmastikhappe eeltötlusel 68,1% ning madalaim soolhappe ja loputamata KOH eeltötluse korral, vastavalt 47,6 ja 47,7% (tabel 2). Suurim fermentatsiooni efektiivsus oli KOH eeltötlusel koos proovi loputamisega 76,3%. Vastavalt kirjanduse andmetele põhjustab happeline eeltötlus kõrgetel temperatuuridel erinevate orgaaniliste ühendite ning kõrvalproduktide teket, näiteks furfuraal, mis inhibeerivad pärmide kasvu ning takistavad fermentatsiooni toimumist (Helle jt., 2003; Yang jt., 2009).

Tabel 2. Hüdrolüüsi ja fermentatsiooni efektiivsused erinevate eeltötlusmeetodite kasutamisel

Table 2. Hydrolysis and fermentation efficiencies of different pretreatment methods

Eeltötlusmeetod	Glükoosi saagis (g · kg ⁻¹)	Etanooli saagis (g · kg ⁻¹)	Hüdrolüüsi efektiivsus %	Fermentatsiooni efektiivsus %
H ₂ SO ₄ (loputamata)	276,7	78,7	59,5	56,1
H ₂ SO ₄ (loputatud)	267,3	92,0	57,5	68,0
KOH (loputamata)	221,7	77,0	47,7	68,3
KOH (loputatud)	268,2	104,3	57,7	76,3
HCl (loputatud)	221,3	67,7	47,6	59,9
HNO ₃ (loputatud)	316,7	95,0	68,1	59,2

Kokkuvõtte

Nisu kasvatatakse Eestis laialdaselt ning kuna nisupõhk on kõrge tselluloosi sisaldusega ja ei konkureeri otseselt toiduainetööstusega, siis on see sobiv materjal bioetanooli tootmiseks. Töö eesmärgiks oli leida rakendust üleliigsele põhule ning põllumajandusjäätmetele. Selleks uuriti erinevate eeltötlusmeetodite mõju tselluloosi lagunemisele ja bioetanooli tootangule. Lisaks uuriti materjali veega loputamise mõju proovide glükoosi ja etanooli saagisele.

Sõltuvalt valitud eeltötlusmeetodist oli tulemuste osas suuri erinevusi. Tselluloosi lagundamisel suhkruteks saadi kõrgeim tulemus, 316,7 g · kg⁻¹ biomassi kohta, kasutades lämmastikhappesega eeltötlust, madalaim glükoosi saagis, 221,3 g · kg⁻¹ saadi HCl lahuse kasutamisel. Aluselise eeltötluse puhul proovi tahke osa loputamine suurendas nii suhkrute kui ka etanooli saagist. Suurim etanooli saagis, 104,3 g · kg⁻¹ saadigi kasutades KOH lahusega eeltötlust koos proovi tahke osa loputamisega. Üllataval kombel saadi lämmastikhappesega töödeldud proovide kääritamisel etanooli 95,0 g · kg⁻¹, kuigi selle eeltötlusega saavutati kõige suurem glükoosi saagis. See on seletatav asjaoluga, et aluselisel eeltötlusel tekkivad kõrvalproduktid takistavad tselluloosi lagunemist suhkruteks, kuid ei mõjuta

fermentatsiooni protsessi. Samas kui happelisel eeltöötlusel tekkivad kõrvalproduktid (furfuraal) inhibeerivad eelkõige fermentatsiooni.

Saadud tulemustele tuginedes võib väita, et nisupõhust bioetanooli tootmiseks sobib uuritud eeltöötlusmeetoditest kõige paremini eeltöötlus KOH lahusega mõõdukatel temperatuuridel.

Kasutatud kirjandus

- Berlin, A., Balakshin, M., Gilkes, N., Kadla, J., Maximenko, V., Kubo, S., Saddler, J., Inhibition of cellulase, xylanase and glucosidase activities by softwood lignin preparations, *Journal of Biotechnology*, 2006, 198–209.
- Dien, B., Jung, H., Vogel, K., Casler, M., Lamb, J., Iten, L., Mitchell, R., Sarath, G., Chemical composition and response to dilute-acid pretreatment and enzymatic saccharification of alfaalfa, reed canarygrass and switchgrass, *Biomass Bioenergy*, 2006, 30, 880–891.
- Global Renewable Fuels Alliance, World Ethanol Fuel Production data from F.O.Licht, http://www.globalrfa.org/pr_021111.php, 11.02.2011.
- Helle, S., Cameron, D., Lam, J., White, B., Duff, S., 2003. Effect of inhibitory compounds found in biomass hydrolysates on growth and xylose fermentation by a genetically engineered strain of *S. cerevisiae*, *Enzyme and Microbial Technology*, 3, 786–792.
- Nigam, P.S., Singh, A., 2011. Production of liquid biofuels from renewable resources, *Progress in Energy and Combustion Science*, 37, 52–68.
- Sarkar, N., Ghosh, S.K., Bannerjee, S., Aikat, K., Bioethanol production from agricultural wastes: An overview, *Renewable Energy*, 2012, 37, 19–27.
- Stevens, D.J., Worgetten, M., Saddler, J., Biofuels for transportation: an examination of policy and technical issues. IEA Bioenergy Task 39, Liquid Biofuels Final Report 2001–2003, Canada, 2004.
- Yang, Y., Sharma – Shivappa, R., Burns, J.C., Cheng, J.J., 2009. Dilute Acid Pretreatment of Oven-dried Switchgrass Germplasms for Bioethanol Production, *Energy & Fuels*, 23, 3759v3766.

INFLUENCE OF PRETREATMENT METHOD ON BIOETHANOL YIELD

Marti Tutt, Timo Kikas, Jüri Olt

The aim of this research was to investigate the different pretreatment methods of wheat straw to find the most efficient method for bioethanol production using moderate pretreatment conditions. The influence of rinsing the solid phase of wheat straw samples after the pretreatment phase on the sugar and ethanol conversion yields was also investigated.

Samples pretreated with KOH (rinsed) gave the best ethanol yield of $104.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ regardless of the glucose yields inferior to those of nitric acid and unrinsed sulfuric acid. The wheat straw samples pretreated with HNO_3 gave the highest glucose yield of $316.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, but an ethanol yield of $95.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ which was less than expected. This can be explained by the formation of byproducts during acid pretreatment process that later inhibit the fermentation process. Since byproducts that inhibit fermentation are not formed during alkaline pretreatment phase, the fermentation is much more effective and more sugars are used for ethanol production rather than for the formation of organic acids and other unwanted byproducts.

The samples pretreated with nitric acid (rinsed) had the best hydrolysis efficiency of 68.1%, but poor fermentation efficiency of 59.2%. Best fermentation efficiency of 76.3% was achieved by samples pretreated with KOH (rinsed). The downside of alkaline pretreatment method is its lower hydrolysis efficiency compared to sulfuric and nitric acid pretreatment methods.

In the light of these results we can conclude that from the point of ethanol production process under mild pretreatment conditions, the most effective method is KOH pretreatment process combined with rinsing the samples before the hydrolysis.

SOOJUSLIKE HELIOKOLLEKTORITE VALIKUST

Teolan Tomson
TTÜ materjaliteaduse instituut, Tallinn, Ehitajate tee 5, 19086
Teolan.Tomson@ttu.ee

Annotatsioon

Artiklis esitatakse lamedate heliokollektorite ja vaakumtorukollektorite simuleeritud võrdlus suvesesoonil Eestis. Vaakumtorukollektoritel on väike tehniline eelis nii tootlikkuse kui ka selle ühtluse osas.

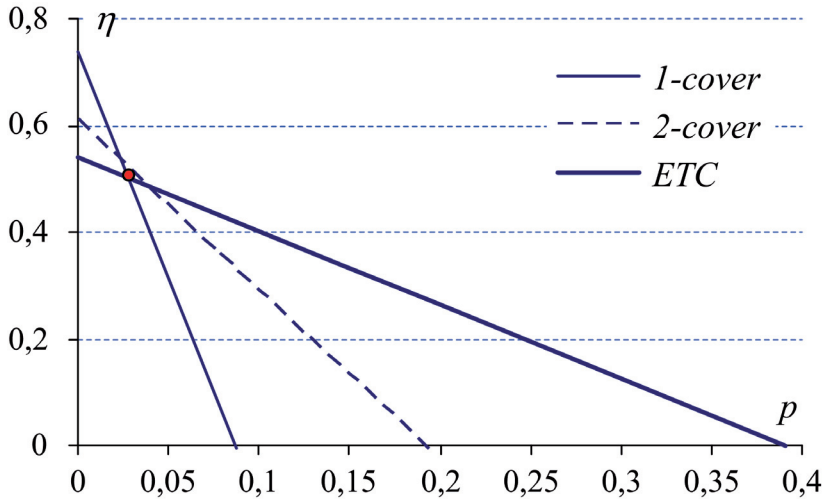
Märksõnad: lame heliokollektor; vaakumtorukollektor; tootlikkus.

Sisu

Eestis on mõne viimase aasta jooksul päikeseenergia (=helioenergia) kasutamine oluliselt suurenenud. Võrreldes sajandi algusega (Tomson 2000) on moodi tulnud vaakumtorudega (*ETC - Evacuated Tubular Collectors*) heliokollektorid. Puudub aga võrdlus, kas ja kui võrd need ennast traditsiooniliste lamedate heliokollektoritega (*FPC – Flat Plate Collector*) võrreldes õigustavad. Allpool on tehtud nende lihtsustatud tehniline võrdlus, ilma investeerimishindu vaatlemata. Et mitte reklaamida konkreetseid tooteid, kasutan arvutustes üldistatud karakteristikuid – joonis 1 ja tabel 1 (Martin ja Goswamy 2005). Lihtsustatud arvutisimulatsioon kasutab Tõraveres 1955–2000 mõõdetud keskmisi kiirgusandmeid (Russak ja Kallis 2003) ja Harkus aastail 2006–2011 mõõdetud välisõhutamperatuure (EMHI koduleht).

*Tabel 1. Simuleerimiseks kasutatud kollektorite parameetrid.
Table 1. Data of solar collectors used in the simulation.*

Heliokollektori ehitus	Soojus- kandja	Erivooluhulk m_p , $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$	Algmuundus- tegur h_0	Soojuskaod a_1 , $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$
1 klaaskate, must värv	vesi	0,02	0,74	8,2
2 klaaskatet, must kroom	vesi	0,02	0,61	3,2
Vaakumtorukollektor (ETC)	vesi	0,02	0,54	1,4



Joonis 1. Tüüpiliste heliokollektorite tunnusjooned.
Figure 1. Efficiency curves of typical solar-thermal collectors.

Lineaarse approssimatsiooni juures sõltub soojusliku heliokollektori muundustegur η mitmest parameetrist:

$$\eta = \eta_0 - a_1 \times p, \quad (1)$$

milles omakorda üldistatud parameeter on

$$p = (T_i + \Delta T / 2 - T_a) / I_C.$$

See sõltub omakorda soojuskandja (vee) sisendtemperatuurist T_i (°C), temperatuuritõusust piki kollektorit ΔT (°K), välistemperatuurist T_a (°C) ja päikese kiirustihedusest kollektoril I_C (Wm⁻²). See seos on üldtuntud. Heliokollektori energiabilanss avaldub päikeselt siseneva ja soojuskandjaga edastatud ja salvestatava võimsuse kaudu:

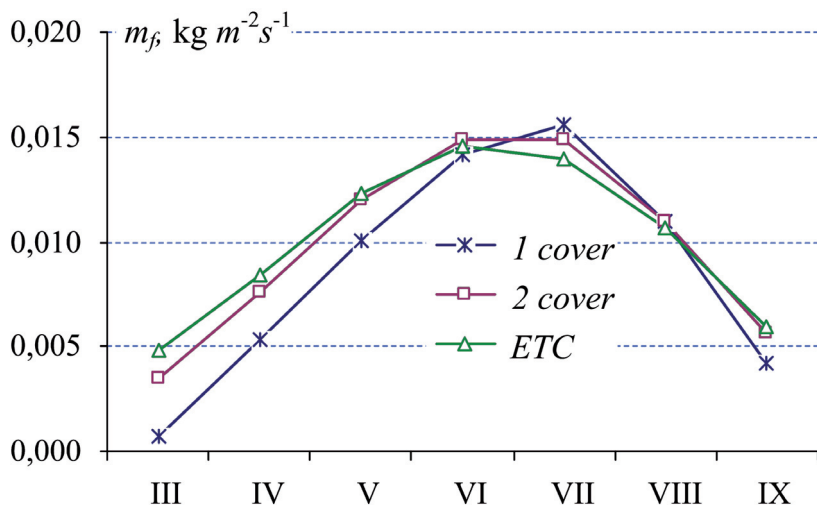
$$I_C \times A_C \times \eta = \Delta T \times C_p \times m_f \quad (2)$$

Siin on C_p soojuskandja erisoojus, vee puhul $C_p = 0,0082 \text{ kWm}^{-2}\text{K}^{-1}$, ja m_f on erivooluhulk kgs⁻¹ m⁻².

A_c on absorberi pind m^2 . Lähtudes (1) ja (2) saab avaldada absorberi pinda ühe ruutmeetri kohta tema tootlikkuse:

$$m_f = \frac{I_c \eta_0 - a_1 \cdot (T_i - T_a)}{\Delta T \cdot C_p} - \frac{a_1}{2 \cdot C_p}, \quad (3)$$

mis on kollektorite objektiivse võrdluse aluseks. Simulatsiooni tulem on esitatud joonisel 2.



Joonis 2. Ühe m^2 absorberipinna simuleeritud tootlikkus (suve)kuude lõikes.
Figure 2. Simulated productivity of 1 m^2 for different collectors during summer months.

Arvutisimulatsioon on tehtud ühe-läbivoolu-režiimi (ingl k *single-pass*, Tomson 1999) silmas pidades: soojuskandja soojendatakse vooluhulka reguleerides vahetult soovitud lõpptemperatuurini (arvutustes on kasutatud $T_i = 5^\circ C$ ja $\Delta T = 45^\circ K$). Lihtsustusi on mitmeid: pole arvestatud kollektori asendit, kollektorile langeva kiirguse nurka, kollektori läbipaistvuse ja absorptsiooniteguri nurgasõltuvust. Kõik need lihtsustused toimivad kõigile kollektoritele samaväärselt¹. Seega muudavad tehtud lihtsustused

¹ Kollektori läbipaistvuse ja absorptsiooniteguri nurgasõltuvus on FPC ja ETC jaoks pisut erinev.

mõnevõrra tootlikkuse arvväärtusi, kuid ei muuda otsitud tootlikkuse suhet, mis on analüüsi eesmärk. Märtsikuu all on mõeldud tema viimast dekaadi.

Kokkuvõte

Jooniselt 2 tuleneb ka analüüsi lõppjärelendus: Eesti oludes on vaakumtorukollektoril suvesesooni lõikes tootlikkuse eelis nii toodetud vee massi kui ka ühtlase tootlikkuse mõttes. See eelis oleks ilmselt veel rohkem rõhutatud, kui analüüs haaraks ka varakevadise aja. Tootlikkus muutub sesooni vältel siiski palju, ligikaudu kolm korda.

Kasutatud kirjandus

EMHI koduleht: www.emhi.ee

Martin, L., Goswami, Y. D. 2005. Solar Energy Pocket Reference. ISES.

Russak, V., Kallis A. 2003. Eesti kiirguskliima teatmik, EMHI.

Tomson, T. Comparison of Single-Pass and Multi-Pass Solar Hot Water Systems. - Proc. Estonian Acad. Sci. Engin., 1999, 5, 1, 87–89.

Tomson, T. 2000. Helioenergeetika, Humare.

COMPARISON OF DIFFERENT THERMAL SOLAR COLLECTORS

Teolan Tomson

In a short paper results of the simulation have shown (Fig. 2) for the usage of 1-cover, 2-cover flat plate (FPC) and evacuated tubular solar collectors (ETC). Typical efficiency data from the handbook and typical Estonian climate data have been used to simulate the productivity m_f of a 1 m² collector surface in the single-pass regime. Input temperature $T_i = 5$ °C and a constant temperature increment of 45 °K have been considered. ETC shows some advances in the productivity and its uniformity during the summer season (without consideration of economical parameters).

PÕLLUMAJANDUSETTEVÕTETES BIOGAASI TOOTMISE VÕIMALUSED SÕNNIKUST

Argo Normak^a, Allan Kaasik^b

^a Eesti Maaülikooli põllumajandus- ja keskkonnainstituut

^b Eesti Maaülikooli veterinaarmeditsiini ja loomakasvatuse instituut
Kreutzwaldi 5, 51014, Tartu; e-mail: argo.normak@emu.ee

Annotatsioon

Eesti põllumajandusettevõtetel on võimalik toota taastuvenergiat, kui rakendada biogaasi tootmise tehnoloogiaid sõnniku, rohtse biomassi ja muude bioloogiliselt lagunevate tootmisülejääkide käitlemisel. Loomapidamisettevõtetel on võimalus siduda biogaasi tootmine olemasoleva sõnnikukäitlemise süsteemiga. Antud töös on vaatluse all suurfarmid, mille loomade arv ületab keskkonnakompleksloa künnise. Suurfarmides on võimalik sõnnikust toota 36-81 miljonit kuupmeetrit biometaani, millest ligikaudu 70% on veisefarmide sõnnikust, 20% seasõnnikust ja 10% lindlate tahesõnnikust. Sõnniku anaeroobsel kääritamisel saadavast biogaasist oleks võimalik toota transpordisektori jaoks ligikaudu 50 ktoe biometaani aastas.

Märksõnad: biogaas, biometaan, bioenergia, anaeroobne kääritamine.

Sissejuhatus

Põllumajandus on viimastel aastatel kiiresti arenenud ja Eesti põllumajandusettevõtted peavad hakkama saama keerulistes konkurentsitingimustes, mis eeldab pidevat arendustööd oma ettevõtetes. Loomakasvatajatele on üheks uueks teemaks sõnnikust taastuvenergia tootmine. Käesolevas artiklis vaatleme Eesti sõnnikumajanduse hetkeseisu ja uute tehnoloogiate rakendamise võimalusi sõnnikumajanduse arendamiseks ja taastuvenergia tootmiseks. Töö on valminud projekti Baltic Manure raames (www.balticmanure.eu/).

Sõnnikust energia tootmiseks on biogaasi tehnoloogia hetkel kõige perspektiivikum, sest sobib hästi vedelsõnniku käitlemise ahelasse. Ettevõtjad on taastuvenergia tootmisest huvitatud, kuid investeeringute tegemise suhtes ollakse ettevaatlikud. Eestis on hetkel vaid kaks põllumajandus-

likku biogaasijaama: Saaremaal Jööris ja Järvamaal Aravetel. Sarnaste biogaasijaamade rajamist on Keskkonnainvesteeringute Keskuse (KIK) taastuenergia meetme toel alustatud veel Vinnis, Oisus ja Ilmatsalus (www.kik.ee). Kuid nende jaamade rajamisel ollakse toetuste kasutamiseks ettenähtud tähtaegadest kinnipidamisega hädas. Seejuures tuleb märkida, et vajalike tehnoloogiliste uuenduste juurutamine on Eesti ettevõtetele jõukohane, pigem on probleem maamajanduse ja taastuenergeetika arenduseks mõeldud meetmete toimimises.

Biogaasi tootmise aspektid

Maamajanduse seisukohalt on väga oluline, et biogaasijaama rajamine taastuenergia tootmiseks annab võimaluse arendada farmide sõnnikmajandus kinniseks, haisuvabaks süsteemiks, millel on veel mitmeid positiivseid majanduslikke külgi:

- töökohad maapiirkonnas;
- ettevõtluse mitmekesistamine;
- energeetilise sõltuvuse vähendamine;
- uued võimalused orgaaniliste väetussainete kasutuses.

Viimastel aastatel on Eestis tehtud mitmeid biogaasi tootmisvõimaluste analüüse, osa neist on ka avalikult kättesaadavad, näiteks Maaelu Edendamise Sihtasutuse ja Euroopa Liidu fondide poolt finantseeritud uuringud (Rossow jt 2008, OÜ Seleton 2008, ERKAS Valduse OÜ 2011, Oja 2011a, Menert jt 2011, Jahilo 2011). Uuringute kokkuvõtted on üldjuhul finantsmajanduslikus plaanis pessimistlikud, aga ettevõtluse arenduse, maapiirkondade tööhõive, ressursside parema väärimise, keskkonnanõuet, sotsiaalrajanduse jne seisukohalt positiivse hinnanguga. Kokkuvõtlikult saame öelda, et biogaasi tootmine on sobivaks lahenduseks sõnnikust, biomassist, reoveemudast ja bioloogiliselt lagunevatest jäätmetest taastuenergia tootmisel.

Arvestades põllumajanduse, reoveepuhastuse ja jäätmekäitluse erisusi, toimub neist valdkondadest pärit materjalide anaeroobne käärimine tavaliselt üksteisest eraldi. Põhiliseks põhjuseks on reoveemuda ja bioloogiliselt lagunevate jäätmete töötlemisel tekkiva sette kasutuse piirangud.



Joonis 1. Vaade Aravete biogaasijaamale.

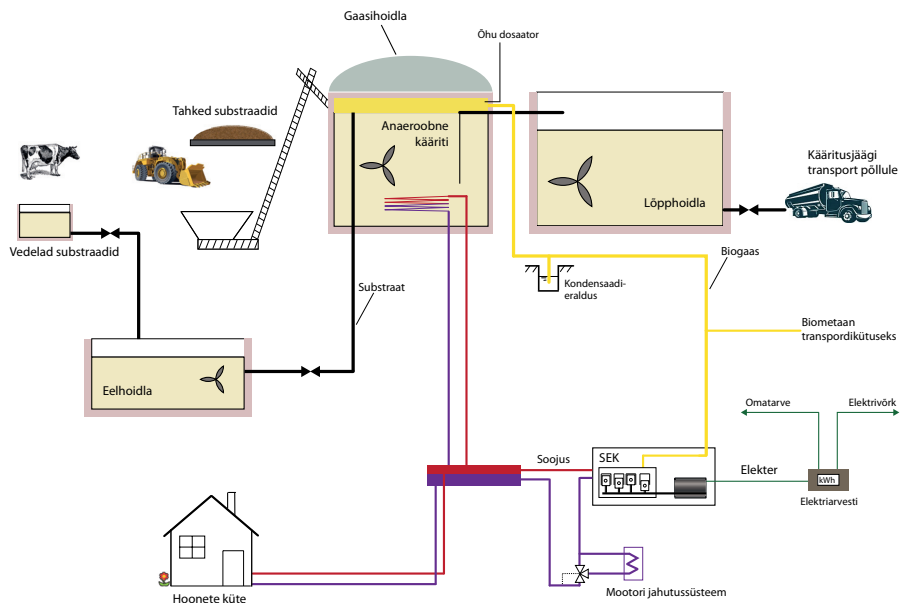
Figure 1. Biogas plant in Aravete.

Kui vaadata tehnoloogilisi võimalusi lihtsustatult, siis biogaasijaamad saab jagada kahte rühma: jäätmete teket piiravad jaamad ja jäätmekäitlusjaamad. Esimesse gruppi kuuluvad jaamad, milles substraatidena kasutatakse sõnnikut, rohtset biomassi ning põllumajanduse ja tööstuse kõrvalsaadusi. Teise grupi jaamades töödeldakse reoveemuda, eraldi kogutud biolagunevaid jäätmeid, tööstuste reovett jne. Seega on biogaasi tootmise valdkonna arendamisega võimalik oluliselt vähendada biolagunevate jäätmete teket ja teisalt ka jäätmete mahtu, tootes sellest biogaasi.

Biogaasi tehnoloogia

Biogaasi tootmiseks kasutatakse anaeroobse kääritamise (mikrobioloogiline lagunemine hapnikuvabas keskkonnas) tehnoloogiat. Lisatavate biolagunevate materjalide e substraatide anaeroobsel kääritamisel tekib segu erinevatest gaasidest, mis koosneb põhiliselt metaanist (CH_4 , 50–75 mahuprotsenti) ja süsihappegaasist (CO_2 , 25–45 mahuprotsenti). Lisaks on biogaasis veeauru ning väiksemates kogustes väävelvesinikku, lämmastikku, hapnikku ja vesinikku. Biogaasis sisalduvaks väärtuslikuks ühendiks on metaan (kütteväärtus $10 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{Nm}^3$), mida kasutatakse energeetikas ja transpordikütusena. (Biogaasi tootmine ja kasutamine 2009)

Põllumajandusliku biogaasijaama põhimõtteskeem on toodud joonisel 2, põhiseadmeks on kääriti (nimetatud ka reaktoriks). Selle juurde kuuluvad substraadi lisamise, segamise, mahutite kütmise ja biogaasi kasutamise seadmed. Kääriti juures on tavapärastelt ka substraadi eelhoidla, gaasi-



Joonis 2. Biogaasijaama põhimõtteskeem vedelsõnniku ja biomassi anaeroobseks kääritamiseks.

Figure 2. General scheme of biogas plant for anaerobic digestion of slurry and biomass.

hoidla ning kääritusjäät lõpphoidla. Kääritusjäät lõpphoidlana saab tavaliselt kasutada ka varem rajatud vedelsõnniku hoidlaid. Tekkivat biogaasi kasutatakse soojuste ja elektri koostootmiseks või transpordikütuseks. Toodev elektrienergia müüakse elektrivõrku, saadav soojusteenergia kasutatakse kohapeal biogaasijaama omatarbeks ja hoonete kütmiseks. Kääritusjäät kasutatakse väetusainena põldudel.

Biogaasi potentsiaal sõnnikukäitluses

Vaadates sõnnikut kui biogaasi tootmiseks sobivat põhisubstraati, on suurim biogaasi tootmise potentsiaal veise-, sea- ja linnufarmides. Statistikaameti andmete järgi peeti 2010. aastal Eestis ligi 241 000 veist, üle 388 000 sea ning ligi 2 miljonit kana ja broilerit. Andmed on toodud tabelis 1.

Table 1. Põllumajandusloomade arv Eestis 2010. a (Statistikaamet 2010).
Table 1. Number of farm animals in Estonia in 2010.

Loomaliik	Loomi, tk	
	kokku	suurfarmides *
Veised	241 025	147 719
Sead	388 502	354 551
Broilerid	1 042 220	1 040 593
Kanad	856 415	760 649
Lambad	87 140	-
Hobused	6 737	-
Kitsed	3 669	-

* Arvesse võetud: ≥ 300 veist, ≥ 2000 siga, juriidiliste isikute lindlad.

Oleme välja toonud ka lammaste, hobuste ja kitsede arvu, aga nende loomade sõnnikut me antud töös biometaanii tootmise üldmahu leidmisel arvesse ei võtnud. Hobusesõnnik on kuiv ning sisaldab suures koguses allapanu (saepuru), mistõttu energia tootmiseks see tavaliselt põletatakse. Lammaste ja kitsede sügavallapanuga lautadest toimub sõnniku väljaveedu kevadel ja seetõttu ei ole seda substraadina vajalikul ajal saada (aga sobiva logistika korral võib lisa-substraadina kasutusele võtta).

Sõnniku koguste kohta Eestis ülevaatlikku statistikat ei ole, sõnniku liigikaudsed kogused loomaliikide kaupa on leitavad arvutuslikult. Samas on täpselt teadmata tahe- ja vedelsõnnikutehnoloogiate kasutuse proportsioon ning karjatamisel maha jääva sõnniku kogus, mida ei ole eraldi vaja käidelda. Antud teemat on detailselt käsitlenud Tamm ja Vettik (2011), kes korraldasid eraldi küsitluse suuremate (keskkonnakompleksloa kohuselased) sea- ja veisekasvatustevõtete hulgas, et täpsustada vedel- ja tahesõnniku koguseid. Nad leidsid, et vedelsõnniku tehnoloogiate rakendamine on Eesti veise- ja seafarmides valdav, vastavalt 61% ja 92%. Arvutused on tehtud 2009. aasta statistika põhjal. Kuna viimaste aastate lõikes ei ole muudatused loomade arvus olnud suured, siis kasutame sea- ja veisesõnniku biogaasi potentsiaali arvutamisel nende poolt leitud sõnnikuliikide koguseid.

Lindlates tekkiva tahesõnniku koguse oleme arvanud lindude arvu ja määruise „Looma- ja linnukasvatusest välisõhku eralduvate saasteainete heitkoguste määramismeetodid“ lisas esitatud andmete põhjal. Kanalate puhul on arvestatud 100 linnu kohta 4,5 t aastas, broilerite puhul 1000 linnu kohta 3,7 t 42-päevases tootmistsükliis, vastavalt keskkonnaministri 05.12.2008. a. määruses nr 48 toodud keskmistele sõnnikukogustele.

Kuna biogaasitoodang ja gaasi metaaniprotsent biogaasijaama antava substraadi tonni kohta kõigub suurtes piirides, siis projekti Baltic Manure partnerriikide andmebaaside põhjal oleme arvestanud miinimum- ja maksimumtasemed metaanitoodangu hindamiseks. Tulemused on esitatud tabelis 2.

Kokku on suurfarmides võimalik sõnnikust toota 36-81 miljonit kuupmeetrit biometaanit, millest umbes 70% on veisesõnnikust, 20% seasõnnikust ja 10% lindlate tahesõnnikust. Saadava biometaanit kütteväärtus on 10 kW·h kuupmeetri kohta, seega on aastase biometaanit toodangu energiasaldus 360-807 GW·h. Varem avaldatud töödes on leitud sõnnikute metaanipotentsiaaliks ca 70 miljonit m³ aastas (Vares jt 2007, Oja 2011b).

Tabel 2. Biogaasi ja taastuvenergia tootmise potentsiaal suurfarmide sõnnikust aasta lõikes.

Table 2. Potential of biogas and renewable energy of manures annually.

Sõnnikuliik	Kogus*, tuh t	Metaanit took, Nm ³ /t		Biometaanit toodang**, miljon m ³		Energiasaldus, GW·h	
		Min.	Maks.	Min.	Maks.	Min.	Maks.
Veised, vedels.	1036	10	20	10,36	20,72	103,60	207,20
Veised, tahes.	654	24	55	15,70	35,97	156,96	359,70
Sead, vedels.	464	12	24	5,57	11,14	55,68	111,36
Sead, tahes.	39	33	39	1,29	1,52	12,87	15,21
Linnud, tahes.	73	42	156	3,07	11,39	30,66	113,88
Kokku	2266	-	-	35,99	80,74	359,77	807,35

* Veise- ja seasõnniku kogused on allikatest Tamm ja Vettik (2011), linnusõnnik arvatud vastavalt keskmistele väärtustele keskkonnaministri määruses nr 48.

** Biometaanit kogus on arvatud normaalkuupmeetrites, standardtingimustel 1 atm, 0 °C.

Põllumajandusettevõtetes toodetud biogaasi kasutamiseks on erinevaid võimalusi: gaasikatla kütuseks, soojus- ja elektrienergia koostootmiseks, puhastamine biometaaniks ja selle suunamine gaasitrassi või kohapealseesse tanklasse. Biogaasi kasutamist katlakütusena ning soojus- ja elektrienergia koostootmiseks on Eestis rakendatud, kuid puhastamine biometaaniks ja kasutamine transpordisektoriks on uus väljakutse (Energiatehnoloogia programm 2012).

„Eesti taastuvenergia tegevuskava aastani 2020“ põhjal on Eestil eesmärk asendada 10% kasutatavast bensiinist ja diiselmootorist biokütustega, aastane biokütuste vajadus on 92 ktoe (tuhat tonni õli ekvivalenti, 1 ktoe = 11,63 GW·h). Suurfarmide sõnnikust teoreetiliselt saadava 81 miljoni kuupmeetri biometaani energiasisaldus on 72 ktoe. Biogaasijaamad kuluavad umbes kolmandiku energiast omatarbeks, transpordisektorisse saaks teoreetiliselt suunata ligikaudu 50 ktoe biometaani.

Kui sõnnikule lisada näiteks poollooduslike rohumaade heina, hooldusniidetavatelt aladelt silo ja toiduaietööstuse kõrvalsaadusi, võiks põllumajanduslike biogaasijaamade biometaani toodang ulatuda üle 300 miljoni kuupmeetri aastas (Vares jt 2007, Oja 2011b). Saadav biokütuse hulk oleks siis ligikaudu 266 ktoe. Toodetava biometaaniga oleks võimalik katta taastuvenergia tegevuskava eesmärk biokütuste osas ning varustada tarbijaid ka elektri- ja soojusenergiaga.

Kokkuvõte

Biogaasitehnoloogia rakendamine Eesti põllumajandusettevõtetes annaks võimaluse toota biokütust ja taastuvenergiat kohalikust ressursist, mis on hetkel paljuski kasutamata.

Biogaasijaamade rajamine suurfarmide juurde looks uuel tasemel sõnnikukäitlussüsteemi, mis oleks kinnine ja võimaldaks toota sõnnikust biokütust ligikaudu 50 ktoe aastas.

Lisasubstraatide kasutamise korral saaks biogaasist toodetud biometaaniga aastaks 2020 katta Eesti taastuenergia tegevuskava eesmärgi biokütuste osas.

Tänuavaldus

Töö on valminud projekti Baltic Manure raames - Baltic Forum for Innovative Technologies for Sustainable Manure Management (Läänemere maade uuenduslike tehnoloogiate foorum sõnniku jätkusuutlikuks käitlemiseks). See on Läänemere piirkonna programm, projekti kaasrahastab Euroopa Liit.

Kasutatud kirjandus

- Biogaasi tootmine ja kasutamine, käsiraamat. Eesti Põllumajandustootjate Keskliit, Tartu, 2009, 157 lk. [<http://www.emu.ee/393683>] 23.08.2012.
- ERKAS Valduse OÜ. 2011. Biogaasitehase rajamine Tartu linnaliinitranspordi kütuse tootmiseks. Projekt BalticBiogasBus. [<http://www.tartu.ee/data/Biogaasijaama%20rajamine%20Tartusse%20TTA.pdf>] 23.08.2012.
- Jahilo, S. 2011. Biogaas rohtsest biomassist ja sõnnikust - tõhusaima energiategnoloogia otsing. Keskkonnatehnika, 6, 33 – 36.
- Looma- ja linnukasvatusest välisõhku eralduvate saasteainete heitkoguste määramismeetodid. Keskkonnaministri 05.12.2008.a. määrus nr 48.
- Menert, A., Kallaste, T., Laur, A., Vaalu, T. 2011. Tehnoloogilised võimalused biogaasi tootmiseks Eestis. Keskkonnatehnika, 6, 28 - 32.
- Metaankütuste kasutamine Eesti transpordis: ettepanekud valdkonna arendamiseks. EAS Energiategnoloogia programm 2012. [[http://tek.emu.ee/userfiles/taastuenergia_ keskus/Kasulikud%20Materjalid/](http://tek.emu.ee/userfiles/taastuenergia_keskus/Kasulikud%20Materjalid/)] 30.09.2012.
- Oja, A. 2011a. Särevere Biogaasi Energiaühistu (SäBE) loomise eelteostatavuse uuringu aruanne. Kliima ja Energiaagentuur. [[http://www.monusminek.ee/ documents/ KENA-Särevere-aruanne.pdf](http://www.monusminek.ee/documents/KENA-Särevere-aruanne.pdf)] 23.08.2012.

- Oja, A. 2011b. Eesti biogaasisektori ülevaade: hetkeseis ja arenguvajadused. Tartu Ülikool, SPIN. [www.lote.ut.ee/geo/Teadus/SPIN] 23.08.2012.
- OÜ Seleton. 2008. Bioenergia tootmise teostatavuse analüüs. Soone Farm. Maaelu Edendamise Sihtasutus. [<http://www.bioenergybaltic.ee/?id=1306>] 30.09.2012.
- Rosow, N., Böhm, S., Vilu, R., Hamkens, C., Pitk, P., Vili, A., Haviko, M. 2008. Torma Põllumajandusosaühingu biogaasijaama projekti teostatavusuuring. Maaelu Edendamise Sihtasutus. [<http://www.bioenergybaltic.ee/?id=1306>] 30.09.2012.
- Statistikaamet 2010. [<http://www.stat.ee/põllumajandus>] 23.08.2012.
- Taastuenergiaallikate laialdasem kasutamine energia tootmiseks. [<http://www.kik.ee/et/kik/rahastusallikad/euroopa-liidu-toetused/2007-2013/taastuenergeetika>] 30.09.2012.
- Tamm, K., Vettik, R. 2011. Sõnniku liigiline jaotus Eestis ja selle toitainete rahaline väärtus. *Agronoomia* 2010/2011, 231 - 236.
- Vares, V., Kask, Ü., Kask, L., Link, S., Lomunov, S., Sihtmäe, M., Menert, A. 2007. Biomassi tehnoloogiauuritud ja tehnoloogiate rakendamine Eestis, alateema 3: biogaasi tootmise potentsiaal - sobivad tehnoloogilised lahendused, võimsused, asukohad, võrgu loomise eeldused. Maaelu Edendamise Sihtasutus, 59-79. [<http://www.bioenergybaltic.ee/?id=1306>] 30.09.2012.

POSSIBILITIES TO PRODUCE BIOGAS FROM MANURE IN AGRICULTURE COMPANIES

Argo Normak, Allan Kaasik

Agriculture companies have options to produce renewable energy from biogas, if biogas technologies are used for bioconversion of manure, herbal biomass and residues of food production. Farmers could integrate biogas production into existing manure management. Bigger farms with high number of animals, who are watched under Integrated Pollution Prevention control, are analysed in this study. In these farms 36-81 million cubic meters of methane could be produced from manures, what is divided approximately 70%, 20% and 10% between cow manure, pig manure and poultry manure, respectively. We can conclude that anaerobic digestion of manures give possibilities to produce about 50 ktoe biomethane as transport fuel from biogas in a year.

BIOMETAAN TRANSPORDIKÜTUSENA JA SURUGAASIBALLOONIDE KASUTAMINE SÕIDUKIS

Pärtel Niitaru

Tallinna Tehnikakõrgkool

Annotatsioon

Biometaan on kõrge kütteväärtusega taastuv energiaallikas. Biogaasi puhastamisel saadav biometaan koosneb vähemalt 95% ulatuses metaanist (CH_4). Oma omadustest lähtuvalt on biometaani võimalik kasutada survestatuna (CBG) või veeldatuna (LBG) juba olemasolevates maagaasitanklates ning -sõidukites. Biometaani kasutamine sõidukites pole kõigjal veel nii levinud kui maagaasi kasutamine, aga huvi selle suunas kasvab, sest biometaan on taastuv energiaallikas. Artiklis tutvustatakse biometaani tootmismeetodeid ja võrreldakse eri tüüpi surugaasiballoonide omadusi. Surugaasiballoon on üks kalleim ja ruumi nõudvaim koostisosa surugaasisõidukis (NGV).

Märksõnad: biogaas, surugaas, transpordikütused, biogaasi töötlemistehnoloogiad

Sissejuhatus

Biometaani toodetakse biogaasist. Biogaas on anaeroobse käärimise teel saadud gaasiline kütus, mis lisaks metaanile ja süsihappegaasile (CO_2) sisaldab vett, vesiniksulfiidi (H_2S), lämmastikku, hapnikku, ammoniaaki, siloksaane ja peeneid osakesi (Persson jt 2006). Biogaasi toodetakse peamiselt biogaasijaamades, veepuhastusjaamades ning prügilates. Biometaani saamiseks tuleb biogaas puhastada. Biogaasi puhastamistehnoloogia ning -meetodid sõltuvad suures osas biogaasi tootmisel kasutatavatest substraatidest; prügilagaasi puhul prügila suurusest ning sinna ladestatud jäätmetest. Prügilagaas sisaldab ka rohkem lisandeid kui metaankääritis toodetav biogaas.

Peale biogaasi puhastamist ning töötlemist biometaaniks, kas siis CBG-või LBG-olekus, on tulemuseks maagaasiga väga sarnane gaas. See tähendab, et tehnikat, mida kasutatakse maagaasiga, on võimalik kasutada ka biometaaniga.

Surugaasisõidukite ja nende tanklate arv kasvab iga aastaga. Suureneva nõudlusega maagaasi kõrval on võimalik kasutada sõidukikütusena biometaan. Oluliselt edendab Euroopas biometaan kasutusele võtmist Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiiv 2009/28/EÜ, milles kehtestatakse üldine raamistik taastuvatest energiaallikatest toodetava energia kasutamise kohta. (Reumerman ja Vos 2009)

Eestis praegu biometaan veel ei toodeta. Samas seisab Eesti küllaltki tõsise probleemi ees, kuidas täita aastaks 2020 seatud eesmärki: saavutada taastuvenergia osakaaluks veonduses kasutatavate kütuste osas 2,7%. Taastuvatest allikatest toodetud autokütuste aastane tarbimismaht peaks siis olema 92 ktoe (3912 TJ). Aastal 2009 oli biokütuste turuosa kõigest 0,6% ehk 1 ktoe (26 TJ) (Lahtvee 2011).

Ohutuse seisukohalt on surugaasiga sõitvate sõidukite puhul kõige olulisem ning kulukam kütuse mahutamise sõidukisse. Tagamaks NGV-dele piisavat sõiduraadiust ja saavutamaks vajalikku kütuse energiatiheduse astet, peab surugaas olema survestatud rõhule 200–250 baari. Süsteem peab töötama tõhusalt temperatuuridel -40...+85 °C. Samuti peab süsteem vabastama sõiduki süttimise korral ohutult gaasi surugaasiballoonidest (Lawday ja Myers).

Biometaan või maagaasi mahutamiseks kasutatakse sõidukites surugaasiballoone. Suuremates sõidukites, mis läbivad tihti pikki vahemaid, on mõistlik kasutada LBG-d või veeldatud maagaasi (LNG), sest need on suurema energiatihedusega kui CBG või surumaagaas (CNG). LBG või LNG hoiustatakse krüogeenmahutis, mis tähendab, et see mahutab metaankütust madalal rõhul väga külmadel temperatuuridel (vedelas olekus). Balloonide kui NGV-de ühe olulisema komponendi uurimiseks keskendub artikkel tootjate poolt pakutavatele eri tüüpi surugaasiballoonidele ning nende omadustele.

Biogaasi töötlemistehnoloogiad

CO₂ on peale metaani üks peamisi biogaasi komponente. Eraldades biogaasi töötlemisel biogaasist CO₂, saavutab biogaas maagaasiga võrreldava

energiasisalduse (Petersson ja Wellinger 2009). Süsihappegaasi vähendamiseks on mitu meetodit. Enim levinud tehnoloogiad biogaasi puhastamiseks on vahelduva rõhu all adsorbeerimine (PSA – ingl k *pressure swing adsorption*), veega pesemine skraberis, kemikaaliga pesemine, orgaaniliste vedelikega pesemine skraberis ning membraansepareerimine. Rohkem on hakatud kasutusele võtma krüotehnoloogiat, mida kasutatakse tavaliselt koos veeldatud biometaani ehk LBG tootmisega.

Veega või orgaaniliste vedelikega skraberis pesemine ning kemikaaliga pesemine kuuluvad adsorptsiooniprotsesside hulka. Biogaas tihendatakse ja söödetakse samba alumisse osasse, kus see puutub kokku vee, orgaanilise lahusti või kemikaali vastuvooluga. Nii süsihappegaas kui ka vesiniksulfiid on lahustuvad kui metaan. Biogaas, mis samba ülemisest otsast väljub, on metaaniga rikastatud ning veega, orgaanilise lahustiga või kemikaalilahusega küllastunud. Orgaanilise lahustiga ja kemikaaliga pesemine on kallimad, kuid süsihappegaas ning vesiniksulfiid lahustuvad kemikaalilahuses või orgaanilises lahustis paremini kui vees. See annab võimaluse ehitada sama gaasimahu jaoks väiksema töötlusjaama (Persson jt 2006). Samuti on metaani kadu kahe viimase meetodi korral väiksem (Petersson ja Wellinger 2009).

Vahelduva rõhu all adsorbeerimisel kasutatakse süsihappegaasi adsorbeerivaks materjaliks aktiivsütt või tseoliiti. Seda tehnikat kasutavas tehasel töötab paralleelselt 4, 6 või 9 mahutit. Kui adsorbeeruv materjal ühes mahutis on küllastunud, juhitakse gaasivool järgmisesse mahutisse, kus adsorbeeruv materjal on regenereeritud (Petersson ja Wellinger 2009). Veeaur kondenseeritakse tavaliselt jahutis. H_2S on vaja eemaldada enne gaasi juhtimist adsorptsioonimahutisse. Seda tehakse tavaliselt aktiivsöega varustatud lisamahutis, kus H_2S adsorbeerub aktiivsöele (Persson jt 2006).

Membraansepareerimine kujutab endast biogaasi puhastamist kuivade membraanidega. Membraanid on tehtud materjalidest, mis lasevad läbi süsihappegaasi, vett ja ammoniaaki. Vesiniksulfiid ja hapnik läbivad membraane mingis ulatuses, kuid lämmastik ja metaan läbivad memb-

raane väga madalas ulatuses. Membraanid koosnevad tavaliselt õõnsatest kokku pressitud kiududest. Protsess toimub tihti peale kahes etapis. Enne, kui gaas siseneb kiududesse, läbib see filtri, mis peab kinni vee- ja õlipiisad ning aerosoolid. Lisaks eemaldatakse vesiniksulfiid enne membraane aktiivsõega. Membraaneraldus on üks klassikalistest meetoditest prügilagaasi puhastamisel (Petersson ja Wellinger 2009).

Üks alternatiiv peamistele tehnoloogiatele on biogaasi puhastamine krüotehnoloogiaga. See tähendab, et gaas jahutatakse ja erinevate biogaasis sisalduvate ainete kondensatsiooni temperatuure kasutatakse lisandite ja CO₂ eraldamiseks CH₄-st. Tavaliselt toimub krüogeenne meetod koos veeldatud biometaani tootmisega. Selle korral jahutatakse gaasi kuni -162 °C. Biometaani jahutamine nii madalate temperatuurideni on väga energiamahukas. (Johansson 2008)

Surugaasiballoonid

On nelja tüüpi mahuteid surugaasi hoiustamiseks:

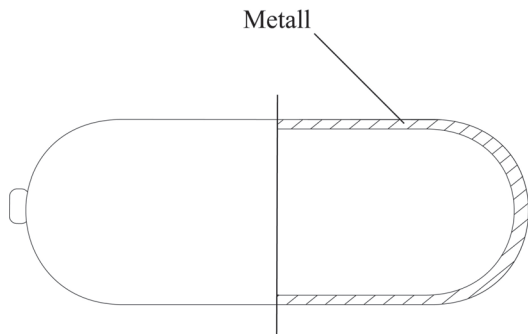
- tüüp 1: metallist balloonid,
- tüüp 2: rõngasmähisega balloonid,
- tüüp 3: täismähisega balloonid,
- tüüp 4: täiskomposiitballoonid.

Balloonid on üldiselt disainitud kestma 1000 täitmiskorda aastas, maksimaalselt 20 aastat (Trudgeon 2005).

Metallist balloonid

Tänu oma odavale hinnale on metallist mahutid teiste balloonitüüpidega võrreldes üldiselt kõige populaarsemad. Alates 1940-ndatest on CNG hoiustamiseks sõidukites olnud kõige laialdasemalt kasutusel metallist balloonid. (Trudgeon 2005)

Metallballoonide alla kuuluvad alumiiniumballoonid ning terasballoonid. Esimest tüüpi balloonid on kõige ökonoomilisemad masinates, mis ei ole kaalutundlikud. Sisejõud balloonides on ohjeldatud metalli poolt (vt joonist 1). Rõngasmähisega ja täismähisega balloonides jagavad survet metall ja komposiitmaterjal.

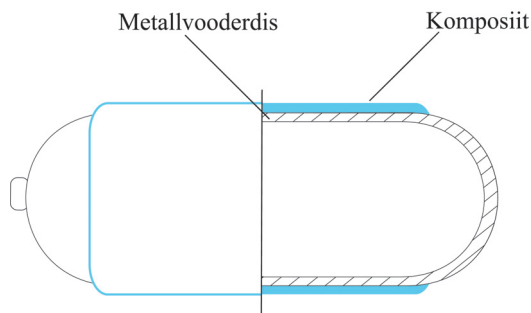


Joonis 1. Ristlõige 1. tüüpi CNG- või CBG-balloonist.
Figure 1. Type 1 CNG/CBG tank.

1. tüüpi balloonide suurus on limiteeritud: balloonide maht on tavaliselt ainult 80 kuni 100 liitrit. Kaal on 80-liitrise mahuga balloonil keskmiselt 85 kilo.

Rõngasmähisega balloonid

2. tüüpi balloonid on vooderdatud terase või alumiiniumiga ning spiraalselt ristmähitud vaiguga immutatud klaas-, aramiid- või süsinikpidevkiuga, mis annab ballooni vooderdisele täiendava tugevduse (vt joonist 2). Need balloonid on disainitud piisavalt tugeva ja paksu vooderdisega, et hoida ballooni töörihul isegi ilma komposiitkatteta. Sellist tüüpi balloonid on kompromissiks odavamate I tüüpi balloonide ning kergemakaaluliste III ja IV tüüpi balloonide vahel (Trudgeon 2005).

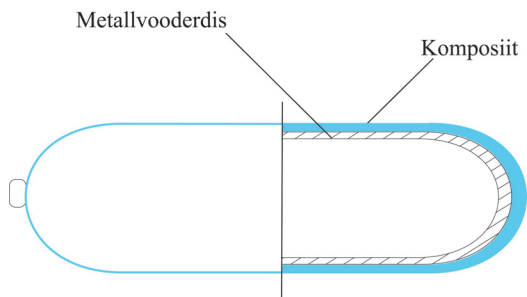


Joonis 2. Ristlõige 2. tüüpi CNG-balloonist.
Figure 2. Type 2 CNG tank.

Tüüpe 2 ja 3 eristab komposiitmaterjalist katte mähkimise viis. Teist tüüpi ballooni on kaetud ainult keskosast, aga kolmas tüüp on mähitud kogu ballooni ulatuses. Kolmandat tüüpi ballooni on tunduvalt õhem metallist vooderdis (McGlinchey jt 2008).

Täismähisega ballooniid

3. tüüpi ballooniid on metallist vooderdis, mis on mähitud kogu ballooni ulatuses komposiitmaterjaliga, mis annab 75-90% mahuti tugevusest (vt joonist 3). Metallvooderdis annab ülejäänud tugevuse ja toimib jäiga membraanina gaasi hoidmiseks. Lisaks annab metallvooderdis mahutile parema löögikindluse. III tüüpi mahuteid rakendatakse palju seal, kus on oluline kaalu vähendamine, näiteks bussides ja veoautodes. Sellist tüüpi balloone on paljud erinevad autotootjad (nt Volvo ja Volkswagen) kasutanud oma surugaasiautodes (Trudgeon 2005).



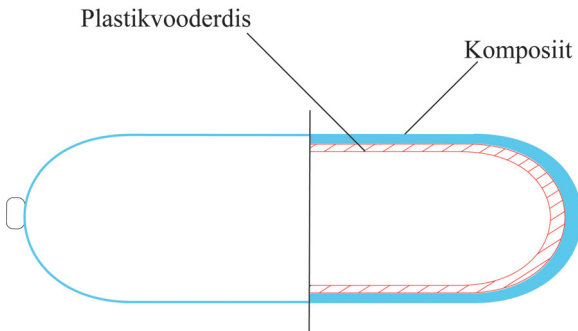
Joonis 3. Ristlõige 3. tüüpi CNG-balloonist.
Figure 3. Type 3 CNG tank.

Väiksemate III tüüpi ballooniid (84-liitrise veemahuga) liitri hinnaks kujuneb umbes 18 dollarit (14 eurot). See hind väheneks 10-12 dollarini (8-9,5 euronit) liitri kohta, kui soetada suurem, näiteks 320-liitrine ballooni. Üheks näiteks võib III tüüpi ballooniid puhul tuua ettevõtte Luxfer Gas Cylinders ballooniid. 84-liitrise mahuga III tüüpi ballooni kaalub 36,7 kg. Gaasi mahub sellesse 24,7 m³, mis annab ballooni raskuseks koos kütusega 53,5 kg. Luxferi kolmandat tüüpi ballooniid koosnevad Luxferi poolt toodetud alumiiniumvooderdisest, mis on üleni mähitud epoksü-impregneeritud süsinikkiuga.

Täiskomposiitballoonid

4. tüüpi kütusemahutitel on mittemetalne vooderdis ning see on täielikult kaetud süsinik-, aramiid- või klaaskiuga (vt joonist 4). Selline vooderdis ei paku tootele struktuurset tugevust ning toimib ainult gaasi läbilaskvuse barjäärina. Reeglina on 4. tüüpi mahutite kuplitel lõõgikaitse, sest plastikust vooderdis ei taga komposiitkattele jäika tuge (Trudgeon 2005).

IV tüüpi balloonide hinnad on võrreldavad III tüüpi balloonide hindadega. Kuna IV tüüpi balloonide puhul annab selle termoplastikust vooderdis 1% mahuti tugevusest, on sellise balloonitüübi puhul hind alumiiniumvooderdisega ballooni hinnast odavam. Selle eest peab kasutama vähem rohkem kiudu ja paksu plastikvooderdist, mis on paksem kui kolmanda balloonitüübi alumiiniumvooderdis.



Joonis 4. Ristlõige 4. tüüpi CNG-balloonist.
Figure 4. Type 4 CNG tank.

Järeldused

Ballooni hind sõltub sellest, millisest materjalist see valmistatud on. Mida kergem balloon, seda kallim ta on. Balloonitüüpide keskmised kaalud on esitatud järgnevas tabelis.

*Tabel 1. Balloonide keskmine kaal mahuliitri kohta.
Table 1. Cylinder weight per litre (Xperion).*

Balloonitüüp	Balloon kaal (kg/l)
Tüüp 1 - metallballoon	1,1
Tüüp 2 - rõngasmähisega balloon	0,8
Tüüp 3 - täismähisega balloon	0,4
Tüüp 4 - täiskomposiitballoon	0,3

Surugaasisõidukitele minnakse üle enamasti odavama kütuse pärast. Sõidukisse investeeritakse nii palju, et see ennast ära tasuks. Sellepärast ei taheta kasutada hinnalisi balloone. Kergemat tüüpi balloonide osakaal kasvab piirkondades, kus need on lihtsamalt kättesaadavad ning nende hinnad pole liiga kõrged.

Suurima turuosa moodustavad I tüüpi balloonid. See tuleneb nende pike-mast kasutuskogemusest ning hinnast. Teiste balloonitüüpidega võrreldes on hinnavahe hetkel väga suur. Kui I tüüpi ballooni puhul maksab liiter keskmiselt 4 dollarit (3 eurot), siis kergemate III ja IV tüüpi balloonide puhul keskmiselt 12-14 dollarit (9,5–11 eurot) (vt tabel 2). See on märkimisväärselt suur hinnavahe.

*Tabel 2. Balloonide hind liitri kohta ja turuosa 2003. aasta seisuga. (Rahvusvaheline Gaasiliit 2005)
Table 2. Cylinder price per litre and market shares as of year 2003. (Rahvusvaheline Gaasiliit 2005)*

Tüüp	Liitri hind (USD)	Turuosa (%)
Tüüp 1	3-5	90
Tüüp 2	5-7	4
Tüüp 3	9-14	1
Tüübid 3 ja 4 süsinikplastist	11-18	3

I tüüpi ballooni tagasilöögiks on selle kaal, mis 80-liitrisel ballioonil on keskmiselt 85 kg. III tüüpi 84-liitrise ballooni kaal on 37 kg. IV tüüpi ballioonid on III tüüpi ballioonidest kergemad, aga nende hind on ka mõnevõrra kallim. Ballioonide mahu suurenedes väheneb nende kaal mahutava gaasihulga suhtes. Sellepärast on otstarbekam kasutada suurema mahutavusega balloone. Väikestes sõiduautes muutub see probleemiks. Suurele ballioonile ei ole sõiduautos ruumi, sest tavaliselt paigaldatakse auto ümberehitamisel metaankütustele gaasiballoon pagasiruumi. Seda probleemi ei teki nende tootjate sõidukites, kus autod disainitakse algselt peale CBG või CNG peal töötavateks. Sellistes autodes asetsevad ballioonid tavaliselt sõiduki põhja all ning pagasiruum jääb vabaks (Reuerman ja Vos 2009).

Raskete 1. ja 2. tüüpi ballioonide paigaldamisel sõidukisse tuleb arvestada tagumise amortisatsiooni kohaldamisega raske balliooni kandmiseks. Kergemate komposiitballioonidega sõiduautes ei ole see vajalik, sest ballioonide kaal on väike.

Kergeid 3. ja 4. tüüpi balloone on tasuvam kasutada suuremates sõidukites, nagu veokid ja bussid. Kergemate ballioonidega vähendatakse sõiduki kaalu, millega väheneb ka kütusekulu. Bussid või veokid läbivad üldiselt pikemaid vahemaid kui sõiduaudod ja tarbivad rohkem kütust. Sellepärast vajavad nad rohkem balloone kütuse mahutamiseks. Oleks tasuvam kasutada 3. ja 4. tüüpi balloone sellistel sõidukitel, mille kütusekulu on suur ning mis läbivad keskmisest pikemaid vahemaid. Veeldatud biometaan oleks samuti tasuvam kasutada suurtes sõidukites, mis tihti pikki vahemaid läbivad.

Kokkuvõte

Oluliseks probleemiks biometaan kasutamisel sõidukites on kütusemahutite liiga suur kaal või hind. Mahutite probleemi lahenduseks võib olla uute sõiduaudode välja arendamine, kus mahutid on optimaalse suuruse ja kaaluga. Materjalide arenemisega vähenevad kulud komposiitmaterjalidele ning selle tehnikale. See muudab hetkel kallid 3. ja 4. tüüpi kompo-

siitballoonid odavamaks ning kättesaadavamaks. Odavamate ja paremate omadustega komposiitballoonid kindlustaksid metaankütuste kasutusele võtmist transpordis ning aitaksid kaasa heitgaaside vähendamisele. Bio-metaani aktiivsem kasutamine aitaks täita seatud eesmärgid taastuvenergia osas. Lisaks edendaks biometaani laialdasem kasutus energiasõltumatust naftast.

Kasutatud kirjandus

- Johansson, N. 2008. Production of liquid biogas, LBG, with cryogenic and conventional upgrading technology. Description of systems and evaluations of energy balances. Lundi Ülikooli tehnoloogia ja ühiskonna õppetool. Lund.
- Lahtvee, V. 2011. Biogaas mootorikütusena Eestis. - Keskkonnatehnika, 8, lk 34.
- Lawday, J. M., Myers, D. Implementation of Safety Standards in the Design and Development of a Lightweight CNG Fuel Storage System for Buses. 11 lk.
- McGlinchey, H. W. 2008. CNG Fuel System Inspector Study Guide. Clean vehicle education foundation, Lancaster, OH, 53 lk.
- Patrick, J. R., John, V. 2009. Project no 1412. Production of biomethane and its use for transport applications. 56 lk.
- Persson, M., Jönsson, O., Wellinger, A. 2006. Biogas Upgrading to Vehicle Fuel Standards and Grid Injection. IEA Bioenergy Task 37, 32 lk.
- Petersson, A., Wellinger, A. 2009. Biogas upgrading technologies - developments and innovations. IEA Bioenergy Task 37, 19 lk.
- Rahvusvaheline Gaasiliit. 2005. Global opportunities for natural gas as a transportation fuel for today and tomorrow. (www.gnc.org.ar/downloads/5.1CS.02.pdf)
- Trudgeon, M. 2005. An overview of NGV cylinder safety standards, production and in service requirements. (http://www.apvgn.pt/documentacao/overview_of_ngv_cylinder_safety_standards.pdf)
- Xperion. (<http://www.xperion-energy.de/high-pressure-systems-spezifikationen-en.html>)

BIOMETHANE AS A TRANSPORT FUEL AND USE OF COMPRESSED NATURAL GAS TANKS IN VEHICLES

Pärtel Niitaru

The article gives an overview of the production of biomethane and compressed natural gas (CNG) tanks of transport vehicles. There are many technologies for upgrading biogas to biomethane. Upgraded biogas, or biomethane consists of 95% or more methane gas. So the methane level of biomethane is the same as natural gas. The main upgrading technologies are pressure swing adsorption - PSA, water scrubbing, organic physical scrubbing, chemical scrubbing, membrane separation and cryogenic upgrading.

CNG is mainly stored in high pressure cylinders. Liquid biomethane is stored in cryogenic cylinders. In terms of safety the storage of methane fuel is a very important part of a natural gas vehicle (NGV). The comparison of the cylinders gives an overview of the cylinder prices, weight and market shares (see table 1 and 2).

The problems of the fuel tanks are the price and weight of these tanks. There are 4 types of high pressure cylinders. Type 1 is all-steel cylinder. It is the cheapest on the market but it is also the heaviest. Type 2 is fiber-hoop-reinforced steel cylinder which is a bit lighter than type 1 cylinder. Type 3 is fully fiber-reinforced cylinder with metal liner. Type 4 cylinder is fully fiber-reinforced cylinder with plastic liner. Type 3 and type 4 are the lightest cylinder types. They are also the most expensive cylinders on the market.

Lighter cylinders are practical to use in heavy duty vehicles which cover long distances. When converting an old vehicle to run on CNG or biomethane, it is reasonable to use heavier type 1 or 2 cylinders, because they are much cheaper than lighter type 3 and 4 cylinders. Due to increasing environmental standards and fuel consumption it is necessary to introduce new inputs to transport fuels. Finding out which cylinders are the most suitable in different types of vehicles, will help in the development of new vehicles that run on CNG or biomethane.

„ROHELISEST ELEKTRIST“ TUUMAJAAMANI

Hillar Toomiste
hillar.toomiste@gmail.com

Annotatsioon

Käesolevas artiklis on kokkuvõtlikult iseloomustatud mitmeid elektrienergia tootmise tehnoloogiaid, keskendudes tuumaenergia võrdlemisele taastuvenergiaga. Autori arvates tuleb edasi liikuda nii taastuvenergeetika kui ka tuumaenergeetika arendamisega, aga kindlasti tuleb hoiduda tuumaenergeetika vananenud tehnoloogiate kasutamisest. Väga lootustandev tehnoloogia on sulasoolareaktori abil elektri tootmine.

Märksõnad: nn roheline elekter, hüdroenergia, tuuleenergia, päikesepatarei, biomass, põlevkivielekter, tuumaenergia, sulasoolareaktor.

Sissejuhatus

Nn roheline elektri mõiste on küllaltki lai. Rohelise elektri all peetakse silmas elektri tootmist taastuvenergia allikatest. Kasutusel on mitmeid erinevaid energia tootmise tehnoloogiaid ja käesolev kirjutus tutvustab neist põgusalt nelja varianti. Objektivseks hindamiseks on oluline vaadelda elektri tootmist ja tarbimist komplekselt. Hindamiskriteeriumiteks on

- otsesed kulutused (seadmete ja rajatiste maksumus);
- kaudsed kulutused (kahju loodusressursile);
- peidetud energia (süsiniku jalajälg, materjalide ja seadmete valmistamiseks kulutatud energia hulk);
- seadme eluiga.

Hüdroenergia

Eesti suhteliselt madala reljeefi tõttu on hüdroenergia ressursid suhteliselt tagasihoidlikud. Tehniliselt rakendatav potentsiaal on 30–60 MW (Liivak 2002: 31). Probleemiks on ka ressursi suur killustatus ning maa-alade ülejuttamine ja kalarände takistamine, mis keskkonda kahjustavad.

Otsesed kulud:

- investeerimiskulud 975–6050 €/kW, hoolduskulud 40 €/kW aastas (de Jager jt 2011);
- teenindusteede rajamine;
- elektriliinide rajamine.

Kaudsed kulud:

- maade üleujutamisega ja rändkalade elupaikade hävinemisega loodusele tekitatud kahju.

Peidetud energeetiline kulu:

- seadmete ja betooni tootmise käigus kulutatud energia,
- ehitustööde käigus kulutatud energia.

Seadmete elueaks arvestatakse:

- kuni 50 aastat, rajatistel kuni 100 aastat.

Elektri omahind tuleb suhteliselt kõrge: taastatavates jaamades 3,8-9 senti/kW·h, uutest jaamades 5,5-11 senti/kW·h. Tootmiskaht oli 2011. aastal 31 GW·h (Raesaar 2004). Hüdroelektrijaamade võimsuse reguleerimine on kiire ja see omadus annab võimaluse kasutada neid elektritarbimise tipukoormuse katteks ja stabiliseerimisjaamadena.

Eestis on seni veel kasutamata üks oluline ressurss: Omuti jõuaste Narva jõel. Erinevatel hinnangutel on selle võimsuseks 15-30 MW (Raesaar 2004).

Tuuleenergia

Tehniliselt rakendatav tuuleenergia potentsiaal Eesti maismaal on 560 MW ja avamerel 3425 MW. Täna on püstitatud üle 80 tuuliku koguvõimsusega 184 MW. 2011. aastal toodeti toetatavat tuuleenergiat 365 GW·h (<http://www.tuuleenergia.ee/about/statistika> 2012). Lihtne jagamistehe ütleb, et sama hulga energiat oleks saanud toota 42 MW_{el} gaasigeneraatoriga. Tuulegeneraatori koormusteguriks saame vaid 23% installeeritud võimsusest, kirjanduse põhjal peaks koormustegur olema 30% ringis.

Otsesed kulud:

- investering maismaale püstitades 1125 €/kW – 1525 €/kW, hooldus 35–45 €/kW aastas (de Jager jt 2011);
- investering meretuulikute puhul 2450 €/kW – 3500 €/kW, hooldus 90–120 €/kW aastas.

Kaudsed kulud:

- vajadus pump-hüdroelektrijaama või puhverelektrijaama järele, investering nendesse võib ületada mitmekordselt otsese investeeringu tuuliku rajamiseks;
- elektri jaotusvõrgu ümberehitamine, kuna tuulikud paiknevad rannikujoonel.

Peidetud energeetiline kulu:

- vajadus suure hulga betooni ja metalli järele, näiteks maatuuliku püstitamiseks vajatakse umbes 2400 tonni raudbetooni (<http://www.tuuleenergia.ee/2011/06/tuulikud-aitavad-looduselt-va-bandust-paluda> 2012);
- elektriliinide ehitus piki rannajoont paiknevate tuuleparkide sidumiseks vajab palju metalli, teedevõrku ja tööjõudu.

Seadme eluiga on 25 aastat.

Tuuleenergia kasutamise suurim miinus on energia tootmise ebakorrapärasus. Tuulikud saavad töötada ainult tuulekiiruste vahemikus 5 m/s – 22 m/s. Väiksema ja suurema tuulega nad energiat ei tooda. Elektrivõrgu stabiliseerimiseks kasutatakse praegu soojuselektrijaamu nn kuumas reservis hoidmisega. Sellisel juhul tarbib soojuselektrijaam pidevalt kütust ja jooksevkulusid, aga elektrit ei genereeri. Seega tuleks kogu kuumas reservi poolt kulutatud kütust ja emiteeritud CO₂ vaadelda kui tuulegeneraatorite käitluskulu (Leonhard 2002). Samuti pole õige väita, et tuulikute kasutamine ei emiteeri kasvuhonegaase.

Tuulikufarmide omanikelt tuleks nõuda ka salvestuselektrijaamade väljaehitamist kogu installeeritud võimsuse stabiliseerimiseks. Näiteks 2000 MW võimsusega tuulikute töö stabiliseerimiseks oleks vaja raja-

da 1200 MW võimsusega pumpelektrijaam (Rummel 2008). Selliselt oleks võimalik toota stabiilselt 600 MW võimsusega elektrit. Marek Strandbergi pakutud idee kasutada Norra pumphüdroelektrijaamu pole samuti tõsiseltvõetav, sest elektri transport sinna ja tagasi pole kindlasti mitte tasuta. Täna sellest elektriaretelt näeme, et elektri transport on kallim kui elekter ise.

Päikesepatarei (fotoelektriline muundamine)

Eesti laiuskraadil võime arvestada parimaks energiatiheduseks 1 kW/m² (päikesekiirte langemisel risti olevale tasapinnale selge ilma korral). Energia tihedus tundub küll ahvatlevalt suur, aga kahjuks on päikesepatarei kasutegurid vahemikus 9-13%. Samuti on suureks probleemiks päikesepatareide kõrge hind, mis tuleneb nende tootmiseks vajalikust väga suurest energiahulgast. Näiteks monokristalsest ränist valmistatud elemendi tootmiseks kulub kuni 1,9 kW·h energiat iga ruutsentimeetri kohta (www.lowtechmagazine.com 2012). Seega peaks selline element Eesti laiuskraadil töötama 45 aastat, et toota sama suur kogus energiat, mis kulus tema valmistamiseks. Paneeli elueaks aga arvestatakse 25 aastat.

Otsesed kulud:

- investeering 2950–4750 €/kW, hooldus 30–42 €/kW aastas (de Jager jt 2011);
- teenindusteede rajamine;
- elektriliinide rajamine.

Kaudsed kulud:

- nn päikesefarmide rajamisel ei saa maad enam põllumajanduslikult kasutada;
- energiatootmine vajab nagu tuuleenergiagi oma perioodilise iseloomu tõttu pumphüdroelektrijaama või puhverelektrijaama, investeering nendesse võib aga ületada otsese investeeringu päikesepatareidesse;
- kui puhverjaamana kasutatakse soojuselektrijaama, siis on päikeseelektri tootmine kahjumlik, kuna nn kuumas reservis hoitav soojuselektrijaam tarbib pidevalt kütust ja jooksevkulusid.

Peidetud energeetiline kulu:

- 1,9 kWh/cm² monokristalse elemendi puhul (see on äärmiselt suur), mistõttu PV-paneel ei suuda oma eluea jooksul toota samaväärset energiahulka, mis kulus tema valmistamiseks.

Elueaks arvestatakse 25 aastat.

Võimalik, et uued tehnoloogiad vähendavad mõningal määral PV-elementide valmistamise energiamahukust. Õhukeste kilede tehnoloogiaga valmistatud päikeseptareid on väiksema peidetud energiamahukusega, seega ka odavamad. Paraku on ka nende kasutegurid vaid 9% piires (http://en.wikipedia.org/wiki/Thin_film_solar_cell 2012). Päikesevalgusest saab elektrit toota ka peeglilega valgust kontsentreerides ja saadud soojust abil turbiini või stirlingmootorit käitades, aga need lahendused ei ole oma tehnilise komplitseerituse tõttu eriti levinud.

Biomassist toodetud elekter

Eestis oleks võimalik puidu biomassist toota 653 MW elektrit (5,72 TW·h/a) ja rohtsest biomassist 144 MW elektrit (1 TW·h/a) (Kask 2009). Aastal 2011 toodeti biomassist elektrienergiat 747 GW·h ulatuses, sellest tõhusa koostootmise režiimis 147 GW·h. Tootmisvõimsustesse arvatult oleks see 85,3 MW_{el}. Biomassist toodetud elektri eest maksti tootjatele 40 miljoni euro ulatuses dotatsioone. Euroopa keskmine koostootmisjaama kasutegur on elektri tootmisel 38,1% ja soojuste tootmisel 47,7%.

Otsesed kulud:

- investering 2225-4375 €/kW, hooldus 84-176 €/kW aastas (de Jager jt 2011);
- teenindusteede rajamine;
- biomassi kogumissüsteemi ja transpordi lisakulu;
- biomassi niiskusesisaldusest tingitud kulud.

Kaudsed kulud:

- loodusele tekitatud kahju – metsade raie,
- põldude kasutamine mittetoidulise toodangu jaoks.

Peidetud energeetiline kulu:

- küttematerjali kogumine ja transport toimub fossiilkütuste kasutamise arvel.

Elueaks arvestatakse 30 aastat.

Ülo Kase andmetel (Kask 2009) tarbiti 2005. aastal 7,5 gigatonni fossiilkütuses sisalduva süsiniku põletamiseks arvutuslikult 50 teratonni muistset fütomassi. See on ekvivalentne 500 aasta jooksul tekkiva biomassi hulgaga ehk 105 gigatonni süsinikuga aastas. Inimkond on igal aastal kasutanud fossiilset fütomassi koguses, mis on võrdne 80-100kordse kogu planeedi tänase fütomassivaruga, milleks on 500-600 gigatonni süsiniku. Seega on lootus, et biomassi põletamisega saab kogu inimkonna energiavajadust rahuldada, lihtsalt utoopiline.

Põlevkivielekter

Põlevkivi on Eestis kaevandatud alates 1916. aastast. Selle aja jooksul on maapõuest välja toodud umbes miljard tonni põlevkivi ja kaevandatud ala pindalaks on ligikaudu 430 km². Elektrienergia tootmine põlevkivist on tänases Eestis suhteliselt ebatõhus. Erinevate allikate järgi on põlevkivi elektrienergiaks muundamise efektiivsus kõigest 15-32%. Põlevkivielektrijaamade installeeritud võimsus oli 2011. aastal 2994 MW, kasutusvõimsus 2931 MW. Põlevkivist toodeti elektrienergiat 10 899 GW·h (BNS 2012).

Otsesed kulud:

- investeeringud ja hooldus;
- teenindusteede ja karjääri rajamine;
- kogumissüsteemi ja transpordi lisakulu.

Kaudsed kulud:

- loodusele tekitatud kahju – igal aastal laienevad kaevandused ja karjäärid 3-5 km² võrra;
- veeressursi raiskamine – igal aastal pumbatakse maapõuest välja kaugelt üle 100 miljoni kuupmeetri pinna- ja põhjavett, mis on

- toonud kaasa regionaalse veeringe mittejätkusuutlikkuse;
- esmane reljeef ja elukooslused on hävitatud *ca* 118 km².

Peidetud energeetiline kulu:

- põhjaveekihi, reljeefi, huumuskihi ja liigilise mitmekesisuse taastamine ja selle hind.

Elueaks arvestatakse 30 aastat.

Põlevkivi kaevandamise ja kasutuse kohta on kogutud väga suur hulk andmeid. Küsimus pole seega andmete puuduses, vaid selles, et põlevkivienergeetika on osa rahvuslikust energiajulgeolekust ja selle tõttu on keskkonnakaitsele tähelepanu pööramine pärsitud. Põlevkivi väärindamise mõistlikum tehnoloogia oleks õli ja gaasi tootmine. Sellisel juhul saame protsessist ekstraheerida ka teisi keemiatööstusele vajalikke ühendeid ja arendada põlevkivikeemiat. Saadud gaasi ja õli saaksime kasutada üle Eesti hajusalt paiknevates soojuse ja elektri koostootmisjaamades. Niimoodi saaksime luua hajusa elektrienergia tootmise ja väärindada ka praegu kaotsi mineva soojuse.

Tuumaenergia

Tuumaenergeetika on valdkond, mille arengule pandi väga suuri lootusi, kuid toimunud avariide ja radioaktiivse reostuse pikaajalise iseloomu tõttu on ühiskonnas tekkinud sellele emotsionaalne vastuseis. Ometi on tuumaenergeetika praegu ainus energeetikaharu, mis fossiilsete kütuste lõppemisel suudab tagada ilmastikuoludest sõltumatu ööpäevaringse elektrivarustuse. Tähtis osa tuumaenergia abil elektri tootmises on ka kaasproduktina saadaval soojusel, mis võimaldaks meie linnasid kütta.

Tuumaenergeetika tooraineks on siiani peetud uraani, mille hulk maakeral on 5,3-6,4 miljonit tonni. See on väga suur ressurss, kuna 1 kilogrammi loodusliku uraani lõhustumisel saadakse 123 000 kW·h energiat (Morgan 2010). Võrdluseks: 1 kg kivisöe energiasisaldus on 9 kW·h ja põlevkivil 1,3-3,1 kW·h.

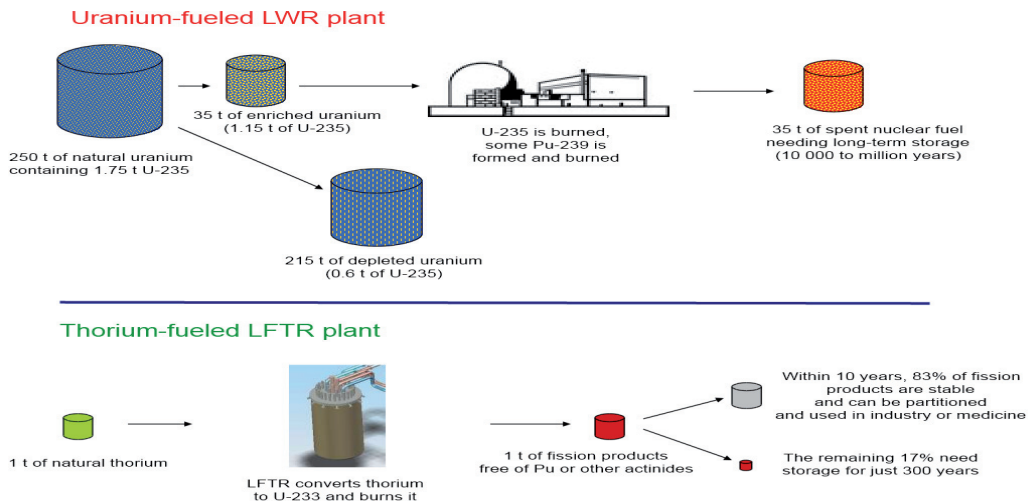
Tänapäeval on kasutusel mitmeid erinevaid tuumareaktoritüüpe, millel kõigil on üks ühine nimetaja – nad kasutavad tahket tuumakütust, mis on paigutatud kütusevarrastesse. Tuumalõhustumise käigus vabanev soojusenergia tuleb neist varrastest kiiresti eemale juhtida, muidu võivad kütusevarrad sulada. Sulamine ongi tuumareaktorile kõige suuremaks ohuks. Väljavaade, et väikseimagi tõrke tõttu jahutussüsteemis on katastroof käes, pole just hea. Sellepärast ongi jahutussüsteemid kuni neljakordse dubleerimisega ehitatud.

Kui aga sulatada tuumakütus kohe üles ja juhtida reaktorit vedelas olekus? Selline lahendus on ajaloos olemas. Tuumafüüsik AM Weinberg (1915–2006) asus 1945. aastal juhtima Ameerika kuulsaimat tuumalaborit Oak Ridge National Laboratory (ORNL). Tema poolt on 1945. aastal patenteeritud ka tänapäeval kasutatavad kergveereaktorid. Uurimistöö arenedes jõudis Weinberg uudse lahenduseni – sulatatud soola keskkonnas toimiva reaktorini. 1965. aastal alustas tööd 7,4 MW katsereaktor, mis töötas edukalt kuni 1969. aastani. USA valitsuse nõudmisel projekt suleti ja külmutati. Sulasoolareaktoril oli mitmeid eelised teiste reaktoritüüpide ees, aga tal oli ka üks puudus, mis ilmselt sai otsustavaks – temaga ei saanud toota materjali tuumarelva valmistamiseks. Tänapäeval on see omadus pigem voores kui puudus...

Sulasoolareaktor

Reaktori töökeskkonnaks on sulatatud sool (LiF , BeF_2), milles on lahustatud lõhustatav aktiivaineline. Aktiivaineks sobivad uraan, plutoonium, toorium. Eriti huvitav on just tooriumi kasutamise võimalus. Toorium on tuumamassiga Th_{232} kergelt radioaktiivne metall, mis neelab hästi neutroneid ja muutub uraaniks U_{233} . Selle isotoobi lõhustumisenergia on ligilähedane U_{235} energiale (24 000 000 kWh/kg). Tooriumi aktiivne varu on 5,3 miljonit tonni, aga tähelepanuväärne on see, et üle 99% tooriumist on looduses isotoobina Th_{232} . Uraanis on tema väärtuslikumat isotoopi U_{235} vaid 0,71%. Seega saab tooriumist 200 korda rohkem energiat kui looduslikust uraanist.

Annual fuel requirements and fuel cycle comparison for a 1GW uranium-fueled LWR and LFTR plant



Joonis 1. U235 uraanireaktori ja tooriumil töötava sulasoolareaktori jäätmehekade võrdlus (http://en.wikipedia.org/wiki/Liquid_fluoride_thorium_reactor 2012).

Figure 1. Fuel requirements and fuel cycle comparison for LWR and LFTR plant

Tähtis on ka lõhustumise jääkproduktide kogus ja poolestusaeg. Jääkprodukte tekib palju vähem (206 korda vähem!) kui loodusliku uraani lõhustamisel ja tekkinud jääkidest 83% saab taaskasutada tööstuses ja meditsiinis. Selleks on vaja neid vaid 10 aastat stabiliseerimiskambris hoida. Ülejäänud 13% jääkide poolestusaeg on keskmiselt 30 aastat. Kui hoida neid jääkprodukte 10 poolestusaega ehk 300 aastat, on nad juba sellise ohutuse tasemega, et neid on lihtne utiliseerida. (http://en.wikipedia.org/wiki/Liquid_fluoride_thorium_reactor 2012)

Sulasoolareaktori kiituseks tuleb veel lisada, et reaktori töötemperatuur on 700 °C ja ta töötab normaalrõhul. Võrreldes sulasoolareaktorit kergveereaktoritega, kus töötemperatuurid on 285–315 °C ja rõhud 75–158 baari, on normaalrõhul töötamine suur eelis: väheneb tehnilisest rikkest tingitud avariioht (http://en.wikipedia.org/wiki/Boiling_water_reactor 2012). Samuti on kõrgemate temperatuuride juures kergem avariilise olukorra puhul tagada jahutust. Jahutid võib teha passiivsed, seega pole neid vaja ka dubleerida, sest passiivjahuti töötab igal juhul. Sulasoolareaktori

heaks omaduseks on veel negatiivne temperatuuritegur, s.t et reaktori kuumenedes sool paisub ja tõrjub osa kütusest reaktori aktiivalast välja ning reaktor hakkab taas jahtuma. Tänu neile omadustele saab sulasoolareaktorit ehitada väga kompaktsena, töökindlana ja kerge juhitudavusega (<http://blogs.forbes.com/kirksorensen> 2012). Hinnataseme orienteeruvaks suurusjärguks on 100 MWel reaktori investeeringuvajadus ca 2000 \$/kW ehk 200 miljonit dollarit. Sellist reaktorit saab tänu oma kompaktsusele tehas-ses valmistada ning ühes tükis lõppkasutaja juurde transportida. Reaktori elueaks prognoositakse 40 aastat.

Viimasel ajal on sulasoolareaktoritega seotud arendustööd tugevasti hoo-gustunud. Sellist tüüpi reaktorite loomisest on teatanud Inglismaa, Hiina, India, Prantsusmaa, Austraalia, Tšehhi, Jaapan, Venemaa ja USA.

Kokkuvõte

Eespool toodud faktidest nähtub, et kuigi taastuvenergeetika osakaalu suurenemine on olnud kiire, ei ole fossiilkütuse kasutamine veel oluliselt kahanenud. Taastuvate ressursside kasutuselevõtt nõuab suuri investeeringuid ja sellega kaasnevad kulud jätavad jälje meie loodusele. Lisaks on vajalik ka stabiliseerimisvõimsuste olemasolu. Tuumaenergia uute tehnoloogiate kasutamine võiks energeetilise julgeoleku paketti oluliselt tugevdada. Tuumaenergia arvelt elektritootmisega kaasneb ka suur hulk jääksoojust, mida oleks suurepäraselt võimalik linnade kütteks kasutada.

Lõpetuseks soovituslik nõuanne Eesti poliitikutele: Eesti peaks kindlasti panustama tuumaenergeetika kasutamisse, aga seda ei tohiks mingil juhul teha Leedu projektiga ühinedes, sest Ignalina tuumajaama planeeritakse vananenud tehnoloogial toimivat ja kõrge saasteainete tootlusega reaktorit. Pigem tuleks ühineda mõne konsortsiumiga, mis tegeleb aktiivselt sulasoolareaktori tehnoloogia juurutamisega.

Kasutatud kirjandus

BNS, 05.09.2012.

D. de Jager, C. Klessmann, E. Stricker, T. Winkel, M. Ragwitz, A. Held, G. Resch, S. Busch, C. Panzer, A. Gazzo, T. Roulleau, P. Gousseland, M. Henriët, A. Bouillé. Financing Renewable Energy in the European Energy Market. Final report, 2011.

Ü. Kask. Tallinna Tehnikaülikooli soojustehnika instituudi sügisakadeemia. Tallinn, 14.11.2009.

W. Leonhard. Balancing fluctuating wind energy with fossil power stations. 2002.

E. Liivak. Eesti energeetika säästva arengu seisukohalt. Tartu, 2002.

J. Morgan. Energy Density and Waste Comparison of Energy Production.

P. Raesaar. Hüdroenergia ressursist ja kasutamisest Eestis. Tallinn, 2004.

L. Rummel. Taastuvatest allikatest elektri tootmise võimalused Eestis. Tallinn, 2008.

<http://www.tuuleenergia.ee/about/statistika/>, 30.09.2012.

<http://www.tuuleenergia.ee/2011/06/tuulikud-aitavad-looduselt-vabandust-paluda/>, 30.09.2012.

http://en.wikipedia.org/wiki/Thin_film_solar_cell, 30.09.2012

http://en.wikipedia.org/wiki/Liquid_fluoride_thorium_reactor, 30.09.2012.

http://en.wikipedia.org/wiki/Boiling_water_reactor, 30.09.2012.

<http://blogs.forbes.com/kirksorensen>, 30.09.2012.

<http://www.lowtechmagazine.com/2009/06/embodied-energy-of-digital-technology.html>, 30.09.2012.

FROM GREEN ENERGY TO NUCLEAR ENERGY

Hillar Toomiste

Current article consists description of potential about different technologies in production of energy. The main question in debate, should we chose renewable energy development or nuclear technologies, leads to the conclusion, we should develop both direction. But especially we need to avoid using old and contaminating technologies in nuclear energetics. Very promising technology for now is molten salt fuelled reactors.