

TEUK XVI

TAASTUVATE ENERGIAALLIKATE UURIMINE JA KASUTAMINE

KUUETEISTKÜMNENDA KONVERENTSI KOGUMIK



**INVESTIGATION AND USAGE OF
RENEWABLE ENERGY SOURCES**
SIXTEENTH CONFERENCE PROCEEDINGS

TARTU, ESTONIA, 2014

Toimetajad / Compiled by: Elis Vollmer, Alo Allik, Erkki Jõgi, Jaanus Uiga

Keeleline toimetetus: Margit Lehis, Karin Veske

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



Eesti Taastuenergia Koda



EESTI ARENGUFOND



Eesti Teadusagentuur
Estonian Research Council

Trükitud: OÜ Paar

Printed by: Paar Ltd

Kirjastaja: Eesti Maaülikool

Publisher: Estonian University of Life Sciences

© 2014

Eesti Maaülikool
Estonian University of Life Sciences

All Rights Reserved



ISBN: 978-9949-536-66-5 (trükis)

978-9949-536-67-2 (pdf)

SISUKORD

Eessõna

MIS OLEKS SIIS KUI ...? ENMAK 2030+: EESTI ENERGIAMAJANDUSE VALIKUKOHAD Jaanus Uiga jt.....	6
OMAENERGIA 2050 – LÖUNA-EESTI ENERGIASÕLTUMATUSE KONTSEPTSIOON Kalle Virkus.....	18
VÄIKETUULIKU OPTIMAALSE MASTIKÕRGUSE ANALÜÜS Jaanus Uiga, Alo Allik, Andres Annuk.....	24
ÜLEVAADE BIOKÜTUSTE ALASEST TEHNOLOOGIAARENDUSEST EESTI MAAÜLI- KOOLI PÕLLUNDUS- JA TOOTMISTEHNKA OSAKONNA KÜTUSELABORITES Jüri Olt, Timo Kikas	37
MIKROTOOTMISJAAMAGA ERAMU ELEKTRIENERGIA TARBIMISE JA TOOTMISE ANALÜÜS Maido Märss jt.....	42
PÄIKESEKIIRGUS MAA POOLE SUUNATUD KALDEGA PINDADEL Teolan Tomson	54
UUENDUSED HOONE ELEKTRISÜSTEEMIS: MUDEL, KLASSIFIKATSIOON JA KASU- TAMISE TULEMUSTE PROGNOOSIMINE. PÄIKESEPANEELIDE KASUTAMINE NURME- VÄLJA LOGISTIKAKESKUSES (80 KW) JA AGAL KINNISVARADE TOOTMISHOONES (140 KW) – ESMANE ANALÜÜS Valeri Saikovski	67
BIOMETAANI TEEKAART 2030 JA BIOMETAANI TOETAMISE SEADUSANDLIKUD VÕI- MALUSED EESTIS – KUIDAS PUNNSEISUST VÄLJA TULLA? Ahto Oja	80
AHJUEHITUSE KAASAJASTAMISE VÕIMALUSED EESTI OLUDES Annes Andresson, Mart Hovi.....	91
LISANDITEGA PUITBRIKETI ENERGIABILANSS Mart Hovi, Külli Hovi.....	98
ENERGIAHEINA JAOTATUD KORISTUSVIIS. KÜLVISENORMI, REAVAHE LAIUSE JA LÄMMASTIKVÄETISE FOONI MÕJU ENERGIAHEINA SAAGILE Ants Bender.....	103
MIKROVETIKAD TAASTUVENERGIA ALLIKANA Kaie Ritslaid jt.....	112
TOITELAHUSESSE SUITSUGAASI SEKVESTEERIMISEST TINGITUD PH-MUUTUSE PÕLEVKIVITUHAGA KORRIGEERIMISE MÕJU MIKROVETIKATE KASVULE Lara Podkuiko jt.....	123
MIKROVETIKA <i>CHLORELLA VULGARIS BEYERINCK</i> KASVATAMINE CO ₂ BIOLOOGILI- SE SIDUMISE EESMÄRGIL Kaie Ritslaid jt.....	130
TASAPINNALISE 2,5 M ² PÄIKESEPANEELI TÖÖ TULEMUSED AJAVAHEMIKUS SEP- TEMBER 2013 KUNI SEPTEMBER 2014 Veli Palge, Margus Arak, Erkki Jõgi.....	149
ENERGIA LÕPPTARBIMISEST TULENEVAD CO ₂ HEITKOGUSED TARTU LINNA NÄITEL Jaanus Uiga jt.....	156
TEMPERATUURI MÕJU AURUGA LÕHKAMISE EELTÖÖTLUSMEETODI EFEKTIIVSU- SELE BIOETANOOLI TOOTMISPROTSESSIS Marti Tutt, Timo Kikas, Jüri Olt.....	168

EESSÕNA

2014. aastal toimub konverents "Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine" juba 16 korda. TEUK on läbi aastate olnud üks põhilisi taastuenergia valdkonna teadurite, praktikute, poliitikute ja lihtsalt huviliste kohtumispaiku.

Konverentsi põhifookuses on sel korral vastvalminud Eesti pikaajaline energiamajanduse arengukava (ENMAK 2030+), et peegeldada paremini ühiskonnas arenevaid olulisi teemasid. Nimetatud arengukava kirjeldab erinevaid energiamajandusstenaariume, mis suunavad valdkonna arengut järgmise paarikümne aasta jooksul, keskendudes jätkusuutlikkusele, konkurentsivõimele, energiatõhususele ja energiajulgeolekule.

Tavapärastele teadlaste ettekannetele on sel korral lisaks antud rohkem sõna ka ENMAKi koostajatele, et tutvustada olulisemaid tulemusi ja eelseisvaid suundumusi Eesti energiamajanduses. Lisaks suulistele ettekannetele on esindatud ka posterettekanded väga laia teemaderingiga, alates mikrovetikate kasutamisest energeetikas kuni bioetanooli ja erineva koostisega puitbrikettide tootmiseni.

Konverentsi programm on sel korral jagatud kaheks teemavaldkonnaks: Päeva alustab visiooniblokk, mis keskendub ENMAKi kõrval ka teistele taastuenergia tulevikusuundumustele, päeva keskel antakse mitmekesine ülevaade väikeenergeetika teadustulemustest ning päeva lõpetavad ettekanded ning järgnev diskussioon teemal, mida pakub ENMAK Eesti riigile. Arutelus osalevad esindajad nii seotud ministeeriumitest kui ka Eesti Arengufondist ja Maailma energeetikanõukogu Eesti esindusest (WEC Estonia). Diskussioon võimaldab poliitikutel, teadlastel ja praktikutel ühiselt arutleda ees ootavate arengusuundade ja jätkusuutlike lahenduste üle.

Huvitavaid ettekandeid ja head lugemist!

Elis Vollmer

Eesti Maaülikooli taastuenergia keskuse asejuhataja

FOREWORD

Annual conference Investigation and Usage of Renewable Energy Sources is being held already 16th time. The conference has been the main meeting point for renewable energy sector politicians, scientists and practitioners throughout its history.

The main focus of this year's conference will be Estonian long-term energy management plan (ENMAK 2030+), to reflect the current important topics in the community. The development plan determines development scenarios in energy economy for the next twenty years and focuses on sustainability, competitiveness, energy efficiency and energy security.

In addition to the regular scientific presentations, this year we talk more about the results and trends in long-term energy management. Besides oral presentations we also exhibit poster presentations with very diverse topics ranging from studies on microalgae in energy production to bioethanol and briquette production from different biomass.

The program of the jubilee conference is divided into two main sections: First part of the day focuses on visions in renewable energy sector. Second part gives an overview of different renewable energy research results. Day is summarised with presentations and open discussion on what possibilities does the new development plan provide for Estonia. Discussion will bring together representatives from involved ministries, as well as Estonian Development Fund and Estonian National Committee of the World Energy Council. The discussion enables politicians, scientists and practitioners to debate on oncoming sustainable development possibilities.

Enjoy the presentations and have a wonderful reading!

Elis Vollmer

Deputy Manager of the Centre of Renewable Energy of Estonian University of Life Sciences

MIS OLEKS SIIS KUI ...?

ENMAK 2030+: EESTI ENERGIAMAJANDUSE VALIKUKOHAD

Jaanus Uiga^{1,2}, Irje Möldre¹, Lembit Vali¹, Peep Siitam¹

¹Eesti Arengufond, Rotermanni 8, Tallinn 10111

²Eesti Maaülikooli tehnikainstituut, Fr. R. Kreutzwaldi 56, Tartu 51014

jaanus.uiga@arengufond.ee

Annotatsioon

Maaailma energeetikanõukogu (WEC – World Energy Council) poolt välja töötatud energia jätkusuutlikkuse indeksi alusel oli Eesti 2013. aastal WEC-i 129 liikmesriigi seas 68. kohal (energiajulgeolekult 65., energia kättesaadavuse poolest 51. ning keskkonna jätkusuutlikkuse tagamisel 117. kohal) (World Energy Council 2013). Sealjuures on Eesti energiasõltuvusmäär Euroopa Liidus üks madalamaid (Statistikaamet 2014). Milline on Eesti energiamajandus tulevikus? Seoses „Eesti energiamajanduse arengukava aastani 2030“ koostamisega seisab Eesti energiamajandust kujundavate valikute ees. Käesolevas artiklis kirjeldatakse Eesti energiamajanduse võimalikke tulevikustsenaariume ning nende rakendumise tulemusi, kasutades ENMAK 2030 koostamisel valminud alusuuringute ning -analüüside põhitulemusi.

Märksõnad: energiamajandus, ENMAK 2030, elamumajandus, soojusmajandus, transport, kohalikud kütused, elektrimajandus, keskkonnamõju, varustuskindlus, majandusmõju.

Sissejuhatus

Energiamajanduse arengukava aastani 2030 (ENMAK 2030+) koostamine algatati Vabariigi Valitsuse 08.08.2013 korraldusega. Sealjuures algas ENMAK 2030+ koostamise eeltöö 2012. aasta oktoobris. Uue energiamajanduse arengukava koostamise vajadus tulenes kehtiva (valminud 2008) kava „Energiamajanduse riiklik arengukava aastani 2020“ uuendamise vajadusest tulenevalt:

- a) arengutest Eesti ja globaalses energiamajanduses;
- b) Balti piirkonna energiasüsteemi oodatust kiiremast integratsioonist teiste EL-i liikmesriikidega;
- c) diskussioonist 2030. aasta siduvate kliima- ja energiapoliitika eesmärkide üle;
- d) energiamajanduse õigusliku regulatsiooni ja strateegiliste valikute muutumisest;
- e) vajadusest luua seosed erinevate energiavaldkondade vahel. (Vabariigi Valitsus 2013).

Arengukava koostamise eesmärgiks on valida optimaalseim energiamajandusstsenaarium, mis oleks tarbijale mõistliku hinna ja kättesaadavusega, vähese keskkonnamõjuga, kooskõlas Euroopa Liidu pikaajaliste energia- ja kliimapoliitika eesmärkidega ning pikaajaliselt kõige konkurentsivõimelisem (Vabariigi Valitsus 2013).

ENMAK 2030+ strateegilised eesmärgid

Eelnevast tulenevalt on arengukava strateegilisteks eesmärkideks:

1. **Energiaga varustatuse tagamine** elektri-, soojus- ja elamumajanduses transpordisektoris.
2. Eesti **konkurentsivõimet** kahjustamata **majanduse energiamahukuse** vähendamine ja **energiatõhususe** suurendamine energia tootmisel, ülekandel ja jaotamisel ning tarbimisel.
3. **Energiajulgeoleku** suurendamine energia tootmiseks vajaliku ärikeskkonna, energiainfrastruktuuri ja ühenduste arendamise ning kodumaiste kütuste tootmise kaudu.

Seejuures peavad optimaalseimad lahendusteel energiamajanduse korraldamisel Eestis võtma arvesse ka energeetika valdkonnas või energiamajanduse arenguga tihedalt seotud valdkondades **Euroopa Liidu poliitilisest raamistikust tulenevaid kohustusi** (tabel 1).

Tabel 1. Kehtivad energiavaldkonna eesmärgid ning kohustused (MKM 2014)
 Table 1. Current goals and obligations in the Estonian energy sector (MKM 2014)

TAASTUV-ENERGIA 2020	<p>Taastuvenergia osakaal energia lõpptarbimises peab aastal 2020 olema 25% (kohustuslik eesmärk tulenevalt taastuvenergia direktiivist 2009/28/EÜ).</p> <hr/> <p>Taastuvenergia osakaal transpordisektori lõpptarbimises peab aastal 2020 olema 10% (kohustuslik eesmärk tulenevalt taastuvenergia direktiivist 2009/28/EÜ).</p>
ENERGIA LÕPPTARBIMINE 2020	<p>Energia lõpptarbimine aastal 2020 ei tohi ületada 2010. aasta energia lõpptarbimist 2818 ktoe (=118 PJ/a =32,8 TWh/a) (indikatiivne eesmärk tulenevalt energiasäästudirektiivist 2012/27/EL ja konkurentsivõime kavast „Eesti 2020“)</p>
KHG EMISSIOON 2020	<p>EL heitkoguste kauplemisüsteemi välise sektorite summaarne kasvuhooenergiaemissioon atmosfääri võib aastaks 2020 kasvada kuni 11% (6,27 mln t CO₂ ekv) võrreldes 2005. aastaga (5,65 mln t CO₂ ekv) (kohustuslik eesmärk tulenevalt Euroopa Parlamendi ja Nõukogu otsusest 406/2009/EÜ ja konkurentsivõime kavast „Eesti 2020“)</p>

2014. aasta oktoobri lõpus toimub Euroopa ülemkogu, kus muu hulgas võetakse vastu otsused EL 2030 kliima- ja energiapoliitika raamistiku kohta. Nimetatud raamistik on järg olemasolevale, 2020. a raamistikule ning vaheetapp liikumaks 2050. aastaks madala süsinikusisaldusega majanduse suunas. 2030 kliima- ja energiaraamistiku indikatiivsed eesmärgid on kirjeldatud tabelis 2.

Tabel 2. EL 2030 kliima- ja energiaraamistiku indikatiivsed eesmärgid (MKM 2014)
Table 2. Indicative goals of the EU-s energy and climate policy for 2030 (MKM 2014)

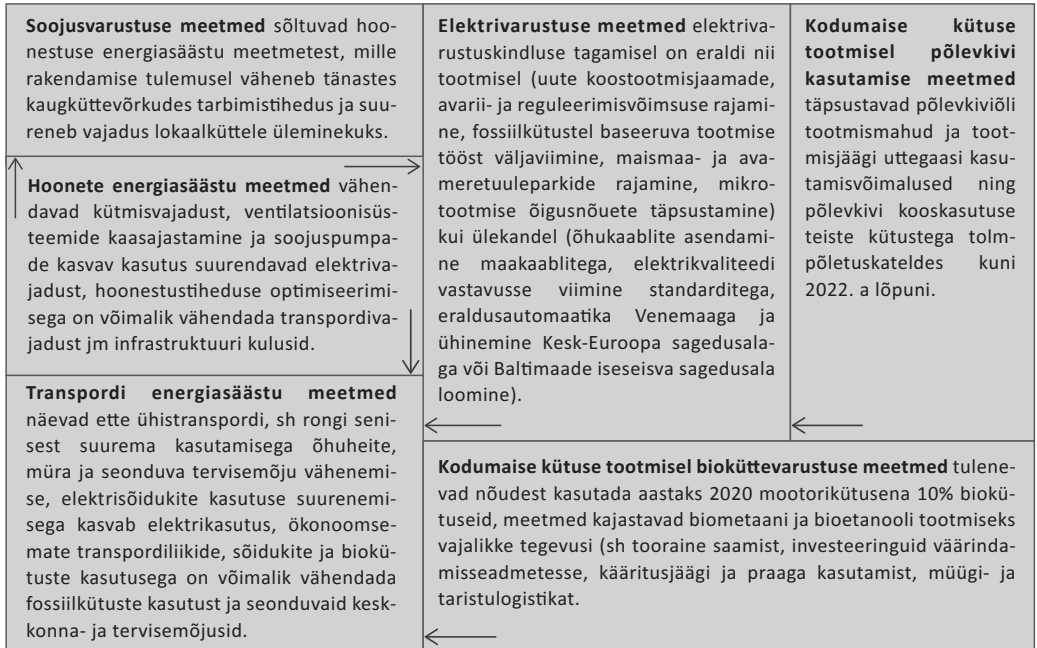
TAASTUV-ENERGIA 2030	ELi-ülene eesmärk on suurendada taastuenergia osakaalu 2030. aastaks 27%-ni energia lõpptarbimises. ELi-ülest eesmärki ei tõlgendata automaatselt siduvateks riiklikeks eesmärkideks, nagu on see seatud praeguse energia- ja kliimapaketiga.
ENERGIA LÕPPTARBIMINE 2030	ELi energiatõhususe eesmärk aastaks 2030 seatakse suurendamiseks energiatõhusust aastaks 2030 27% võrra (võrreldes 2007. aastal PRIMES -mudeli abil tehtud prognoosidega primaarenergia tarbimise kohta aastal 2030).
KHG EMISSIOON 2030	ELi-ülene eesmärk on vähendada kasvuhoonegaaside heidet 40% võrreldes 1990. aastaga.
	ELi heitkogustega kauplemise süsteemiga (ETS) hõlmatud sektorid peaksid võrreldes 2005. aastaga heitkoguseid vähendada kokku 43%.
	ELi heitkogustega kauplemise süsteemi välised (non-ETS) sektorid peaksid heitkoguseid vähendada 30%. Praeguste arvestuspõhimõtete jätkudes (SKP inimese kohta) peaks Eesti riiklikuks vähendamiskohustuseks olema 11% võrreldes 2005. a tasemega (st 5 mln t CO₂ ekv aastaks 2030).

Eelnimetatud indikatiivsed kohustused, neid iseloomustavad indikaatorid ja taotletavad saavutustasemed selguvad pärast ELi tasemel üldise kokkuleppe tegemist. Olemasoleva teadmise põhjal saame eeldada, et energiavaldkonnast tuleneva kliimamõju vähendamine on üks EL-i põhisuundumusi ka pärast 2020. aastat. Järjest ambitsioonikamate eesmärkide saavutamine eeldab liikmesriikidelt (sh Eestilt) senisest mahukamat planeerimist ning suuremat panust ja pühendumist eesmärkide täitmisesse.

ENMAK 2030+ valdkonnad ja meetmed

ENMAK 2030+ seob kokku soojus- ja elamumajanduse, elektrienergia tootmise ja ülekande, transpordisektori energiatarbimise ning kohalike biokütuste tootmisega seotud valikud, asendades „Eesti elektrimajanduse arengukava aastani 2018“, „Biomassi ja

bioenergia kasutamise edendamise arengukava aastateks 2007–2013“ ja „Eesti eluase-mevaldkonna arengukava 2008–2013“. Lisaks antakse ENMAK 2030+ -s lähtekohad arengukavadele, mida tuleb Euroopa Liidu õigusest tulenevalt esitada Euroopa Komisjonile: taastuvenergia tegevuskava taastuvenergia direktiivi 2009/28/EÜ alusel; energiasäästu tegevuskava ja hoonete renoveerimise kava energiasäästudirektiivi 2012/27/EL alusel.



Joonis 1. ENMAK 2030+ valdkonnametmete omavahelised seosed (Möldre 2014)
Figure 1. The relations between the sectors of ENMAK 2030+ (Möldre 2014)

Valdkondade koondamise eesmärgiks on vähendada erinevate energiamajandust reguleerivate valdkondlike arengudokumentide hulka ning koondada energiamajanduse terviklik planeerimine ühe arengukava alla. Sellega saavutatakse energeetika eri sektorite parem sidusus ning vähendatakse administratiivset koormust erinevate arengudokumentide uuendamisel (MKM 2014). Valdkondade omavahelisi seoseid kirjeldab .

Valdkondade stsenaariumites analüüsitud meetmete rakendamise võimalikest tulemustest annab lühiülevaate tabel 3.

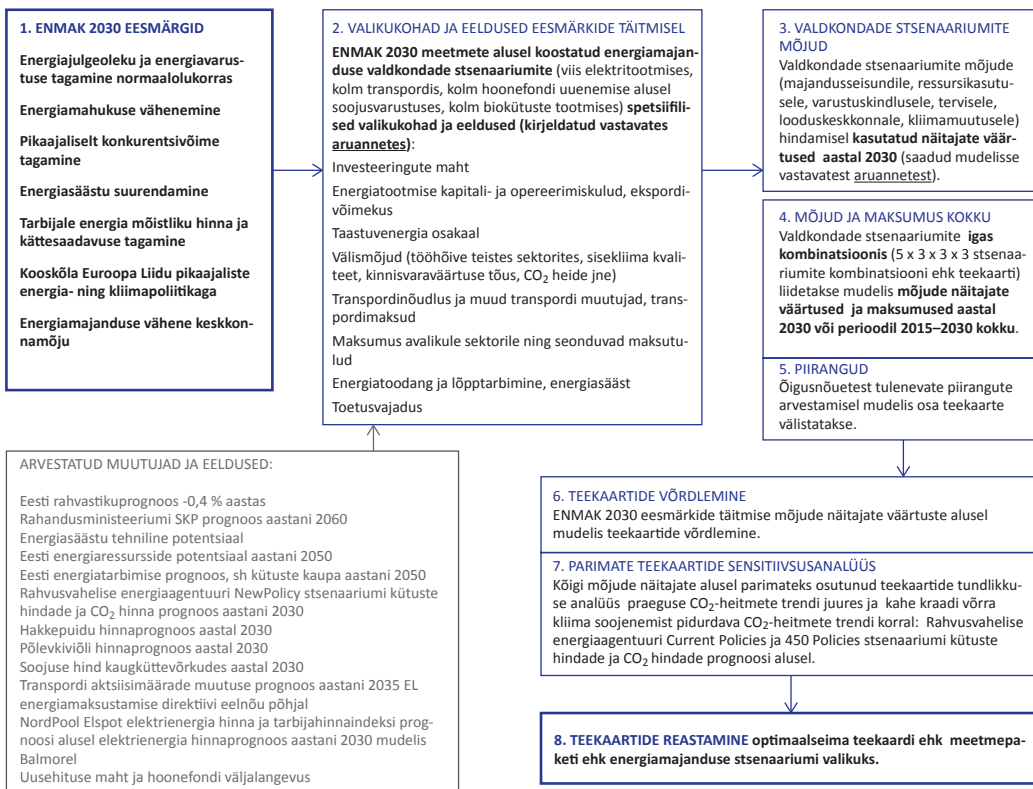
Tabel 3. ENMAK 2030+ stsenaariumite rakendamise tulemusi
 Table 3. The results of ENMAK 2030+ scenarios

Valdkond	Baasolukord	Võimalikud tulemused aastal 2030
Transport	Kütuste kasutus 8,3 TWh/a	Sõltuvalt meetmete rakendamisest muutub energiatarbimine transpordis 2% vähenemisest kuni 60%-lise tarbimise kasvuni.
Hooned	Sisekliima tagamisega hoonetes kasutatakse 12 TWh/a soojust ning 4,5 TWh/a elektrit	Meetmete rakendusel muutub soojustarbimine vahemikus 2,5%...27% , rekonstrueerides: a) 15–50% korterelamutest; b) 10–40% väikeelamutest; c) 10–20% mitteelamutest. Sealjuures suureneb elektri tarbimine 6,7...9,8% .
Soojusmajandus	Kütuste kasutamine soojuse tootmiseks 20,4 TWh/a	Tulenevalt puitkütuste osakaalu kasvust ning lähtudes elamumajanduse stsenaariumite tulemustest muutub soojuse tootmine 13%-lisest vähenemisest kuni 8%-lise kasvuni. Maagaasi osakaal väheneb ning kaugküttes kasvab koostootmise osakaal 60%-ni.
Kohalikud biokütused	Biometaani ning bioetanooli tootmist ei toimu	Biometaani ja bioetanooli tootmisel ja tarbimisel Eestis moodustaksid kohalikud biokütused 0...27% mootorkütustest, ühtlasi vähendades kasvuhoonegaaside ja õhusaasteainete teket ning tõstes energiajulgeolekut.
Elektrimajandus	Elektri tootmine 11,8 TWh/a, sealjuures eksporditakse 3,7 TWh/a	Aastal 2030 on elektri tootmisvajadus ~10 TWh/a. Enamikku sellest on võimalik turutingimustes katta nii põlevkiviõli tootmise kõrvalprodukti (põlevkivigaas), kivisöe kui ka biomassiga. Märkimisväärselt suureneb mikro- ja hajatootmise osakaal ning kasvab tuuleenergia kasutus. ENMAK 2030 meetmete tulemusel paraneks mh elektrivõrkude ilmastikukindlus ning väheneks elektrikatkestuste aeg.

Igas valdkonnas (v.a elektritootmisstsenaariumites) koostati kolm stsenaariumit: mittesekkuv, vähesekkuv ning sekkuv. Elektritootmisstsenaariumites, kirjeldamaks võimalikult palju alternatiive, koostati viis stsenaariumit. Stsenaariumite tulemuste arvutamisel oli otstarbekas arvestada joonisel 1 kirjeldatud seoseid, kuivõrd tegevused ühes valdkonnas võivad avaldada märkimisväärset mõju teistele valdkondadele. Näiteks ei ole võimalik eeldada soojuskoormuse kasvamist kaugküttevõrkudes olukorras, kus rakendatakse aktiivset hoonete energiatõhususe edendamise poliitikat ning meetmeid. Seetõttu elamumajanduse ning soojusmajanduse stsenaariumeid edasistes analüüsides eraldi ei käsitletud.

ENMAK 2030+ valikukohad: energiamajanduse teekaardid ja nende võrdlemine

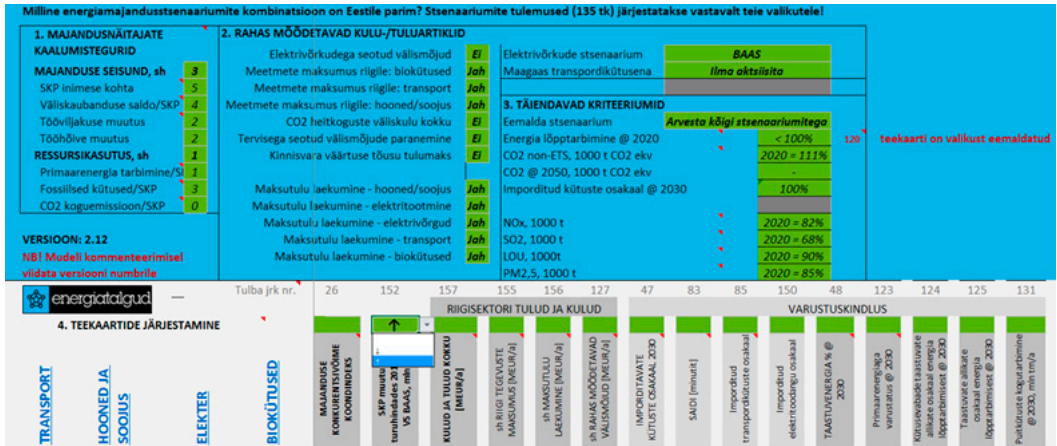
Eesti energiamajanduse võimalike teekaartide (stsenariumite meetmepakettide kombinatsioonide) arv väljendub kaasatud valdkondlike stsenariumite arvu korrutisena. Kuivõrd hoone- ja soojusmajandust on otstarbekas ühiselt käsitleda, saame võimalike stsenariumite kombinatsioonide arvuks $3 \times 3 \times 3 \times 5 = 135$ teekaarti. Energiamajandusstsenariumite koostamise meetodika on nähtav jooniselt 2.



Joonis 2. ENMAK 2030+ teekaartide koostamise ja võrdlemise ülesehitus ja meetodika (Möldre 2014b)

Figure 2. The compilation process of the Energy Roadmaps of Estonia 2030 (Möldre 2014b)

Eelnevast nähtub, et kõigi kombinatsioonide kirjeldamine on väga aja- ja andmemahukas. Seetõttu koostati teekaartide ühisel alusel võrdlemiseks ENMAK 2030 teekaartide mudel (joonis 3), mis koondab endas kõigi stsenariumite tulemusi ning nende mõjuindikaatorite väärtuseid.



Joonis 3. ENMAK 2030+ teekaartide mudel (Org ja Uiga 2014)
 Figure 3. Energy Roadmaps of Estonia 2030 (Org ja Uiga 2014)

Kuivõrd kõigile mõõdikutele võib igal ajahetkel omistada erinevat tähtsust, on keeruline kui mitte võimatu välja tuua üht indikaatorit, mille alusel valikuid teha. Seetõttu tuleb kõiki asjakohaseid mõõdikuid vaadelda koos, lähtudes neile kaalude andmisel parimast teadmistest olemasoleva olukorra ning tulevikuperspektiivide kohta. ENMAK 2030+ teekaartide tööriist võimaldab järjestada stenaariumite kombinatsioone lähtuvalt kasutaja valikutest ja eelistustest. 135 energiamajandusstenaariumi kombinatsiooni saab järjestada järgnevatel alustel:

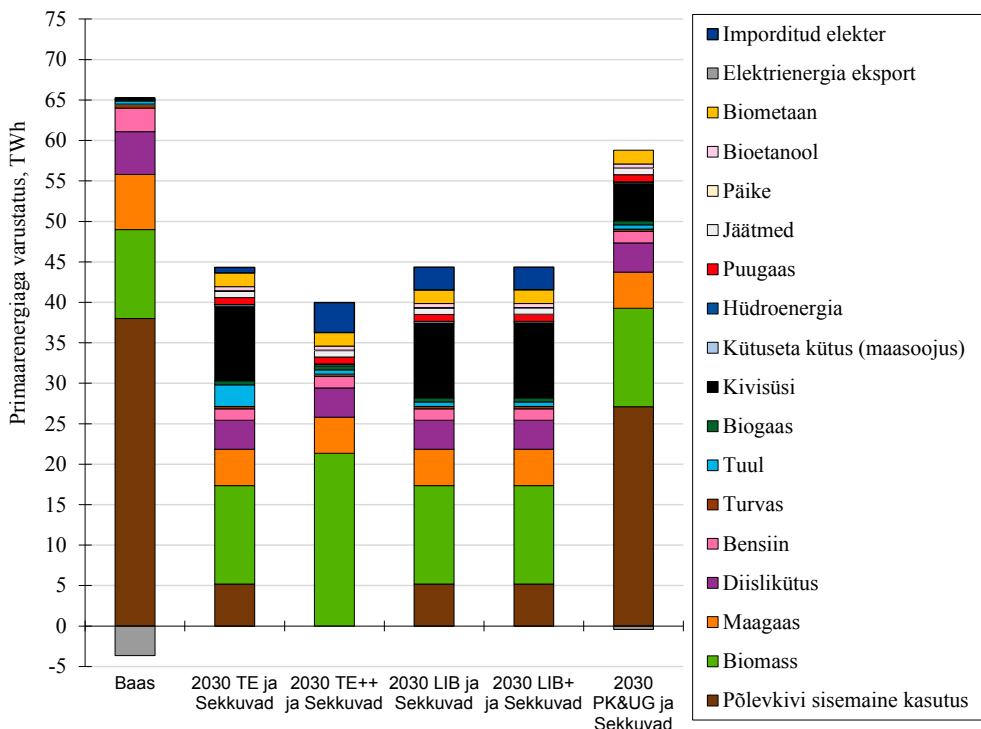
- 1) ENMAK 2030+ stenaariumite majandusmõjude hinnangu tulemused;
- 2) riigi (avaliku sektori) kulud ja tulud;
- 3) varustuskindluse näitajad;
- 4) õhuheitmed
- 5) keskkonna- ja tervisemõju indikaatorid.

Sealjuures tuleb arvestada, et iga tulemuse saavutamiseks on alati vaja teha teatud valikuid ning tegevusi.

Kõiki 135 stenaariumi käesolevas artiklis ei vaadelda. Kombinatsioonide arvu vähendamiseks saab kasutada kehtivate kohustuste (tabel 1) sihttasemeid. Rakendades kombinatsioonidele 2020. aasta energia lõpptarbimise eesmärki (32,8 TWh), jääb 135-st kombinatsioonist alles 15. Sealjuures tuleb mainida, et võrreldava tulemuse andsid siiski veel 15 teekaarti. Kuivõrd eelnimetatud 15 kombinatsiooni vastavad ühtlasi aastaks 2020 seatud eesmärgile SO₂, LOÜ ja PM_{2,5} ning NO_x vähendamise osas, pole kehivate kohustuste abil võrreldavate teekaartide arvu enam võimalik vähendada. Järelikult on otstarbekas edasiste otsuste tegemisel lähtuda võimalike mõõdikute väärtustest.

Tabel 4. ENMAK 2030+ teekaartide võrdlus mitmesuguste indikaatorite alusel
Table 4. Energy Roadmaps of Estonia comparison

Mõõdik	Ühik
MÕJU INIMESE SOTSIAALSETELE VAJADUSTELE JA VARALE	
<i>Riigisektori tulud ja kulud</i>	
1. Riigi tegevuste maksumus	mln €/a
2. Maksutulu laekumine	mln €/a
<i>Energiajulgeoleku, sh varustuskindluse tagamine aastal 2030</i>	
3. Imporditavate kütuste osakaal aastal 2030	%
4. Imporditud elektritoodangu osakaal aastal 2030	%
5. Taastuvenergia osakaal primaarenergias aastal 2030	%
6. Primaarenergiaga varustus aastal 2030	TWh
7. Kütustevabade energiaallikate osakaal energia lõpptarbimisest aastal 2030	%
8. Taastuvate energiaallikate osakaal energia lõpptarbimisest aastal 2030	%
<i>Tervisemõju vähenemine aastaks 2030</i>	
9. Tervisekadu (haiguskoormus) aastal 2030	DALY aastat
10. PM _{2.5} tingitud varajaste surmajuhtumite arv aastal 2030 (sisaldab ka PAH ja HCB mõju)	inimest/aasta
<i>Majanduse konkurentsivõime paranemine</i>	
11. SKP muutus 2015–2030 võrreldes mittesekkuva stsenaariumiga	%
12. Väliskaubanduse saldo muutus võrreldes mittesekkuva stsenaariumiga	%
13. Töövõime muutus võrreldes mittesekkuva stsenaariumiga	%
14. Tööhõive muutus võrreldes mittesekkuva stsenaariumiga	inimest/aasta
15. Energiamahukuse (primaarenergia/SKP) muutus võrreldes mittesekkuva stsenaariumiga	%
MÕJU VÄHENEMINE LOODUSKESKKONNALE	
16. Olelusringi analüüsi alusel mõju globaalsele soojenemisele aastal 2030	mln t CO ₂ ekv/a
17. Mõju ressursside ammendumisele aastal 2030	TWh
18. Ohustatud liikide arv aastal 2030	liiki/aasta
19. NO _x aastal 2030	1000 t/a
20. SO ₂ aastal 2030	1000 t/a
21. PAH aastal 2030	1000 t/a
22. HCB aastal 2030	kg/a
23. LOÜ aastal 2030	1000 t/a



Joonis 4. Primaarenergiaga varustus mitmesuguste energiamajanduse teekaartide korral
 Figure 4. Gross inland energy consumption of ENMAK 2030+ energy roadmaps

Tabelis 4 on kirjeldatud 23 mõõdikü väärtusi, mille alusel võrreldi teekaarte ENMAK 2030+ keskkonnamõjude strateegilise hindamise käigus. Nimetatud mõõdikute väärtused ning nende võrdlus ENMAK 2030 teekaartide lõikes on leitavad ENMAK 2030 keskkonnamõjude strateegilise hindamise (KSH) aruandest.

Vaadeldes EL-i indikatiivseid eesmärke aastaks 2030 näeme, et sihttasemed on seotud nii primaarenergia tarbimise kui ka kasvuhoonegaaside heitkoguste vähendamisega. Sealjuures peaks suurenema ka taastuvenergia osakaal. Primaarenergia tarbimine väheneks kõigi 15 teekaardi puhul (joonis 4) ning aastaks 2050 on nimetatud teekaartide rakendamisel võimalik saavutada kasvuhoonegaaside heitkoguste vähenemist analüüsiga hõlmatud sektorites > 80% võrreldes 1990. aastaga.

Kuivõrd kõigile mõõdikutele võib igal ajahetkel omistada erinevat tähtsust, on keeruline, kui mitte võimatu välja tuua üht indikaatorit, mille alusel valikuid teha. Seetõttu

tuleb kõiki asjakohaseid mõõdikuid vaadelda koos, lähtudes neile kaalude andmisel parimast teadmisesest olemasoleva olukorra ning tulevikuperspektiivide kohta. Sealjuures tuleb arvestada, et igapäevane elu oma kiirenevas muutumises toob paratamatult kaasa eelduste ja seoste muutumise. Sellest tulenevalt on, olenemata lõpuks valituks osutuvast teekaardist, ENMAK 2030+ elluviimiseks vaja koostada meetmete elluviimise jälgimise seireplaan või -süsteem ning moodustada laiapõhjaline konsortsium.

Kokkuvõte

ENMAK 2030+ koostamisel kirjeldati 135 erineva energiamajandusstsenaariumi tulemused ning vastavate valikute mõju keskkonnaseisundile, inimtervisele, varustuskindlusele ning majanduse konkurentsivõimele. Nimetatud teekaartide võrdlemiseks loodi ENMAK 2030 teekaartide mudel, mis sisaldab kõikide stsenaariumite kombinatsioonide tulemusi ning mõjuindikaatorite väärtuseid. Valdkondade stsenaariumite kombinatsioone (energiamajanduse teekaarte) saadi kokku 135, millest 120 ei täida energia lõpptarbimisele 2020. aastaks seatud eesmärki. Järelejäänud **15 kombinatsiooni** sisaldavad stsenaariume, kus hoone- ja soojusmajanduses ning transpordisektoris toimub aktiivne riigipoolne panustamine. Elektritootmises ning kohalike biokütuste tootmise stsenaariumite valikule 2020. aasta energia lõpptarbimise eesmärk piiranguna mõju ei avalda ning seega on tegemist ühiskondliku valikukohaga. Aastaks 2050 võimaldab eelnimetatud 15 stsenaariumi rakendumine kasvuhoonegaaside heitmete vähendamist >80% võrreldes 1990. aastaga. Sealjuures tuleb arvestada, et **stsenaariumi meetmete rakendamiseks ei piisa vaid riigi pingutustest arengukava rakendamise kaudu: vajalik on kõigi osapoolte (avalik sektor, lõpptarbijad ja ettevõtjad) koostöö.**

Kui olemasoleva olukorra jätkamisel me oma energiatarbimist ning seeläbi sõltuvust imporditavatest kütustest ei vähenda, siis parimate stsenaariumite korral saame saavutada tulemuse, kus aastaks 2030 väheneb transpordikütuste kasutamine ning kuni 27% transpordikütustest on asendatud kodumaiste biokütustega. Vaadeldes elamu- ja soojusmajandust ühtse tervikuna, näeme, et hoonete energiatarbimise kasvades (kuni 26,8% soojustarbimise vähenemist), tuleb teha radikaalseid muudatusi ka soojusvarustuses (sh üleminek lokaalküttele, kus kaugküte pole enam otstarbekas). Sealjuures tuleneb elumajanduse tegevustest (või tegematajätmistest) elektritarbimise kasv kuni 10%. Seda kõike on vaja arvestada elektrimajanduse (tootmine ja jaotamine) tegevuste planeerimisel, kus põhilisteks valikukohtadeks on muuhulgas energiatarbimise suurendamine tervikuna vs taastuvkütuste suuremahuline kasutuselevõtt ning küsimus, mil määral tahame olla elektri impordist sõltuvad. Kõigil tehtavatel valikutel on oma mõju, millelega valikute tegemisel tuleb arvestada.

ENMAK 2030+ eelnõudokument koostatakse Majandus- ja kommunikatsiooniministeeriumi poolt, võttes arvesse olemasolevat teadmist olemasolevate ning tulevikutrendide kohta. Kuivõrd kõigile mõõdikutele võib igal ajahetkel omistada erinevat tähtsust, on keeruline, kui mitte võimatu välja tuua üht indikaatorit, mille alusel valikuid teha. Seetõttu tuleb kõiki asjakohaseid mõõdikuid vaadelda koos, lähtudes neile kaalude andmisel parimast teadmisesest olemasoleva olukorra ning tulevikuperspektiivide kohta. Sealjuures tuleb arvestada, et igapäevane elu oma kiirenevas muutumises toob paratamatult kaasa eelduste ja seoste muutumise. Seetõttu on vajalik koostada ENMAK 2030+ meetmete elluviimise jälgimiseks seireplaan või -süsteem ning moodustada laiapõhjaline konsortsium, võimaldamaks ENMAK 2030+ täiemahulist elluviimist.

Tunnustus

Käesoleva artikli autorid tahavad tänada Majandus- ja kommunikatsiooniministeeriumi, stsenaariumite ning alusuuringute koostamisel osalenud eksperte, ENMAK 2030+ juhtgruppi kuuluvate asutuste ning ettevõtete töötajaid ning MKM-i Energeetikanõukogu liikmeid töhuga koostöö eest arengukava ettevalmistamisel.

Kõik käesolevas artiklis viidatud ENMAK 2030+ koostamise alusmaterjalid on kättesaadavad veebilehelt www.energiatalgud.ee/ENMAK. Nimetatud veebilehelt on leitav ka ENMAK 2030 KSH dokumentatsioon ja ENMAK 2030 eelnõu.

Kasutatud kirjandus

- MKM. Majandus- ja kommunikatsiooniministeerium. 2014. ENMAK 2030+. Eesti energiamajanduse arengukava aastani 2030. Eelnõu. Kättesaadav: <http://www.energiatalgud.ee/ENMAK>.
- Möldre, I. 2014a. Energiamaajanduse arengukava aastani 2030 (ENMAK 2030) keskkonnamõju strateegilise hindamise (KSH) programm. Kättesaadav: http://www.energiatalgud.ee/img_auth.php/2/25/ENMAK_2030_KSH_programm_Keskkonnaametile_17062014.pdf (12.10.2014).
- Möldre, I. 2014b. „Energiamaajanduse arengukava aastani 2030“ keskkonnamõju strateegiline hindamine. Kättesaadav: <http://www.energiatalgud.ee/ENMAK>.
- Org, M., Uiga, J. 2014. ENMAK 2030+ teekaartide mudel. Kättesaadav: <http://www.energiatalgud.ee/ENMAK>.
- Statistikaamet. 2014. Eesti Statistika aastaraamat 2014. Kättesaadav: <http://www.stat.ee/72570> (15.10.2014).
- Vabariigi Valitsus. 2013. „Energiamaajanduse arengukava aastani 2030“ koostamise ettepanek. Kättesaadav: https://valitsus.ee/sites/default/files/content-editors/arengukavad/enmak_koostamise_ettepanek.pdf (12.10.2014).

World Energy Council. 2013. World Energy Scenarios. Composing energy futures to 2050. Kättesaadav: http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/10/World-Energy-Scenarios_Composing-energy-futures-to-2050_Full-report1.pdf (15.10.2014).

WHAT IF...?

ENMAK 2030+: THE CHOICES IN THE DEVELOPMENT OF THE ESTONIAN ENERGY SECTOR

Jaanus Uiga, Irje Möldre, Lembit Vali, Peep Siitam

The choices made in the development of the energy sector have an impact to almost every field of life. The energy prices amount to a significant proportion in the total household expenditures, regional development and human health are tightly connected with the policy choices in heating and housing sectors. Land-use and rural activities are in turn influenced by the possible production of biofuels. Almost every action in the energy sector has, to a greater or a lesser extent, an impact to the environment.

In the current article, a short overview of the possible future scenarios for the Estonian energy sector and of their possible effects on human health, environment, security of supply and economy, are observed through the main results of the studies and analysis made during the compilation of the Long-term Development Plan of the Estonian Energy Sector.

Out of the 135 possible future scenarios (energy roadmaps), 15 remained after checking the results against the energy consumption target of 2020. Those 15 roadmaps include scenarios, where in housing, heating and in transport, active measures are taken by the government to influence those sectors. Nevertheless, only governmental measures will not help us attain the best roadmaps. The future of the Estonian energy sector is shaped by the cooperation between the public and the private sectors and the final consumers.

OMAENERGIA 2050 – LÕUNA-EESTI ENERGIASÕLTUMATUSE KONTSEPTSIOON

Kalle Virkus

Tartu Regiooni Energiaagentuur, Riia 181a
kalle.virkus@trea.ee

Annotatsioon

Fossiilkütuste reservide kahanedes on ees vältimatu üleminek taastuvenergia allikatele. Seejuures muutub endisest tähtsamaks kõik, mis on seotud kohalike oludega – eriti energia ja inimressursid. Antud kirjutus analüüsib Lõuna-Eesti võimalust tulla toime ilma fossiilsete kütusteta ja energiakandjaid regiooni sisse toomata.

Märksõnad: bioenergia, biomass, taastuvenergia, Lõuna-Eesti, elukorraldus, renoveerimine, energiatõhusus, transport.

Sissejuhatus

2013. aastal valmis TREA poolt BIO-EN-AREA projekti raames uurimus „Biomassi kasutamine energeetikas Lõuna-Eesti regioonis“ (Uiga 2013). Selle loogilise jätkuna oleme töötanud välja kontseptsiooni energiasõltumatust Lõuna-Eesti regioonist. Lõuna-Eesti regiooni all peetakse siin silmas kuut maakonda Lõuna- ja Kagu-Eestis: Jõgeva, Põlva, Tartu, Valga, Viljandi ja Võru maakonda. Nende kuue maakonna 15 500 ruutkilomeetrit elab 322 000 inimest.

Kontseptsiooni väljatöötamise ajenditeks on inimtekkeline kliimasoojenemine ja vajadus selle leevendamiseks vähendada oluliselt fossiilsete kütuste kasutust, samuti fossiilsete kütuste kui lõpliku ressursi vähenemine. Sellest tulenevalt on vaja analüüsida, kuidas toimiks regionaalne kogukond ilma fossiilsete kütusteta.

Nafta kui peamise fossiilkütuse ammutamine maapõuest väheneb iga-aastaselt 4–6%. Suurem osa energiamajandusega tegelevaid teadlasi ja uurijaid toetavad naftatipu teooriat, mille kohaselt iga piiratud ressursi nagu ka nafta kasutamine kasvab kuni maksimumi ja hakkab seejärel langema. Maailma toornafta ammutamise tipp langes aastasse 2005 ja kuigi praegune kildanafta kasutamine USA-s on langustrendi mahendanud, ei ole naftatootmise suurenemist enam ette näha. Seepärast on oluline analüüsida võimalusi, kuidas ilma fossiilkütusteta toime tulla.

2011. aastal kasutati Lõuna-Eesti regioonis energiat 19 861 TJ, millest taastuvkütusest saadud energiat oli 7411 TJ ja fossiilseid transpordikütuseid 8122 TJ (Uiga 2013). Taastuvatest allikatest saadud primaarenergia osakaal oli 37,3%. Valdava enamiku viimasest

moodustas biomassist saadav soojusenergia. Lõuna-Eesti biomassist saadava energia potentsiaalne ressurss on seejuures 15 328 TJ. Seega on biomassist saadav ressurss piisav, katmaks regiooni energiavajadust, välja arvatud transpordikütused. Transpordi puhul tuleb tarbimist oluliselt vähendada, suurendades energiatõhusust ning vähendades olulisel määral vajadust transpordi järele.

Teisalt on selge, et üle 50% kogu tarbitavast energiast kulub hoonetele – nende ehitamisele, kütmisele ja korrashoiule (Euroopa 2010). Hoonetes on ka suurim potentsiaal energia kokkuhoiuks.

OMAENERGIA 2050 lähtub kuuest põhimõttest:

- energeetika – kohalik, hajutatud, taastuv;
- madala ja 0-energiatarbega hooned;
- läbi mõeldud ja energiatõhus transpordikorraldus;
- väärtuspõhine, madala energiatarbega majandus;
- ressurssidele ja võimalustele vastav elukorraldus;
- kodanike kõrge teadlikkus ja aktiivsus.

Kohalik hajutatud ja taastuv energeetika

Nagu juba eespool kirjeldatud, on Lõuna-Eesti regioonis hulgaliselt potentsiaali energia tootmiseks biomassist. Enamikus maapiirkondades on praegugi energia allikaks biomass – puit. Jätkuvalt viiakse fossiilkütuselt hakkepuidule üle ka olemasolevaid kaug- ja lokaalse kütte seadmeid. Suuremate keskuste kaugküte on soovitatav üles ehitada koostootmisjaamadena. Hetkel on regiooni suurim Lohkvas asuv keskküttekatlama ja Fortum Tartu, mis kasutab kütuseks valdavalt biomassi ja varustab soojusega Tartu linna, andes aastas keskmiselt 341 GWh soojusenergiat ja 172 GWh elektrienergiat (Fortum 2014). Viimane moodustab poole elektrienergiast, mida Tartu linn vajab (Uiga 2014).

Täiendavalt lisandub regioonis pidevalt ka elektri mikrotootjaid, kes on paigaldanud oma kinnistutele PV-paneele. Paneelide hinna edasine vähenemine ja võrguga liitumise lihtsustumine kindlasti kiirendab seda protsessi.

Madala ja 0-energiatarbega hooned

Nagu öeldud, kulub meie kliimavööndis hoonetele üle 50% kogu tarbitavast energiast. Väga madala, 1–2% hoonete asenduse tempo juures on nende energiatarbimist võimalik vähendada peasjalikult olemasolevate hoonete energeetilise renoveerimise teel. Siiski

võib arvestada, et seoses uute energiatõhususe miinimumnõuetega (alates 09.01.2013) ja oletatava elamispinna uuendamise tempoga 1% praegusest tasemest aastas, on aastaks 2050 energiatõhusat uut elamispinna 30% olemasolevast. Kui oletada, et olemasolevate elamute renoveerimise tempo on 1,5% aastas ja jätkuvalt on olemas riigi finantsabi, on renoveeritud liginullenergiahooneid koos uusehitustega 75% praegusest elamispiindade mahust. Kindlasti on aastaks 2050 osa ebatõhusat elamispinna käibest väljunud ja elanikkond vähenenud.

Euroopa Liit rõhutab omavalitsuste ja riiklike institutsioonide juhtivat ja eeskujut andvat rolli renoveerimistegevuse juures. Seepärast peaks haldusasutused tegutsema liginullenergia standardile vastavates hoonetes vähemalt aastaks 2030.

Seejuures tuleb uute hoonete ehitamisel meeles pidada, et kui säästlikkust mõõdetakse energia kuluga ruutmeetri kohta aastas, siis on n-õ ilusa numbri saavutamiseks võimalik nii energiakulu vähendada kui ka ruutmeetreid suurendada. Nii on ka Eesti normide („Energiatõhususe miinimumnõuded“) kohaselt 300-ruutmeetiline maja automaatselt energiatõhusam kui samu konstruktsioone ja materjale kasutades ehitatud 75-ruutmeetiline maja, samas kui energiat kulub esimeses elades vähemalt kaks korda rohkem, rääkimata suuremast hulgast ehitusmaterjalidest ja nendes asjastunud energiast.

Läbimõeldud ja energiatõhus transpordikorraldus

Ühendriikide linnaplaneerija Jeff Speck on väitnud (Speck 2014), et kui me vahetaksime kõik hõõglambid oma kodudes LED-lampide vastu, siis hoiame me ühe aasta jooksul kokku päris märgatava koguse energiat. Kui me aga loobume tööle minemiseks auto kasutamisest, hoiame me sama koguse energiat kokku nädalaga. See tähendab näiteks, et liginullenergiahoonete ehitamine põldudele, kuhu valglinnastumise laine need kannab, võib küll olla näiliselt säästlik, aga energia tarbimise seisukohast lausa hukatuslik. Nii tulekski üksikute ülisäästlike majade asemel planeerida pigem jalgsi liiklemise võimalusi linnades.

Vaadates regiooni energiabilanssi ja olemasolevat potentsiaali taastuvenergia tootmiseks, saab kohe esmapilgul selgeks, et suurimaks probleemiks selles piirkonnas on transport. Kuigi vajadus transpordi järele seoses kütuste kallinemise ja tööhõive struktuuri muutusega ilmselt väheneb, oleks palju kasu hästi korraldatud ühistranspordist. Seejuures võiks eeskujuks olla muu maailma kogemused, kuidas vähendada (fossiilsete) kütuste tarbimist transpordisektoris. Näiteks arendatakse Oregonis Portlandis laialt ulatuslikult jalgrattaradasid (Donahue 2012) ja Helsingi linn püüab aastaks 2025 muuta

auto omamise mõttetuks, arendades jõuliselt infotehnoloogial põhinevat ühistranspordisüsteemi Kutsuplus (Kutsuplus 2014). Loomulikult on transpordivajaduse vähendamine seotud ka muude meetmetega, mis vähendaksid liikumisvajadust erinevate asustatud punktide vahel.

Väärtuspõhine, madala energiatarbega majandus

Olles regioon, kus puuduvad suure energiatihedusega ressursid, ei ole ilmselt mõeldav energiamahuka tööstuse arendamine. Samas on Lõuna-Eestis juba praegu olemas alus spetsialiseerumiseks tööjaotuses teiste regioonidega. Metsast saab lisaks energiamajanduses kasutatavale biomassile toorainet ka muudele puitu kasutatavatele majandusharudele ja sektoritele, nagu mööblitööstus, puitmajade ehitamine ja loodusmajandus. Seejuures on oluline ka metsa jätkusuutlikkuse tagamine, st taimekasvatuse ja sordiaretuse edendamine. Loomulikult on väga oluline ka põllumajandus. Seoses rahvaarvu kasvuga maailmas, vee- ja põllumaa varude vähenemisega muutub toidu tootmine rahvusvaheliselt olulisemaks. Teisest küljest on regioonis kahe ülikooli ja mitme rakenduskõrgkooli näol tugev hariduse potentsiaal.

Seoses fossiilkütuste vähenemisega võib arvata, et põllumajanduses tegutsevate inimeste arv tulevikus kasvab ning selle tulemusel suureneb paiksus ja väheneb transpordivajadus.

Ülaltoodud seisukohad langevad kokku põhjalikuma Lõuna-Eesti nutika spetsialiseerumise strateegia valdkondadega (Raagmaa 2014):

- a) puidutööstus (eelkõige selle üks nišš – puitmajaehitus);
- b) IT ja elektroonika;
- c) toiduainetööstus (eelkõige piimandus ja funktsionaalne toit);
- d) tervise teenused ja biomeditsiin.

Ressurssidele ja võimalustele vastav elukorraldus

Kui me soovime kvaliteetset elu, siis oma praegust, energiamahukat elustiili me ilmselgelt jätkata ei saa. Arvata võib, et 35 aasta pärast ei ole puhtmajanduslikult võimalik tänapäeval normaalsena näiv pendelränne kümnete kilomeetrite kaugusele või saavad seda endale vaid vähesed võimaldada. Pigem saab tegemist olema kaugtööga ühel või teisel moel. Kindlalt ei saa väita, kas säästlik on elada maal või linnas. Küll saab väita, et säästlikum on see eluviis, mis on integreeritud kohaliku kogukonnaga. Eesmärgiks on eluviisi kohandamine energia olemasoluga mingil hetkel. Piltlikult tähendab see, et pesumasin pannakse käima siis, kui päike paistab, ja puid saetakse siis, kui tuul puhub.

Palju olulisemaks muutuvad kogukondlikud suhted ja tööjaotus. Seejuures võib kogukonna moodustada ka üks suur korterelamu. Sedamööda, kuidas energeetika muutub kohalikuks ja hajutatuks, muutub sarnaselt ka kogu muu elukorraldus.

Kodanike kõrge teadlikkus ja aktiivsus

OMAENERGIA 2050 kõige kriitilisem komponent on kodanike teadlikkus. Kodanikud ja kogukonnad peavad olema teadlikud toimuvatest muutustest ja püstitatud eesmärkidest. Kõige paremal juhul peavad kogukonnad ise olema võimelised seadma omale arengueesmäärke, mis oleksid realistlikud ja mille elluviimiseks suudaksid kogukonnad ise või koostöös teiste kogukondadega leida ressursse.

Kogukondlikud tegevusgrupid on juba olemas paljudes Lõuna-Eesti linnades ja asulates. Selle protsessi edendamisel on suur osa poliitikutel ja meedial. Kodanikualgatus peab muutuma konkreetseks jõuks, mille tegevused oleksid sisukad ning tulemuslikud.

Muutumine fossiilenergiavabaks

Fossiilsete energiaallikate vähenemine on tõsiasi, millega tuleb arvestada edasiste pikaajaliste plaanide koostamisel. Sarnaseid plaane koostatakse mitmel pool mujal maailmas riiklikul eestvedamisel. Rootsil on plaan muutuda aastaks 2050 fossiilenergiavabaks, Saksamaa programm „100% Erneuerbare-Energie-Regionen“ hõlmab enam kui 100 regiooni Saksamaal, vastav programm on ka Austria (<http://www.100-ee.de>). Eesti võimalused analoogset programmi ellu viia on suurepärased, arvestades meie taastuvenergia ressursi metsa, tuule ja päikese näol. Põlevkivi oleks taastuvenergia regioonide käivitamise ajal toetavaks ja reservenergia allikaks.

Nimetatud riikides on vastavate programmide elluviijateks kohalikud omavalitsused, kel on riigi tugi. Eestis ei ole kahjuks selliste võimaluste, volituste ja õigustega omavalitsusi. Küll oleks võimaluseks formaliseerida riikliku infrastruktuuri tegelikkuses välja kujunenud jaotus ametlikuks administratiivseks jaotuseks: Virumaa, Lõuna-Eesti, Lääne-Eesti, Põhja-Eesti ja Saarte regioonideks või piirkondadeks, mis oleksid bioenergia kasutamiseks ka loogilise suurusega. Lõuna-Eestis, kus potentsiaal transpordikütuste tootmiseks on väike, on fossiilkütusteta hakkama saamine võimalik, kuid eeldab radikaalseid muudatusi senises tavapäraseks peetavas elukorralduses.

Kokkuvõte

Maailma fossiilkütuste varude ammendumises on oluline analüüsida võimalusi regionaalse energiapuuduse tagamiseks. Lõuna-Eesti kuue maakonna aladel on piisavalt

biomassi, et tagada regiooni soojusenergia vajadus. Sellegipoolest tuleb võtta kasutusele meetmeid energia tarbimise vähendamise suunas, eriti valdkondades, mis puudutavad hooneid, sest seal on tarbimine suurim.

Fossiilseid transpordikütuseid ei ole võimalik tänapäevase tarbimise mahus taastuvatega asendada. Seega osutub vajalikuks transpordivajaduse vähendamine, millega kaasnevalt muutub kogu elukorraldus kogukonnakesksemaks.

Kasutatud kirjandus

Uiga, J., Kikas, M., Muiste, M. 2014. Biomassi kasutamine energeetikas Lõuna-Eesti regioonis. <http://www.trea.ee/pagas/Biomassi%20kasutamine%20energeetikas%20L%C3%B5una-Eesti%20regioonis.pdf> (15.10.2014).

EUROOPA PARLAMENDI JA NÕUKOGU DIREKTIIV 2010/31/EL hoonete energiatõhususe kohta. 19. mai 2010.

Fortum 2014. <http://www.fortum.com/en/energy-production/combined-heat-and-power/estonia/pages/default.aspx>.

Uiga, J. 2014. Tartu linn – linnapeade pakt ning SEAP. http://trea.ee/pagas/Meshartility/SEAP%20ja%20BEI_Tartu_10042014.pdf.

Speck, J. 2014. ASLA. <http://www.asla.org/ContentDetail.aspx?id=26394>.

Donahue, B. 2012. America's Best Bike City: Portland, Oregon – Bicycling. <http://www.bicycling.com/news/advocacy/americas-best-bike-city-portland-oregon>.

Kutsuplus 2014. <https://kutsuplus.fi/home>.

Raagmaa, G., Lilles, A., Ernits, R., Varblane, U., Looga, J., Viiol, K. 2014. Tartu ja Lõuna-Eesti nutika spetsialiseerumise strateegia 2014. Tartu Ülikool, RAKE. <http://www.100-ee.de>.

OMAENERGIA 2050 - A CONCEPTUAL APPROACH TO REGIONAL ENERGY INDEPENDENCE

Kalle Virkus

In a world of diminishing reserves of fossile fuels there is a necessity to divert energetics from fossile to renewable energy sources. This paper outlines a concept and major points of discussion for a process to establish an energy independent region in Southern Estonia consisting of 6 counties: Jõgeva, Põlva, Tartu, Valga, Viljandi and Võru. There are 6 underlying themes to facilitate the turn from fossile to RES in Southern Estonia: a) local and dispersed electricity generation, b) low and near zero energy houses, c) well balanced public transport system, d) value based and low energy input economy, e) adequate low energy input way of life and f) high citizen awareness.

VÄIKETUULIKU OPTIMAALSE MASTIKÕRGUSE ANALÜÜS

Jaanus Uiga, Alo Allik, Andres Annuk

Eesti Maaülikooli tehnikainstituut, Fr. R. Kreutzwaldi 56, Tartu 51014

jaanus.uiga@emu.ee

Annotatsioon

Väiketuulikuid paigaldatakse enamasti majanduslikel eesmärkidel, kuid neid on paigaldatud ka esteetilistele või emotsionaalsetele põhjustele tuginedes. Kui tuulegeneraatori paigaldamise eesmärgiks on lisaks taastavast energiaallikast elektri tootmisele ka tulu teenimine, on otstarbekas leida majanduslikult optimaalne lahendus, milleni jõudmine hõlmab sealjuures mitmeid aspekte, nagu soodsa asukoha, sobiliku elektrituuliku ja kasutatava masti kõrguse valikut.

Käesolev artikkel kirjeldab Eesti tuuleenergia klatri tellimusel koostatud uuringu „Väiketuuliku optimaalse mastikõrguse analüüs“ (Uiga jt 2013) põhitulemusi. Nimetatud uuring koostati eesmärgiga analüüsida kahe Eestis realselt töötava väiketuuliku tootlikkust nende olemasoleval paigalduskõrgusel ning võimalikku tootlikkust, kui tuuliku paigaldamisel oleks kasutatud kõrgemat masti.

Märksõnad: elektrituulik, väiketuulik, tasuvusaeg, tuule kiirus, mast, toodang.

Sissejuhatus

Tuuliku labadele mõjuva tuule kiirus ning kvaliteet (õhuvoo turbulentsivaba voolamine) sõltuvad suuresti paigaldatava elektrituuliku kõrgusest. Seetõttu on just väiketuulikute (VT) paigaldamisele mõeldes otstarbekas uurida piirkonna tuuleolusid ning leida tuulegeneraatorile õige kõrgus. Oluline on, et elektrituulik paikneks kõrgemal läheduses olevatest takistustest. Kui tuulikut tahetakse püstitada metsaga kaetud või hoonestatud alade ligidale, võib esialgselt soovitud elektritoodangu saavutamiseks vajaliku masti kõrgus kujuneda majanduslikult ebamõistlikuks. Masti maksumuse suurenemine on otseselt seotud masti kõrgusega (Eesti Tuuleenergia Assotsiatsioon 2012).

Tavaliselt hakkab elektrituulik tööle siis, kui tuule tugevus on 2–3 m/s ja saavutab niivõimsuse tuule kiirusel 8–12 m/s. Tuule kiirus üle 20–25 m/s muutub elektrituulikutele ohtlikuks ja tuulik tuleb peatada. Valmistatakse ka tormikindlaid tuulikuid, mis võivad töötada tuule kiirusel kuni 60 m/s. Tuule kiirust üle 20 m/s esineb Eestis ca 10 korda aastas üksikute puhangutena ning see ei kujuta märkimisväärset ohtu tuulikute tööle (Eesti Tuuleenergia Assotsiatsioon 2012).

Väiketuulikute klassifikatsioon erineb riigiti ning kasutatavateks eristavateks parameetriteks on nii tuuliku väljundvõimsus, tiivikuringi pindala kui ka kõrgus. Eestis on väiketuulik defineeritud kui tuulik kogukõrgusega kuni 30 m (Eesti Tuuleenergia Assotsiatsioon 2012). Väiketuuliku põhiliseks otstarbeks on varustada elektriga ühte objekti – elamut, talu, väiketootmist.

Analüüsitud objektid

Analüüsimeks, kui palju mõjutab väiketuuliku masti kõrgus energiatoodangut ja see-
ga ka tuuliku tasuvusaega, valiti välja Eestis kaks hiljuti paigaldatud väiketuulikut.
Analüüsitud tuulikud on näha jooniselt 1. Kumbki tuulik on paigaldatud kolmest osast
koosneva hüdrauliliselt langetatava torumasti otsa. Tuuliku masti pikkusena käsitletak-
se käesolevas töös tuuliku tiiviku rummu kõrgust maapinnast.



Joonis 1. Analüüsitud väiketuulikud – a) väiketuulik 1 (VT-1) ning b) väiketuulik 2 (VT-2)
Figure 1. Analyzed Small Wind Turbines – a) VT-1; b) VT-2

VT-1 on Konesko AS-i 2012. aasta sügisel paigaldatud elektrituulik, mis asub Väike-
Maarja vallas. VT-2 paigaldas Bakeri OÜ 2012. aasta kevadel Saaremaale. Mõlema
tuuliku nimivõimsus on 10 kW.

Väiketuulikute analüüsimise ajavahemik ning selleks kasutatud andmed on toodud tabelis 1. Tuule kiirust mõõdeti lisaks tuuliku tiiviku rummu kõrgusele veel kahel kõrgusel.

Tabel 1. Tuulekiiruse mõõtmise algandmed
Table 1. Initial data of the measurements

Parameeter	Pandivere	Saaremaa
Mõõtemasti paigaldamine	Okt 2013 (lõpp)	Nov 2013 (algus)
Mõõtemasti demonteerimine	Dets 2013 (lõpp)	Jaan 2014 (algus)
Tuulemõõtmiste andmed	~2 kuud	~2 kuud
Tuuliku tiiviku rummu kõrgus, m	18	16
Mõõtekõrgus 2, m	26	26
Mõõtekõrgus 3, m	40	40
Tuule suuna mõõtmine (40 m kõrgusel)	Jah	Jah
Toodangu andmed	Sept – dets 2013	Nov 2013 – jaan 2014
Elektrituuliku paigaldaja	Konesko AS	Bakeri OÜ
Elektrituuliku teor. nimivõimsus, kW	10	10

40 m kõrgused tuulemõõtemastid (joonis 2) tarnis ja mõõtmised tegi OÜ Uulu Elekter, kes kasutas selleks firma Wilmers Messtechnik GmbH loggereid Wilog 306, firma Thies Clima kopp-anemomeetreid (tüüp 4.3303.22.000) ning Thies Clima tuulesuunamõõtlaid.



Joonis 2. VT-2 ning mõõtemast, vaade lõunakaarest

Figure 2. VT-2 and the wind speed measurement mast used: a view from the southside

Arvutusmetoodika

Nii tuulekiiruste mõõtmised kui ka arvutused koostati lähtudes standardi EVS-EN 61400-12-1:2006 (Eesti Standardikeskus 2006) üldpõhimõtetest.

Analüüsis kasutatud metoodika üldkirjeldus on järgmine:

1. Komplekteeriti andmestik tuulekiiruse ning -suuna mõõtmistulemuste kohta nii tuulegeneraatorilt kui ka mõõtemastilt saadud andmete abil.
2. Analüüsis kasutati kümne minuti keskmisi andmeid.
3. Mõõdetud andmestikust eraldati järgmised väärtused, mille korral:
 - a) tuule suund oli mõõtmise jaoks halvas sektoris (elektrituulik ise mõjutas mõõtmist);
 - b) mõõteseadmestikus oli viga;
 - c) ilmastikutingimused jäid väljapoole tuulegeneraatori tööparameetreid.
4. Mõõteperioodi tuulekiiruse tulemusi laiendati ühe aasta pikkusele perioodile, eeldades Rayleigh' jaotust.
5. Toodangu arvutamisel kasutati tuuliku teoreetilisi tunnusjooni.
6. Mõõdetud tuulekiiruste andmestikuga ja tehase tunnusjoonte abil arvutati tuuliku eeldatav elektritoodang mitmesuguste mastikõrguste juures.
7. Saadud sisendeid kasutati majandusarvutuse koostamisel.

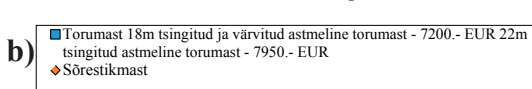
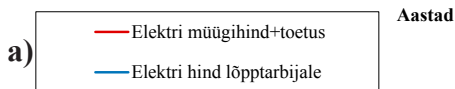
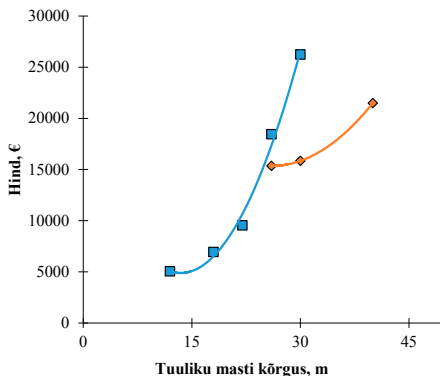
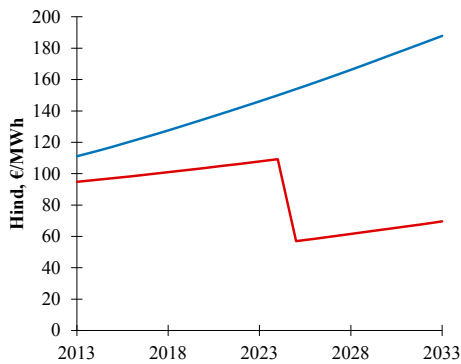
Analüüsi lähteülesande kohaselt tuli leida kahe olemasoleva väiketuuliku jaoks optimaalne masti kõrgus, kasutades mõõdetud tuulekiirust ning tuulegeneraatorite arvutuslikku toodangut mitmesugustel kõrgustel. Sealjuures lähtuti eeldusest, et arvutused koostatakse olukorrale, kus kõrgema masti kasuks oleks otsustatud juba algselt. Seetõttu koostati majandusarvutus, lähtudes järgmistest andmetest:

1. Kõrgema masti kasutamise ning paigaldamisega seotud lisanduvast soetusmaksumusest, eurodes (eeldatakse, et paigaldusmaksumus ei sõltu hüdrauliliselt tõstetava ning langetatava masti puhul masti kõrgusest).
2. Kõrgema masti kasutamise saadavast lisanduvast arvutuslikust elektritoodangust ning sellest saadavast tulust (€/a).
3. Ülejäänud kulud (generaator, hooldus, võrguga liitumine jms) kõrgema masti paigaldamisega seoses ei muutu.
4. Hindade ning maksumuste puhul on arvestatud käibemaksu (20%) tasumisega.

Majandusarvutused koostati järgmiste stsenaariumite jaoks:

- a) toetuseta – investeering tehakse täielikult omavahenditest;
- b) toetusega – 70% investeeringu maksumusest finantseeritakse toetuse abil;
- c) 50-50 – investeering tehakse täies ulatuses omafinantseeringu abil, 50% toodetud elektrist kasutatakse ära kohapeal, 50% elektrist müüakse võrku (esimesed 12 aastat saadakse taastuvenergiatoetust 53,7 €/MWh).

Stsenaariumiteüleste eeldustena kasutati diskontotegurit (6%), elektri hinda lõpptarbija-
le ja tootjale ning väiketuulikute mastide hindu (joonis 3).



Joonis 3. Stsenaariumiteüleised eeldused: a) elektri hinna prognoos (Energiatalgud.ee 2013; Rahandusministeerium 2013), b) väiketuulikute mastide maksumusi (Konesko AS 2013)

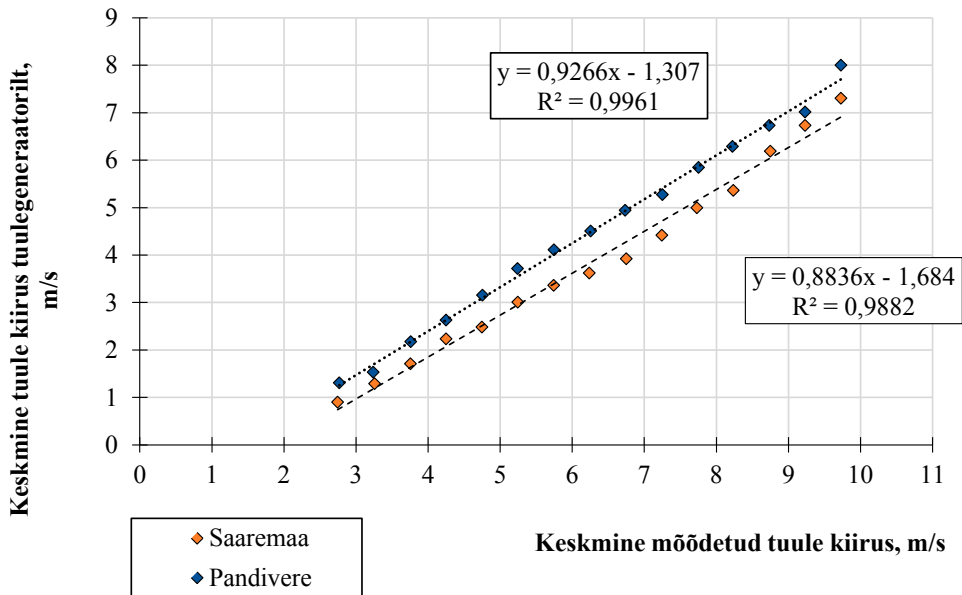
Figure 3. Scenario assumptions: a) electricity price prognosis (Energiatalgud 2013; Rahandusministeerium 2013), b) Cost of Small Wind Turbine Towers (Konesko AS 2013)

Tuleb arvestada, et taastuvast allikast toodetud elektri müümisel võrku moodustub saadav tulu börsihinna ning taastuvenergia tasu koosmõjul (v.a juhul, kui elektrituulik on paigaldatud investeringutoetusega). Tootjatoetust makstakse kehtiva „Elektrituruseaduse“ kohaselt esimesed 12 aastat.

Sõrestikmastide kasutamist käsitleti töös alates 26 meetrist, kuivõrd nende mastide maksumus on sellest kõrgusest alates odavam ning nimetatud maste on võimalik samuti hüdrauliselt tõsta ning langetada. Senini ei ole kõrgete, üle 30 meetri, sõrestikmastidega elektrituulikuid Eestis paigaldatud ning seega on 40-meetrise ja pikema masti kasutamine väiketuulikul esialgu pigem teoreetiline, kuid siiski mitte tehniliselt võimatu.

Tulemused ja arutelu

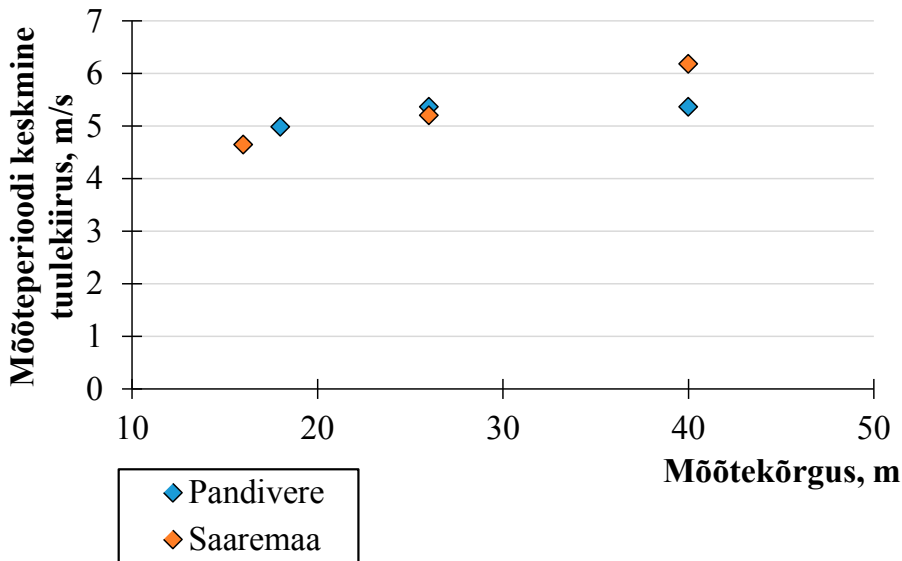
Analüüsi käigus mõeldeti tuule kiirust nii 40 m, 26 m kui ka kasutusel oleva masti generaatori lõppkõrgusel. Kuigi töös ei planeeritud uurida, kuidas mõjutab tuuliku tiivik tööolukorras elektrituulikul paiknevat tuulekiiruse mõõteseadet, selgus see siiski analüüsimise käigus (joonis 4).



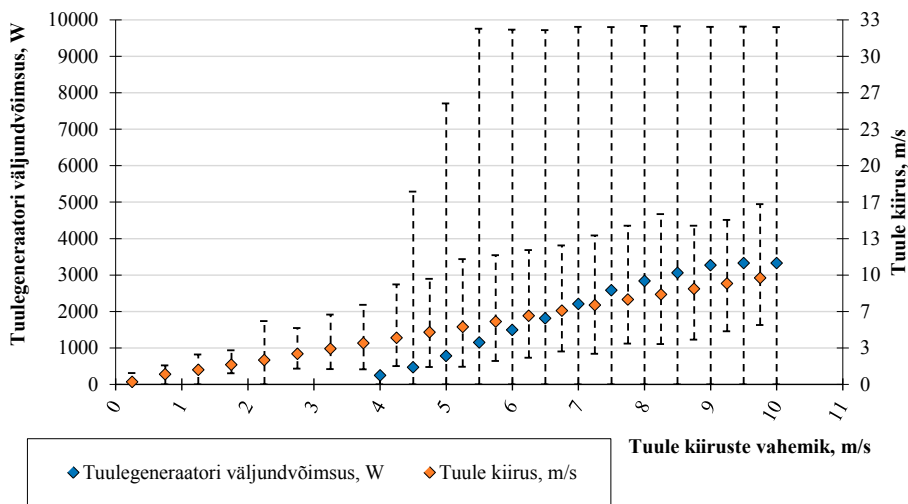
Joonis 4. Keskmine tuule kiirus mõõdetuna tuulegeneraatorilt ning mõõtemastilt
 Figure 4. Average wind speed measured from the measurement mast and from the wind turbine

Joonisel on näha, et olukorras, kus tuulegeneraator töötab, on tegelik keskmine tuule kiirus märksa suurem tuulegeneraatoril paikneva mõõteseadme näidust. Sealjuures juhul, kui tuule suund muutub ning tuulegeneraatori tiivik tuulest välja pöördub, on tuulegeneraatoril paiknevalt mõõteseadmelt võimalik näha maksimaalväärtusi, mis tegelikku olukorda ei kirjelda. Keskmist tuulekiirust kogu mõõteperioodi ulatuses kirjeldab joonis 5.

Keskmine tuule kiirus mõõteperioodil mitmesugustel kõrgustel jäi vahemikku 5...5,99 m/s (Pandivere) ning 5...6,44 m/s (Saaremaa). Elektrituliiku väljundvõimsus sõltub suuresti tuuleoludest. Kui joonisel 5 on näha ligikaudu kahe kuu pikkuse perioodi keskmised tuulekiirused, siis isegi kümne minuti keskmisi andmeid kasutades tuleb arvestada, et nimetatud kiirus kirjeldab suhteliselt pika ajaperioodi keskmist. Kui tuule suund või tugevus kümne minuti jooksul muutuvad, siis muutub vastavalt ka tuulegeneraatori väljundvõimsus. Joonisel 6 on näitena toodud Pandiveres paikneva elektrituliiku väljundvõimsuse ning keskmise tuulekiiruse väärtustevahemikud.



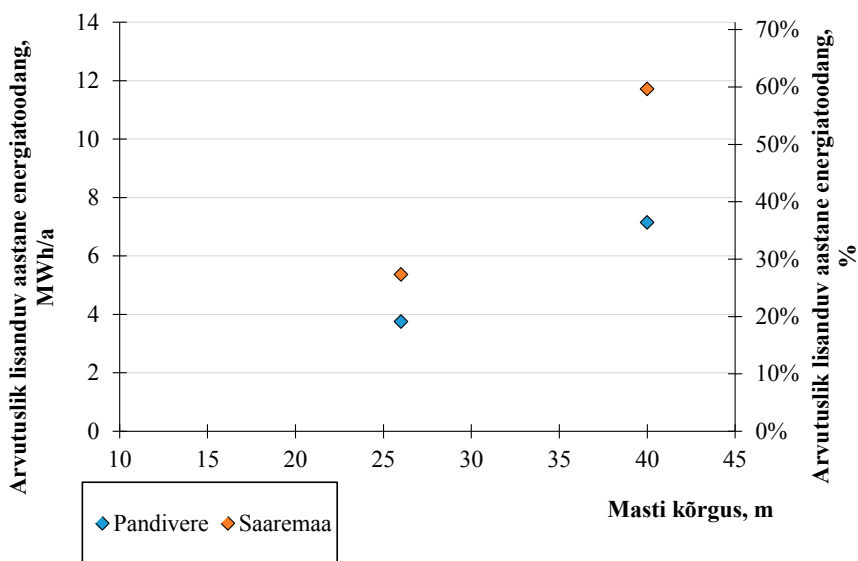
Joonis 5. Keskmise tuulekiirustuulikute asukohas mitmesugustel kõrgustel
 Figure 5. Average wind speeds in the location of the wind turbines



Joonis 6. VT-1 keskmised väljundvõimsused ning tuule kiirus 0,5 m/s tuulekiiruse vahemike juures
 Figure 6. Average power output from WT-1 and average wind speeds in the location using 0,5 m/s bins

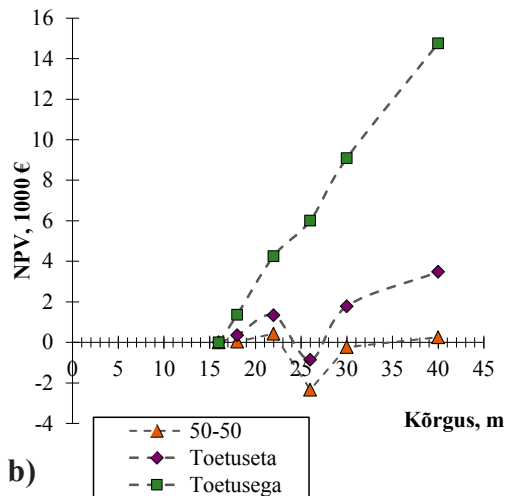
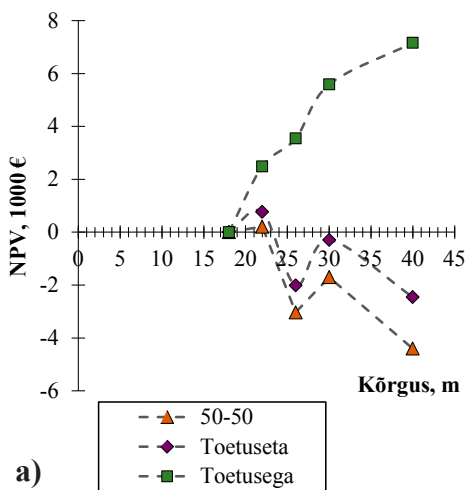
Jooniselt on näha, et kuivõrd tuule kiirus varieerub suhteliselt suurtes piirides, on varieeruv ka tuulegeneraatorilt saadav väljundvõimsus. Näiteks kui vahemikus 6...6,5 m/s 10 minuti keskmiste andmete keskmine tuule kiirus on 6,26 m/s, siis selle keskmise moodustanud kiirus jääb vahemikku 2,4...12,3 m/s. Sellest tulenevalt on tuulegeneraatori keskmine väljundvõimsus olnud ~1,8 kW, kuid ühe minuti maksimaalsena ulatunud kuni 9,7 kW-ni. Tuulegeneraatori elektritoodangu ning tuulekiiruse keskmised väärtused ei jää maksimaalse ja minimaalse väärtuse keskele, sest tegemist pole normaaljaotusega.

Tuules sisalduv energia on kuupsõltuvuses tuule kiirusest, mis tähendab, et olukorras, kus tuule kiiruse kasv ei pruugi tunduda märkimisväärne (joonis 5), siis toodangus toob see kaasa märkimisväärse muudatuse (joonis 7). Analüüsitud juhtumitel oleks lisanduv aastane energiatoodang 40 m kõrguse masti kasutamisel sõltuvalt asukohast jäänud vahemikku 36...60%.



Joonis 7. Aastas lisanduv arvutuslik elektritoodang mitmesugusel kõrgusel
 Figure 7. Calculated additional yearly energy production at several heights

Majandusarvutuste käigus leiti kõrgema masti juba algselt paigaldamiseks vajaliku lisainvesteeringu lihttasuvusaeg, nüüdisväärtus (NPV) ning sisemine tulusus (IRR). Investeeringu eluea (20 aastat) jooksul teenitav diskonteeritud tulu on nähtav jooniselt 8. Täpsemad arvutustulemused on kirjeldatud tabelites 2 ja 3.



Joonis 8. Lisainvesteeringu NPV kõrgema masti kasutamisel: a) Pandiveres; b) Saaremaal
 Figure 8. NPV in cases of using higher towers: a) VT-1; b) VT-2

Kui võrd mastide maksumused mõjutavad otseselt majandusarvutuse tulemusi, paranevad ka majandusarvutuse tulemused mastide hinna vähenedes. Olukorras, kus väiketuumikute paigaldamine sageneb, on paigaldaja-ettevõttel võimalik mastide ühikmaksumusi vähendada suuremahuliste tellimuste või kohapealse tootmise abil.

Tabel 2. Pandivere tuulik (VT-1) ning kõrgema masti kasutamise majanduslikud aspektid
 Table 2. Results of economic calculations in case of VT-1

Stsenaarium	Parameeter	Masti kõrgus, m			
		22	26	30	40
-	Lisanduv tootlikkus, MWh/a	2,04	3,74	5,12	7,12
Toetuseta	NPV, €	763	-2011	-299	-2455
	IRR, %	9,7%	2,6%	5,6%	3,7%
	Lihttasuvusaeg, a	10,1	16,3	13,2	15,1
Toetusega	NPV, €	2487	3547	5588	7160
	IRR, %	44,5%	22,3%	30,2%	25,0%
	Lihttasuvusaeg, a	3,3	5,7	4,5	5,2
50-50	NPV, €	206	-3036	-1701	-4404
	IRR, %	7,1%	0,3%	3,1%	1,3%
	Lihttasuvusaeg, a	11,2	19,5	15,2	17,8

Eeltoodud tabelist nähtub, et tulenevalt kõrgemal sagedamini esinevatest suurematest tuule kiirustest oleks VT-1 puhul ilma toetust kasutamata juba algselt kõrgema masti paigaldamisest tekkinud lisainvesteering olnud tasuv 19...23 m kõrgust masti kasutades (juhul, kui kogu toodang kasutatakse kohapeal). Kui investeering tehakse 70%-lise toetuse abil, on NPV positiivne terve analüüsitava piirkonna ulatuses.

Tabel 3. Saaremaa tuulikul (VT-2) kõrgema masti kasutamise majanduslikud aspektid
Table 3. Results of economic calculations in case of VT-2

Stsenaarium	Parameeter	Masti kõrgus, m				
		18	22	26	30	40
-	Lisanduv tootlikkus, MWh/a	1,13	3,31	5,38	7,35	11,78
Toetuseta	NPV, €	345	1337	-859	1782	3477
	IRR, %	8,9%	10,0%	4,8%	8,2%	8,8%
	Lihhtasuvusaeg, a	10,6	9,9	13,9	13,9	10,7
Toetusega	NPV, €	1358	4257	6010	9087	14755
	IRR, %	41,3%	45,9%	28,1%	38,9%	40,9%
	Lihhtasuvusaeg, a	3,5	3,3	4,7	3,7	3,6
50-50	NPV, €	35	431	-2333	-230	252
	IRR, %	6,3%	7,5%	2,4%	5,7%	6,2%
	Lihhtasuvusaeg, a	11,7	10,9	16,2	12,3	11,8

VT-2 puhul oleks tulenevalt keskmise tuule kiiruse kasvust ilma toetuseta tehtud lisainvesteering olnud tasuv 17...23 m ning samuti 30...40 m kõrgust masti kasutades. Toetusega investeering on sarnaselt Pandivere tuulikuga tasuv kogu analüüsitava kõrguste vahemiku ulatuses. Juhul, kui 50% toodetud elektrist müüakse võrku, oleks praeguste hindade ning toetuskeemi juures lisainvesteering tasuv olnud 22 m ning 40 m kõrguste mastide paigaldamisel.

Kuivõrd elektri ostuhind (hind lõpptarbijale) moodustub võrguteenuse tasu, elektrienergia hinna ning maksude koosmõjus, saadakse maksimaalne tulu siis, kui kogu toodetud elekter tarbitakse ära kohapeal.

Kokkuvõte

Käesolevas töös analüüsiti kahe Eestis töötava väiketuuliku asukoha tuuleolusid ning elektrituulikute võimalikku toodangut ja majanduslikku otstarbekust, kui need oleks juba alguses olnud paigaldatud kõrgematele mastidele. Analüüsi koostamise käigus mõõdeti ajavahemikul 10.2013...01.2014 tuule kiirust väiketuulikust eraldi seisvale

mastile kinnitatud anemomeetritega tuulegeneraatori tiivikut rummu kõrgusel ning li-saks 26 m ja 40 m kõrgusel.

Keskmiised tuule kiirused mõõteperioodil mitmesugustel kõrgustel jäid vahemikku 5...5,99 m/s (Pandivere) ning 5...6,44 m/s (Saaremaa). Mõõtmised näitasid, et tuulegeneraatoril paikneva tuule kiiruse mõõteseadme mõõtetulemused on mõjutatud tuulegeneraatorist ning elektrituuliku töötamisel ei kajasta tegelikke tuulekiiruse väärtusi. Olukorras, kus tuulegeneraator töötab, on tegelik keskmine tuule kiirus märksa suurem tuulegeneraatoril paikneva mõõteseadme näidust. Sealjuures, juhul, kui tuule suund muutub ning tuulegeneraatori tiivik tuulest välja pöördub, on tuulegeneraatoril paiknevalt mõõteseadmelt võimalik näha maksimaalväärtusi, mis tegelikku olukorda ei kirjelda.

Tuuliku toodangu prognoosimisel, kasutades keskmisi tuulekiirusi, tuleb arvestada, et kui tuule kiirus varieerub keskmistatud perioodi jooksul suhteliselt suurtes piirides, on varieeruv ka tuulegeneraatorilt saadav väljundvõimsus. Tuules sisalduv energia on kuupsõltuvuses tuule kiirusest, mis tähendab, et olukorras, kus tuule kiiruse muutus ei pruugi tunduda märkimisväärne, toimub toodangus märkimisväärse muudatus.

Majandusarvutused koostati, kasutades väiketuulikute aastaseid elektritoodanguid mitmesuguste mastikõrguste juures ning masti(de) orienteeruvaid maksumusi. Ilma investeeringutoetust kasutamata oleks analüüsitava objektide puhul juba algselt tehtud lisainvesteering olnud optimaalne 22 m kõrgust masti kasutades (Saaremaal ka 30 m kõrgust masti kasutades).

Investeeringutoetuse rakendamisel on kasutatud lähte-eelduste korral optimaalseks mastikõrguseks 30...40 m. See tuleneb Eestis praegu kättesaadavate ning müüdavate hüdrauiliselt tõstetavate mastide maksimaalsest kõrgusest.

Maksimaalne tulu saadakse elektri tootmisest siis, kui kogu toodetud elekter tarbitakse sihipäraselt ära kohapeal. Lisainvesteering ei oleks olnud tasuv enamike mastikõrguste juures olukorra jaoks, kus 50% toodangust müüakse võrku. Seega on mõistlik kasutada tarbimise juhtimist või valida juba algselt tarbimismahtudele vastav elektrituulik.

Käesoleva analüüsi tulemusena esitatud soovitusel kehtivad eeltoodud põhjustel eelkõige vaid konkreetsete tuulikute, asukohtade ning mõõtmisperioodide kohta.

Tänuavaldused

Töö autorid tahavad tänada Tuuliki Kasoneni ning Eesti Tuuleenergia Klastrit, Keskkonnaagentuuri Ilmateenistust, Konesko AS-i ja Bakeri OÜ-d tõhusa koostöö eest andmete väljastamisel, Uulu Elekter OÜ-d ning Vello Selga ja Indrek Pertmanni tuulemõõtmiste läbiviimise eest.

Analüüsi teostamist aitasid rahastada Euroopa Regionaalarengu Fond (läbi EAS-i) ning Tallinna Ettevõtlusamet.



Kasutatud kirjandus

- Energiatalgud.ee. 2013. Elektri hind lõpptarbijale. Kättesaadav: http://www.energiatalgud.ee/index.php?title=Elektri_hind_1%C3%B5pptarbijale (30.12.2013).
- Eesti Standardikeskus. 2006. EVS-EN 61400-12-1:2006, Wind turbines. Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines.
- Eesti Tuuleenergia Assotsiatsioon. 2012. Väiketuulikute ABC, 23lk.
- Konesko AS, november 2013.
- Maa-amet. 2013. X-GIS kaardirakendus. Kättesaadav: <http://xgis.maaamet.ee/xGIS/XGis> (05.12.2013).
- Rahandusministeerium. 2013. Abimaterjalid tasuvusanalüüsi koostamiseks. Kättesaadav: <http://www.struktuurifondid.ee/abimaterjalid-tasuvusanaluusi-koostamiseks/> (30.12.2013).
- Uiga, J., Allik, A., Annuk, A. 2013. Väiketuuliku optimaalse mastikõrguse analüüs. – Eesti Maaülikool, Tartu - Pandivere - Upa, 63 lk.

ANALYSIS OF THE OPTIMUM TOWER HEIGHT OF SMALL WIND TURBINES

Jaanus Uiga, Alo Allik, Andres Annuk

In the current article, wind conditions in the location of two working Small Wind Turbines were analyzed in order to determine the economic feasibility of the theoretical situation, where the owners would have installed a higher tower for the mast. Wind speeds were measured in 3 heights (nacelle height, 26 m and 40 m) at the end of 2013. The measurements were made and the results were processed according to EVS-EN 61400-12-1:2006.

Due to the fact that wind power is a function of the cube (third power) of the wind speed, even a slight change in wind speeds could mean a significant change in the energy production. In the analyzed case, a tower height of 40 meters would have meant a 36...60% increase in energy production per year.

The economic calculations were compiled using the calculated yearly yields at different heights and using the cost of the higher towers. It was found that without using subsidies, the investment would have been optimal with 22 m (Wind Turbine 1) and 30 m (Wind Turbine 2) tower heights.

ÜLEVAADE BIOKÜTUSTE ALASEST TEHNOLOOGIAARENDESEST EESTI MAAÜLIKOOLI PÕLLUNDUS- JA TOOTMISTEHNIKA OSAKONNA KÜTUSELABORITES

Jüri Olt, Timo Kikas

Eesti Maaülikool, Tehnikainstituut, Kreutzwaldi 56, Tartu 51014

e-post: jyri.olt@emu.ee, timo.kikas@emu.ee

Annotatsioon

Käesoleva ülevaate eesmärgiks on tutvustada biokütuste tehnoloogia alast arendustegevust Eesti Maaülikooli põllundus- ja tootmistehnika osakonna erinevates kütuselaborites ning kütuselaboritega seotud mootorite katselaboris. Biokütuste alase uurimistegevusega alustati 2007. a ning arendustegevusega 2009. aastal.

Märksõnad: lignotselluloosne biomass, mikrovetikas, biokütus, manus, integreeritud läbivooluline liitreaktor, rõhulangetusreaktor, fotobioreaktor, biokütuse toitesüsteem.

Sissejuhatus

Eesti Maaülikooli tehnikainstituudis on põllundus- ja tootmistehnika osakonna algatusel asutatud kolm kütuselaborit:

- 1) tahkebiokütuselabor;
- 2) kaks vedelkütuselaborit: teise põlvkonna biokütuselabor lignotselluloosse biomassi baasil saadava biokütuse tootmistehnoloogia väljatöötamiseks ning kolmanda põlvkonna biokütuselabor ehk vetikalabor.

Vedelkütuselaborites väljatöötatavate tehnoloogiate lõpp-produktide sobivust kontrollitakse mootorite katselaboris. Vedelate biokütuste, täpsemalt bioetanooli füüsikalise-keemilised omadused erinevad tavakütuste vastavatest omadustest, mistõttu tuleb uurida ka nende mõju sisepõlemismootori erinevatele koostöötavatele tööpindadele ning leida lahendus negatiivse mõju vähendamiseks. Kütuselaborites töötab neli teadurit ja spetsialisti, neist kaks PhD kraadiga ning neli doktoranti, mootorite katselaboris on tööl kolm PhD kraadiga inimest ja üks doktorant.

Arendustöö ja uued tehnoloogilised lahendused

Tahke biokütuselabor alustas oma tegevust 2007. aastal. Alustati briketeerimisseadme BIOMASSER BS06 tööprotsessi uurimisega. Leiti, et briketi kuju ja omadusi mõjutavad briketeerimisseadme tüüp (kruvi- või kolbpress), pressitava biomassi liik (teravilja ja rapsipõhk, kanep, päevalill, luhahein, pilliroog, puulehed, kurgipealsed jm), pressitava materjali fraktsioon, niiskus, briketi jahtumisrežiim stabilisaatoris (Olt jt 2008; Olt

ja Laur 2009). On uuritud ligniinisalduse mõju briketi kvaliteedile (Alaru jt 2011). Eraldi vajab märkimist, et laborist on saanud positiivse hinnangu ja soovitus kasutamiseks biokütus, mis on toodetud hobusetallide okaspuuallapanust ning mille nimetuseks sai hobujõud (Hovi jt 2011).

Vedela biokütuse ülevaateuuringu alustati 2008. aastal. Esialgu tehti eeluuring taimeõli kasutamiseks mootorikütusena (Küüt ja Olt 2008), mis oli sellel ajahetkel ülipopulaarne teema. Peagi sellest teemast loobuti, kuna taimeõli puhul on tegemist I põlvkonna kütusega, mille tooraine on kasutatav toiduainena. Edaspidi keskenduti II põlvkonna kütuste tootmistehnoloogiale arendamisele ja kasutuselevõtule (Küüt jt 2009).

Rohtsest biomassist vedelate biokütuste tootmise võimaluste uurimist alustati 2010. aastal (Tutt ja Olt 2010). Esimesel perioodil (2010–2011) uuriti rohtse biomassi koostise ja osakeste suuruse mõju etanooli saagisele. Proovide töötlemiseks kasutati lahjas happelahuses kuumutamist ja ensümaatilist hüdrolyüsi, millele järgnes fermentatsioon. Seejärel uuriti erinevate taimeliikide kasutamist etanooli (Tutt ja Olt 2011) ning biogaasi, täpsemalt biometaani (Alaru jt 2011) tootmise toorainena ja nende kasutamise sõltuvust taimede tselluloosi-, hemicelluloosi- ning ligniinisaldusest.

Teisel perioodil (2011–2012) uuriti erinevate eeltötlusmeetodite mõju bioetanooli saagisele (Tutt jt 2012). Lignotselluloosse biomassi proove töödeldi lahjas väävelhappe, soolhappe, lämmastikhappe ja kaaliumhüdroksiidi lahuses. Jätkuva uurimistöö käigus sel perioodil töötati välja integreeritud läbivoolulise seadme kontseptsioon. See kujutab endast liitreaktorit, kus biomassi eeltötlus-, hüdrolyüsi- ja destillatsiooniosa moodustavad kompaktsed terviku, kusjuures biomassi eeltötlusosa ja hüdrolyüsiiosa kujutavad endast kaheastmelist ühtset keerdtorustikku, kus toru läbimõõt on kummaski astmes erinev, seadmel on soojusvahetussüsteem ning destillatsiooniosa on paigutatud keerdtorustiku keskele (P201300016). Selline reaktor võimaldab paremini ära kasutada protsessis kasutatavat soojusenergiat ja sellega seoses vähendada etanooli tootmise kulusid.

Kolmandal perioodil (alates 2013) alustati „plahvatusliku“ rõhulangetusmeetodi väljatöötamist. Selle meetodi iseärasuseks on asjaolu, et lignotsellulooset biomassi töödeldakse ilma kemikaalideta, mis võimaldab märkimisväärselt alandada lõpp-produkti omahinda. Väljatöötamisel on rõhulangetusreaktori uudne tehniline lahendus. Samal perioodil asutati vetikalabor ja alustati mikrovetikatest mootorikütuse tootmisvõimaluste uurimisega. Mikrovetikate biokütuse kompleksne töötlemisskeem hõlmab mikrovetikate kultiveerimist, vetikamassi eraldamist kasvukeskkonnast, järgnevat lipiidide

ekstraheerimist ja lõpuks biodiisli saamist, tavaliselt transesterifitseerimise teel. Väljatöötamisel on fotobioreaktori uudne tehniline lahendus, mille eesmärgiks on mikrovetikate kultiveerimise efektiivsuse parendamine.

Samas kompleksis kütuselaboritega paikneb mootorite katselabor, mis töötab kütuselaboritega haakuvate teemadega ning kus on välja töötatud kaks uutset biokütuse doseerimiseks ette nähtud toitesüsteemi lahendust (patendid EE05665B1 ja EE05693B1). Patent EE05665B1 sisaldab küttesegu moodustamise meetodi kirjeldust ja antud meetodiga töötavat toitesüsteemi ehk nn pulverisaatortoitesüsteemi. Toitesüsteem võimaldab moodustada kvaliteetse küttesegu erinevatest kütustest ning seda saab kasutada nii lisa- kui põhitoitesüsteemina. Patendis EE05693B1 kirjeldatud tehniline lahendus võimaldab doseerida vedelaid biokütuseid mootorisse. Süsteemi saab kasutada ainult lisatoitesüsteemina.

Bioetanooli iseloomustavad puudulikud määrimisomadused, väike viskoossus ja suur veesisaldus (Govindarajan 2008; Küüt jt 2009, 2012; Olt jt 2011), mis muudab bioetanooli kasutamise problemaatiliseks eelkõige diiselmootorites. Samuti on kahetaktilises sädesüütega mootoris kasutamisel puhul probleemiks nõutavate määrimisomaduste saavutamine, täpsemalt etanooli ja õli halb segunemine või segunematus. Uurimistöö tulemusena on mootorite katselaboris probleemi – valmistada kütusesegu kahetaktilistele sisepõlemismootoritele – lahendamisel saavutatud edu, kuid arendustöö kütusemanuse täpsustamiseks jätkub.

Kokkuvõte

Eesti Maaülikooli põllumundus- ja tootmistehnika osakonna teadus- ja arendustegevus on orienteeritud toote- ja tehnoloogiaarendusele. Osakonna kütuste- ning mootorilaborites on välja töötatud rida patenteid tehnilisi ja tehnoloogilisi lahendusi, nagu integreeritud läbivooluline liitreaktor, kaks toitesüsteemi küttesegu moodustamiseks sisepõlemismootoris biokütuse baasil, väljatöötamisel on rõhulangetusreaktor ja fotobioreaktor.

Kasutatud kirjandus

- Alaru, M., Kukk, L.; Olt, J., Menind, A., Lauk, R., Vollmer, E., Astover, A. 2011. Lignin content and briquette quality of different fibre hemp plant types and energy sunflower. – *Field Crop Research*, 124, 332–339.
- Alaru, M., Olt, J., Kukk, L., Luna-del Risco, M., Lauk, R., Noormets, M. 2011. Methane yield of different energy crops grown in Estonian conditions. – *Agronomy Research*, 9(1), 13–22.

- Govindarajan, K. 2008. Alcohol as an Automotive Fuel. Kättesaadav: http://www.che-resources.com/energy_future/ethanol_transportation_fuel.shtml
- Hovi, M., Hovi, K., Menind, A. 2011. Kompaktne biokütus hobuste okaspuu-allapanust. – Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine XIII. Eesti Maaülikool, Tartu, 86–90.
- Küüt, A., Ilves, R., Mikita, V., Olt, J. (2012) The characteristics of bioethanol fuel in internal combustion engines with compression-ignition. – 40th International symposium. “Actual Tasks on Agricultural Engineering”, Opatija, 21–24.02.2012, 117–125.
- Küüt, A., Olt, J. Taimeõli Tootmine ja kasutamine mootorikütusena. 2008. – Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine XI. Eesti Maaülikool, Tartu, 79–87.
- Küüt, A. Olt, J., Mikita, V., Sõõro, T., Ritslaid, K. 2009. Bioetanoolkütuse kasutamine sädesüütega sisepõlemismootoris. – Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine, XI. Eesti Maaülikool, Tartu, 102–112.
- Olt, J., Kivilo, A., Laur, M. 2008. Erineva biomaterjali briketeerimise kogemusi. – Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine, X. Eesti Maaülikool, Tartu, 27–39.
- Olt, J., Laur, M. 2009. Briquetting different kinds of herbaceous biomaterial. Proceedings of 8th International Scientific Conference – Engineering for rural development, Jelgava, 28-29 May 2009, Latvia, 224–228.
- Olt, J., Mikita, V., Ilves, R., Küüt, A., Madissoo, M. 2011. Bioetanooli mõju diiselmootori kõrgrõhupumbale. – Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine XIII. Eesti Maaülikool, Tartu, 18–28.
- Ritslaid, K., Küüt, A., Olt, J. 2010. State of the Art in Bioethanol Production. – Agronomy Research, 8(1), 236–254.
- Tutt, M., Olt, J. 2010. Rohtsest biomaterjalist vedela biokütuse tootmisvõimaluste uurimine. – Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine XII. Eesti Maaülikool, Tartu, 106–114.
- Tutt, M., Olt, J. 2011. Erinevate taimeliikide võrdlus bioetanooli tootmiseks. – Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine XIII. Eesti Maaülikool, Tartu, 157–165.
- Tutt, M., Kikas, T., Olt, J. 2012. Comparison of different pretreatment methods on degradation of rye straw. – 11th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”, 24-25 May 2012, Jelgava, Latvia, 412–416.
- Tutt, M., Kikas, T., Olt, J. 2012. Eeltötlusmeetodi mõju bioetanooli saagile. – Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine XIV. Eesti Maaülikool, Tartu, 109–117.

**OVERVIEW OF RESEARCH AND DEVELOPMENT IN BIOFUEL
LABORATORIES OF DEPARTMENT OF AGRICULTURAL AND
PRODUCTION ENGINEERING OF ESTONIAN UNIVERSITY OF LIFE
SCIENCES**

Jüri Olt, Timo Kikas

The aim of this review is to give an overview of the research and development in the different biofuel and engine laboratories of Department of Agricultural and Production Engineering of Estonian University of Life Sciences. Research in the biofuel laboratories started in 2007, and development and implementation of new technologies in 2009.

MIKROTOOTMISJAAMAGA ERAMU ELEKTRIENERGIA TARBIMISE JA TOOTMISE ANALÜÜS

M. Märss^{1,2}, J. Järvik², A. Annuk¹, A. Allik¹, J. Uiga^{1,3}

¹Eesti Maaülikooli Tehnikainstituut, 51014 Tartu, Kreutzwaldi 56

²Tallinna Tehnikaülikooli Elektrotehnika Instituut, 19086 Tallinn, Ehitajate tee 5

³Eesti Arengufond, 10111 Tallinn, Rotermanni 8

Annotatsioon

Fotoelektriliste (photovoltaic – PV) päikesepaneelide toodangu kasutamine kodumajapidamiste elektritarbimise katmiseks on energeetikasektoris kasvav trend. Võrreldes taastuvenergiatehnoloogiaid, on päikesepaneelide kasutamise peamiseks eeliseks liikuvate osade puudumine, mille tõttu on ka hoolduskulud väikesed. Oluline puudus, nagu teistegi taastuvenergiaallikate puhul, on suur ööpäevane energiatoodangu muutus. Tihti on probleemiks naaberobjektidest tulenev varjutus. Elektrienergia tarbimise ja tootmise ühtlustamiseks on kirjandusallikates kirjeldatud mitmeid võtteid, mida saab sisuliselt rühmitada kolme gruppi: energiasalvestite kasutamine, tarbimise juhtimine vastavalt elektriallikate väljundvõimsusele ning elektriallikate juhtimine vastavalt tarbimisvõimsusele. Viimane nimetatud võtte ei sobi kasutamiseks taastuvate energiaallikatega (välja arvatud hüdroenergia), kuna nendest saadav väljundvõimsus on stohhastiline. Antud artiklis on tehtud kokkuvõtte aastase mõõteperioodi jooksul kogutud andmetest eramu kohta, mille juurde on paigaldatud võrku ühendatud 10 kW nimivõimsusega päikeseelektrijaam. Mõõtmised on tehtud perioodil oktoober 2013 kuni september 2014. Tarbimis- ning tootmisandmete põhjal on esitatud kokkuvõtted kuude kaupa, analüüsitud tootmise ning tarbimise kattumist ning majanduslikke näitajaid.

Märksõnad: taastuvad energiaallikad, elektrienergia tootmine.

Sissejuhatus

Järjest enam on tõusnud huvi elektri väiketootmise vastu, seda nii era- kui ettevõtlussektoris. Eriti on tähelepanu all elektri tootmine taastuvatest energiaallikatest (päike, tuul, biogaas jne). Aegade jooksul välja kujunenud elektrisüsteem, kus toodangut tagavad võimsad jaamad, on ümber kujunemas süsteemiks, kus suurte elektrijaamadega paralleelselt osaleb elektrienergia genereerimises palju väikesed, hajutatud tootmisjaamu. Seetõttu liigub kaasaegne elektritootmine järk-järgult tarbijatele lähemale.

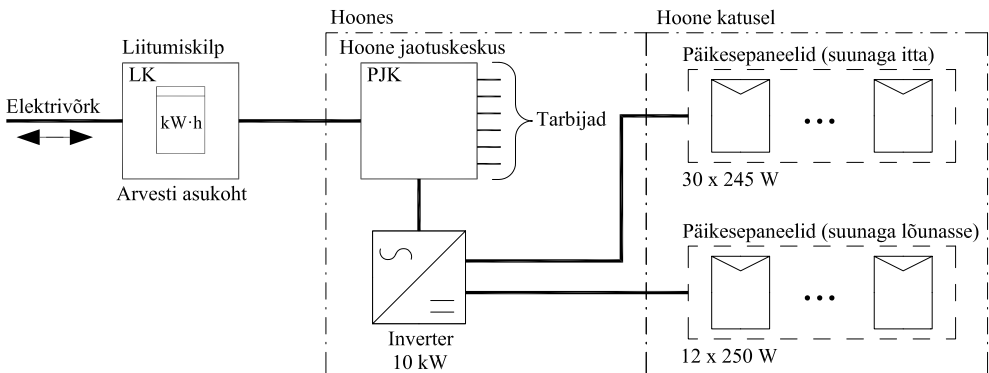
Hajutatud elektritootmise laialdasem kasutuselevõtt seab elektrivõrkudele täiesti uued nõudmised. Uutes oludes võib elektrienergia liikuda lisaks alajaam–tarbija suunale ka tarbija–alajaam suunas, seetõttu tuleb võrkudel kohaneda kahesuunalise energiavooga. Seejuures peab säilima standarditega ettenähtud elektrikvaliteedi tase kõigile tarbijate-

le. Muutuvate koormuste ja suundade vähendamiseks ülekandeliinides tuleks ühtlustada piirkondlikke elektrienergia tarbimis- ning tootmisvõimsusi. Väiketarbijatega seotud mikrotootmisjaamade puhul saab energiavahetust elektrivõrguga vähendada energiasalvestite kasutamise või tarbimise juhtimisega. Energiasalvestite kasutamisel puudub praegu saadaoleva tehnoloogia juures veel märgatav majanduslik efekt. Elektritarbijate käitumisharjumuste mõjutamiseks kasutatakse ööpäeva lõikes muutuvat elektrienergia hinnapoliitikat. Tarbijatel, kes on nii elektrienergia tootjad kui tarbijad, on hinna arvestamiseks veel eraldi meetodika. Elektrienergia hinna kujunemine võrgust ostmisel ning võrku müümisel, samuti taastuvenergia toetuse maksmine suunab selgelt tarbijaid enda toodetud elektrienergiat ise ära tarbima.

Materjalid ja meetodika

Mikrotootmisjaama tehnilised andmed

Käsitlev eramu asub Tartus geograafilistel koordinaatidel 58°21'33" põhjalaiust, 26°47'09" idapikkust. Mikrotootmisjaam on liidetud elektrivõrguga läbi hoone jaotuskeskuse. Kaugloetav energiaarvesti asub krundi piiril olevas liitumiskilbis (joonis 1).



Joonis 1. Fotoelektrilise mikrotootmisjaama võrguühenduse põhimõtteskeem
 Figure 1. Microgeneration PV plant connection diagram with utility network

Päikesepaneelid on paigaldatud hoone ja abihoone katustele kahe väljana (joonis 2):
 30 paneeli (SANYO HIT-H245E01) nimivõimsusega 245 W hoone katusel ida suunas (asimuut 102°, kaldenurk 25°);
 12 paneeli (SANYO HIT-H250E01) nimivõimsusega 250 W abihoone katusel lõuna suunas (asimuut 0°, kaldenurk 20°).



Joonis 2. Päikesepaneelide asend ilmakaarte suhtes
Figure 2. Orientation of solar panels

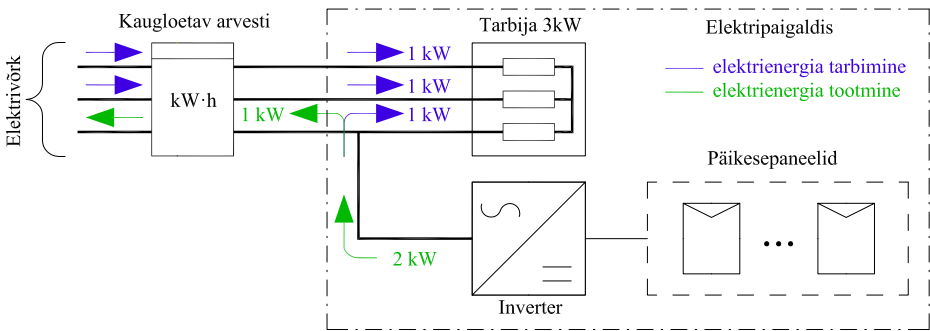
Mõlemad väljad on ühendatud vaheldiga (inverteriga – SMA Sunny Tripower 10000TL-10), mille nimivõimsus on 10 kW. Vaheldi muundab paneelidest tuleva alalisvoolu võrgukvaliteedile vastavaks vahelduvvooluks.

Perioodil oktoober 2013 kuni september 2014 on fikseeritud ühetunniste intervallidega vaheldis muundatud, elektrivõrgust ostetud ning elektrivõrku müüdud energiakogused. Nende andmete alusel on arvatud eramu tunnipõhised tarbitud energiakogused.

Elektrienergia hind

Eramute elektripaigaldistes, kuhu tarbijatega paralleelselt on lülitatud elektrijaam, võib energiavoog sisendis olla kahefaasiline. See tähendab, et vajadusel ostetakse puuduv energiakogus võrgust või müüakse üleliigne energia võrku. Mitmefaasiliste süsteemide korral võib energiavoog olla samal ajal kahefaasiline. Kõige ilmekam näide on olukord, kus kolmefaasilise tarbijaga on ühendatud ühefaasiline elektrigeneraator, mille võimsus on suurem kui tarbija võimsus ühes faasis (joonis 3).

Võrguga vahetatud energiakogused fikseeritakse tunnikaupa kaugloetava arvesti vahendusel, mis edastab info võrguettevõtjale. Liitumispunkti omanik saab ligipääsu oma tarbimis- ja tootmisandmetele läbi süsteemihalduri andmelao, mis asub e-keskkonnas. Võrgueeskirja järgi peab alates 1. jaanuarist 2017 kõigi tarbijate aktiivenergia mõõtmise toimuma kauglugemisseadmetega.



Joonis 3. Kolmeefaasiline elektripaigaldis ühefaasilise elektrigeneraatoriga
 Figure 3. Three-phase electrical installation with singlephase production unit

Võrgust ostetud ja võrku müüdud elektri hind kujuneb erinevatel põhimõtetel. Elektri ostmisel koosneb hind sisuliselt kolmest komponendist: elektrienergia hind, võrgutasu ning riiklikud tasud ja maksud (elektriaktsiis, taastuenergia tasu ning käibemaks). Elektrienergiale lisandub elektrimüüja marginaal, mis sõltub elektrimüüjast ning -paketiist. Elektrienergia müümisel võrku maksab ettevõtte, kellega on sõlmitud elektrimüügileping, tunnipõhise elektribörsi elektrihinda, millest lahutatakse maha bilansihalduri marginaal. Tulenevalt käibemaksuseadusest ei rakendata eraisikutele elektrienergia võrku müümisel käibemaksu. Tabelis 1 on esitatud näide elektrihinna kujunemisest antud eramule võrgust ostmisel ning võrku müümisel kuupäeval 11.07.2014 ajavahemikus 12–13.

Tabel 1. Elektrienergia hinna kujunemine 11.07.14 keskpäeval
 Table 1. Electricity pricing on 11.07.14 midday

Komponent	Kirjeldus	Võrgust ostmine	Võrku müük
		senti/kW·h	senti/kW·h
Elektrienergia	Elektribörsi tunnihind, millele liidetakse elektrimüüja marginaal	4,9 + 0,24	4,9 - 0,24
Võrgutasud	Tasu võrguettevõttele võrguteenuse osutamise eest, sõltuvalt tarbija võrgu- ja elektripaketist	6,65	-
Elektriaktsiis	Elektrienergia aktsiisimäär	0,447	-
Taastuenergia tasu	Tasu, mille kaudu rahastatakse taastuenergiatoetusi	0,77	-
Käibemaks	Riiklik maks 20%	2,6	-
		15,62 senti/kW·h	4,67 senti/kW·h

Antud analüüsis on kasutatud mõõteperioodi tunnipõhiseid elektribörsi hindasid ning antud liitumise võrgu- ja elektrimüügilepingus sätestatud tasumäärasid.

Taastuenergia toetus

Vastavalt elektrituruseadusele maksab põhivõrguettevõtte toetust taastuvatest energiaallikatest toodetud elektrienergia eest. Artikli koostamise hetkel oli kehtiv toetusmäär 0,0537 eurot iga võrku antud saldeeritud energia ühiku eest (Elering AS 2014). Saldeerimistehte sisu seisneb ühes tunnis toodetud ja tarbitud energiakoguste võrdlemises, mis seab raskesse olukorda just väiketootjad ning ühefaasilised tootmisseadmed. Toetust makstakse ainult müüdud ja ostetud energiakoguse vahe eest. Juhul kui tunni jooksul võrku antud energiakogus on väiksem kui selleksamal tunnil võrgust tarbitud energiakogus, loetakse saldeerimistehte tulemuseks 0 kW·h ning toetust ei maksta. Käesolevas analüüsis on arvatud saldeeritud võrku edastatud energiakogused mõõteperioodi tunnipõhiste andmete alusel.

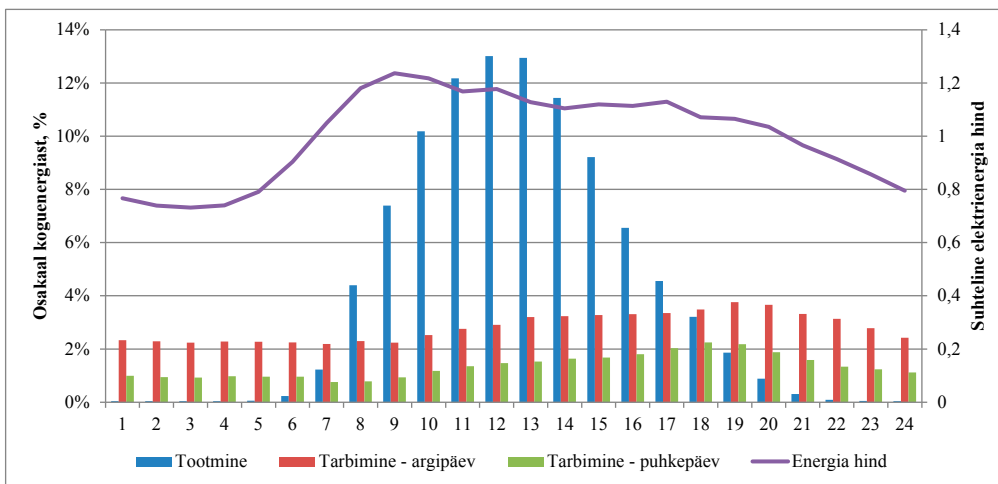
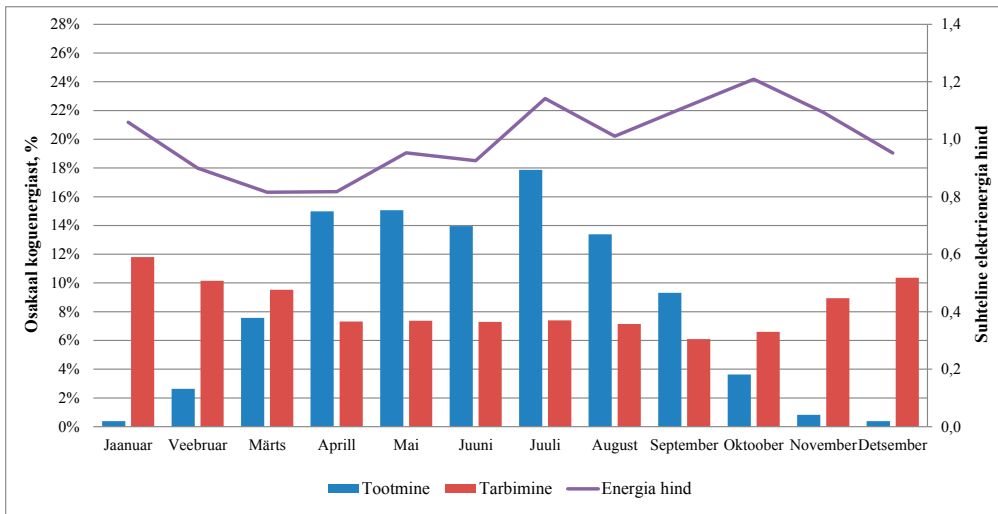
PV-süsteemi hind

Enamikus allikates kirjeldatakse päikesepaneelide installeerimise maksumust ühikuliselt, see tähendab maksumust 1 W installeeritud võimsusühiku kohta. Siinjuures tuleb ära märkida, et ühiku hind sõltub süsteemi suurusest, kuna üldjuhul moodustavad suuremate süsteemide puhul paigaldus, transport ning muud insenertehnilised tegevused (projekteerimine, seadistamine, kontrollmõõtmised jne) ühikuliselt väiksema osakaalu kogu süsteemi maksumusest. Saksamaal on alates 2006. aastast kuni 10 kW nimivõimsusega katusele paigaldatava süsteemi keskmine hind langenud 13 protsenti aastas (Wirth 2014). Antud artiklis on majandusarvutustes kasutatud Eesti e-riigihangete keskkonnast leitud sarnaste objektide (4) keskmist ühikmaksumust perioodil 2013 kuni 2014 ja see on 1,38 EUR/W.

Tulemused

Elektrienergia tootmine ja tarbimine

Päike energiaressursina on stohhastilise iseloomuga, mis tähendab, et energia on ühes kindlas geograafilises asukohas saadaval ainult perioodiliselt. Eesti tingimustes tekkitab konflikt tootmise ja tarbimise vahel. Antud näites muundatakse perioodil juuni kuni august päikesepaneelidega aasta lõikes enamik elektrienergiast (45% kogu aastasest toodangust). Samal ajal langeb energiatarbimise raskuse talvele (detsember kuni veebruar 32% kogu aastasest tarbimisest), mis on peamiselt tingitud küttevajadusest ning suuremast energiakulust valgustuse tarbeks. Elektrienergia tarbimine on intensiivsem õhtutundidel, samas kui enamik elektrienergiat toodetakse keskpäeval (joonis 4: elektrienergia hind on esitatud suhtarvuna aastase mõõteperioodi keskmisest hinnast). Samuti on elektribörsi tunnihind aasta keskmise poolest kõrgeim just päeval, kuna siis on ka elektrisüsteemi koormus suurim.



Joonis 4. Elektrienergia tarbimine, tootmine ja suhteline hind kuude ja kellaaja alusel
 Figure 4. Electrical energy consumption, production and proportional price according to months and time

Eramutega seotud päikeseelektriijaamades toodetud muutuva võimsusega elektrit saaks lihtsasti tasakaalustada elektritarbijate juhtimisega. Lihtsustatult tähendab see, et energiat tarbitakse siis, kui päikeseressurssi on, ja ei tarbita, kui seda pole. Majapidamistes leidub seadmeid, millele on selline juhtimis põhimõte rakendatav (küte, jahutus, ventilatsioon).

Antud eramu puhul tarbitakse aastas 34 615 kW·h elektrienergiat, mis on suurem kui Eesti keskmine kodumajapidamise elektritarve (Raudjärv ja Kuskova 2010). Siinkohal

ei käsitleta energiatarbimise üksikasju, vaid eesmärk on kirjeldada energia tarbimise ning tootmise seaduspärasusi ning kattuvust.

Talvel on elektrienergia tootmine tagasihoidlik ning tarbimine maksimaalne. Seetõttu tarbiti enamik energiast eramusiseselt (97%). Samas moodustab see kogu tarbimisest marginaalse osa (2%) ning enamik energiat tarniti elektrivõrgust. Suvel tarbiti eramusiseselt 65% kogu toodetud energiast, mis moodustas kogutarbimisest 33%. Kuude lõikes on tulemused esitatud tabelis 2.

Tabel 2. Mõõteperioodi energiavood kuude lõikes
Table 2. Monthly energy flow on measuring period

Kuu	Võrk - ostmine	Võrk - müük	Sald-eeritud võrku antud energia	Tootmine	Tarbimine	Tarbitud taastuvenergia	Tarbitud taastuvenergia osakaal kogu tootmisest	Taastuvenergia osakaal tarbimises
	kW·h	kW·h	kW·h	kW·h	kW·h	kW·h		
Jaanuar	4 054	0	0	33	4 087	33	100%	1%
Veebruar	3 298	9	3	223	3 512	214	96%	6%
Märts	2 843	182	108	638	3 299	456	71%	14%
Aprill	1 805	533	428	1 263	2 535	730	58%	29%
Mai	1 743	462	338	1 269	2 550	807	64%	32%
Juuni	1 717	370	221	1 177	2 523	806	69%	32%
Juuli	1 621	568	417	1 506	2 560	939	62%	37%
August	1 744	401	251	1 128	2 472	727	64%	29%
September	1 595	272	189	785	2 109	514	65%	24%
Oktoober	2 052	72	15	306	2 286	234	77%	10%
November	3 025	1	0	70	3 093	68	98%	2%
Detsember	3 557	0	0	32	3 589	32	100%	1%
	29 054	2 870	1 970	8 431	34 615	5 561	66%	16%

Toodetud elektrienergiast tarbiti eramus mõõteperioodi jooksul 66% ning see moodustas eramu kogu elektrienergia tarbimisest 16%. Kõige suurem taastuvenergia osakaal tarbimises oli juulis, kattes 37% kogu elektrienergia vajadusest. Päevade lõikes oli tootmise poolest kõige produktiivsem päev 11. juuli (67 kW·h) ning aasta keskmine päevane toodetud energiakogus 23 kW·h. Elektrivõrku antud suurim energiakogus päevas oli 32 kW·h (tabel 3), samas leidis mitmeid päevi, mil elektrivõrku energiat tagasi ei antud.

Tabel 3. Mõõteperioodi energiavood päeva lõikes
Table 3. Daily energy flow during measuring period

	Võrk - ostmine	Võrk - müük	Saldeeri- tud võrku antud energia	Tootmine	Tarbimi- ne	Tarbitud taastuv- energia
	kW·h	kW·h	kW·h	kW·h	kW·h	kW·h
Keskmine	80	8	5	23	95	15
Maksi- maalne	207	32	29	67	213	42
	1.03.2014	22.07.2014	22.07.2014	11.07.2014	1.03.2014	28.06.2014
Mini- maalne	25	0	0	0,24	41	0
	23.04.2014	Mitu	Mitu	7.11.2013	9.10.2013	7.11.2013

Energia maksumus

Arvestades elektribörsi Eesti hinnapiirkonna tunnihindasid, võrgutasusid ning riiklikke makse, kulus võrgust tarbitud elektrienergiale 3660 eurot aastas. Võrku antud energia eest tasaarveldati 123 eurot tunnielektrihindade alusel ning toetuskõlbulikuks osutus 1970 kW·h ehk 106 eurot. Seega oli aastane reaalne kulutus elektrienergiale kokku 3432 eurot. Tabelis 4 on esitatud rahavoog kuude lõikes.

Tabel 4. Rahavoog kuude lõikes
Table 4. Monthly cash flow

Kuu	Võrgust ostetud energia maksu- mus		Võrku müüdud energia maksumus		Taas- tuv- energia toetus	Võrgust tarbimata jäänud energia maksumus	
	EUR	EUR/ kW·h	EUR	EUR/ kW·h	EUR	EUR	EUR/ kW·h
Jaanuar	533	0,131	0	0,043	0	5	0,142
Veebruar	400	0,121	0	0,030	0	29	0,135
Märts	324	0,114	-6	0,035	-6	59	0,130
Aprill	205	0,114	-19	0,035	-23	95	0,130
Mai	208	0,119	-20	0,043	-18	111	0,137
Juuni	210	0,122	-15	0,041	-12	111	0,138
Juuli	212	0,131	-28	0,049	-22	143	0,152
August	220	0,126	-18	0,045	-13	102	0,140
September	209	0,131	-13	0,046	-10	73	0,142

Oktoober	286	0,140	-4	0,050	-1	35	0,147
November	401	0,132	0	0,041	0	10	0,141
Detsember	453	0,127	0	0,036	0	4	0,133
	3 660	1,276	-123	0,043	-106	776	0,139

Mikrotootmisjaamata kuluks sama energiatarbimise korral elektrienergia võrgust ostmisele 4436 eurot, seega säästeti aasta jooksul 1004 eurot. Põhiline sääst tuleneb võrgust ostmata jäänud energiakogusest, mis tarbiti eramusiseselt. Elektrienergia hind ning võrgutasud on kahetariifse paketi korral kõrgemad päeval. Kuna PV-jaamas toimub elektri tootmine samuti päeval, on aastane keskmine võrgust tarbimata jäänud energia ühikmaksumus kõrgem kui võrgust tarbitud elektri ühikmaksumus.

Mikrotootmisjaama tasuvusaeg

Investeeringu otstarbekust võib kirjeldada mitmete indikaatoritega. Jättes siinkohal kõrvale visuaalsed ning tundmuslikud aspektid, kirjeldati analüüsitud mikrotootmisjaama paigalduse ning kasutamise majanduslikku otstarbekust. Tasuvusarvutuste koostamisel kasutatud lähteandmed on koondatud tabelisse 5 ning joonisele 5.

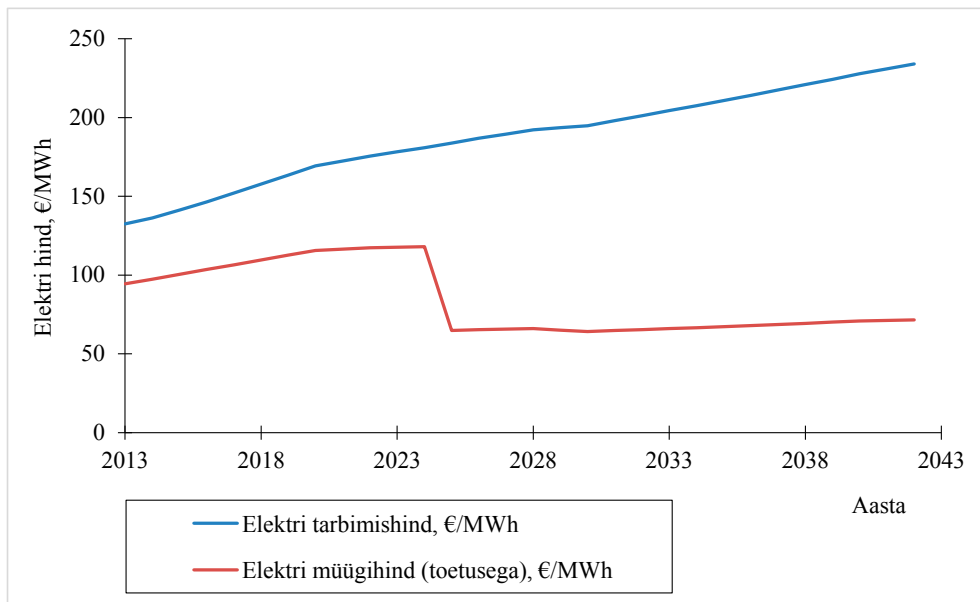
Tabel 5. Tasuvusarvutuse lähteandmeid
Table 5. Initial data used for the feasibility analysis

Parameeter	Väärtus
Mikrotootmisjaama investeeringukulu, €/W	1,38
Taastuenergia tarbimine kohapeal, MW·h/a	5,56
Aastas võrku müüdiv elekter (saldeeritud), MW·h/a	1,97
Aastas võrku müüdiv elekter (saldeerimata), MW·h/a	0,90
Elektri ostmine võrgust, MW·h/a	29,1
Jaama hoolduskulu, %/a	1,0%
Jaama tootlikkuse vähenemine, %/a	0,5%
Jaama eluiga, a	30
Taastuenergia toetus (esimesed 12 aastat), €/MW·h	53,7
Diskontotegur	6%

Tasuvuse hindamiseks kasutati järgmisi indikaatoreid.

1. Tasuvusaeg – näitab, millise aja jooksul mikrotootmisjaama paigaldamiseks tehtud kulutused ennast ära tasuvad.
2. Nüüdisväärtus (NPV) – näitab, kui palju kasumit investeering oma tehnilise eluea jooksul toodab. Saadud tulemus diskonteeritakse aastale, mil investeering teostati.
3. Tulu sisenorm (IRR) – intressimäär, mille puhul NPV on võrdsustatud 0-ga. Lihtsustatult arvutatakse olukorda, kus investeering ei tooa kahjumit ega kasumit.

Projekt on aktsepteeritav, kui tulu sisenorm on suurem või võrdne investeerija poolt soovitava tulunormiga.



Joonis 5. Majandusarvutuses kasutatud elektri hinna prognoos (energiatalgud.ee 2014)
 Figure 5. Electricity price prognosis used in the calculations (energiatalgud.ee 2014)

Joonisel 5 kujutatud elektri hind lõpptarbijale on koostatud, kasutades ENMAK 2030 („Eesti energiamajanduse arengukava aastani 2030“) alusanalüüside tulemusi ning tarbijahinnaindeksi kasvu pikaajalist prognoosi. Jooniselt on näha, et pärast 12 aasta täitumist, kui tootjal praegu kehtiva elektrituruseaduse kohaselt kaob õigus tootjatoetust saada, suureneb elektrienergia prognoositud ostu- ning müügihinna erinevus hüppeliselt. Majandusarvutuse tulemused on koondatud tabelisse 6.

Tabel 6. Majandusarvutuste tulemused
 Table 6. Economic calculation results

Indikaator	Tegelik	100% tarbimine
NPV	-5251 €	-1811 €
IRR	2,3%	4,9%
Lihttasuvusaeg	12,1	10,9

Tabelist 6 nähtub, et olemasoleva tarbimisstruktuuri jätkumisel oleks investeeringu rahavoo alusel arvatud tasuvusaeg 12,1 aastat, kuid tulususmäär 2,3%. Seda juhul, kui

investeering tehakse omavahenditest. Juhul kui mikrotootmisjaamas toodetud elektrienergia kuluks kõik eramu tarbimise katteks, lüheneks tasuvusaeg 11 aastani, samas suureneks projekti tulusumäär 4,9%-ni. Projekti nüüdisväärtus (diskontoteguriks valiti 6%) ei ole kummalgi analüüsitud juhul positiivne. Seega saab järeldada, et mikrotootmisjaama paigaldamise eesmärgiks ei peaks olema mitte elektri tootmine müügiks, vaid elektri tootmine mahus, mida suudetakse maksimaalselt ära tarbida.

Kokkuvõte

Artiklis käsitletud eramus oli aastane tarbimismaht 34,5 MW·h, PV-paneelide poolt toodetud energia 8,5 MW·h, millest eramus tarbiti ära 66%. Keskmise elektrienergia tarbimine ja päikesepaneelide tootmine olid vastavalt 95 kW·h ja 23 kW·h päevas. Kõige suurem oli PV-energia osakaal tarbimises juulis ja kõige väiksem jaanuaris. PV-jaama kogutoodang jagunes aastaegade lõikes järgmiselt: talv 3%, kevad 38%, suvi 45% ja sügis 14%. Aastane kulutus elektrienergiale oli kokku 3432 eurot. Ilma mikrotootmisjaamata oleks elektrienergia võrgust ostmisele kulunud 4436 eurot – aastase perioodi jooksul säästeti 1004 eurot. Jaama paigaldusmaksumuseks on võetud 1,38 €/W, mis teeb kogumaksumuseks 13 800 eurot. Eelnevast tulenevalt on mikrotootmisjaama tasuvusajaks 12,1 aastat ja investeeringu nüüdispuhasväärtuseks 5251 eurot.

Kasutatud kirjandus

Elektri hind lõpptarbijale. 2014.

http://www.energiatalgud.ee/index.php?title=Elektri_hind_1%C3%B5pptarbijale (08.10.2014).

Elering AS. Taastuenergia toetus. <http://elering.ee/taastuenergia-toetus> (27.09.2014).

Raudjärv, R., Kuskova, L. 2010. Energiatarbimine kodumajapidamistes. – Eesti Statistika Kvartalikiri, 1/13.

Wirth, H. 2014. Recent Facts about Photovoltaics in Germany. – Fraunhofer ISE.

ENERGY CONSUMPTION AND PRODUCTION ANALYSIS OF HOUSEHOLD WITH INTEGRATED MICROGENERATION

M. Märss, J. Järvik, A. Annuk, A. Allik, J. Uiga

PV panels and distributed generation is a growing trend in the field of energy production. The main advantage of a static solar PV system is the fact that there are no mechanically moving parts. Therefore the operating and maintenance costs are low. The main disadvantage is the variable nature of power output, which is common with almost all renewable resources. Today in most installations where PV systems are installed, the energy consumption is not linked to the production. This means that in times where energy consumption exceeds the production, electricity is drawn from the utility network. The utility will credit excess electricity produced from the PV system that is fed back to the utility network. To maximize the economic effect it is reasonable to use as much as possible of the produced energy on-site. In this paper the energy production and consumption in a residential household with a 10 kWp PV system is described and analysed.

PÄIKESEKIIRGUS MAA POOLE SUUNATUD KALDEGA PINDADEL

Teolan Tomson

TTÜ materjaliteaduse instituudi vanemteadur

Annotatsioon

Ehitiste sisekliima parendamiseks on viimasel ajal (peamiselt büroohoonetel) rakendatud „rippuvaid“ (maapinna suunas pööratud) fassaade. Käesolevas uurimuses täpsustatakse päikesekiirguse jaotust sellistel pindadel. Laus- ja lahkpilvede poolt määratud kiirgusolukordade ja erinevate pinnakatete (rohi, asfalt, lubjakivikruus, liiv, vesi ja lumi) juures tehtud eksperimentaalseid kiiritustiheduse jaotusseadusi võrreldakse ühedimensioonilise simulatsioonimudeli abil arvatututega. Kokkulangevus on enamasti hea, välja arvatud päikesepoolne lumikate. Simulatsioonimudeli sisendiks on neljas erinevas asendis tehtud kogukiirguse mõõteandmed ja seinale ette antavad asimuudid ning kaldenurgad, millele toimivat päikesekiirgust arvutatakse. Andes ette päikese näiva asendi kõrgusnurga juhuslikke väärtusi, on võimalik simuleerida päikesekiirguse dünaamilist käitumist kaldpindadel.

Märksõnad: päikese kiiritustihedus, simulatsioonimudel, pilvkate.

Sissejuhatus

Ehitiste sisekliima parendamiseks on viimasel ajal (büroohoonetel) rakendatud nn ripuvaid (maapinna suunas pööratud) fassaade. Näiteks toome Tallinnas Peterburi maanteel asuva hoone, vt joonis 1. Selline fassaad surub suviti maha ruumide ebasoovitavat päikesekütet ja lume kõrge albeedo tõttu võib suurendada nende valgustatust talvel. Kuna igapäevases päikeseenergeetikas (sooja vee ning PV-elektri tootmine) leiavad kasutamist taeva poole suunatud kalded, pole päikesekiirguse jagunemist sellise kaldega pindadel eraldi uuritud. Seda tehakse käesolevas uurimuses, pidades silmas päikesekiirguse dünaamikat.

On kasulik meelde tuletada, et päikesekiirguse (kiiritustiheduse) uurimisel (Tooming, 2003) mõõdetakse päikese suunast langevat otsekiirgust G_b^1 , seda kinni kattes atmosfääri hajukiirgust G_d ja maapinnalt tagasipeegeldavat kiirgust G_r . Kogukiirgus G leitakse tavaliselt neist kahest esimesest arvutuslikult. Andmed esitatakse (tavaliselt tunni, päeva, kuu või aastate) keskvaärtustena. Senised kiiritustiheduse jaotuse arvutusmudeliid on orienteeritud neile keskvaärtustele ega suuda kirjeldada dünaamilisi protsesse. Dünaamiliste protsesside uurimiseks kasutatakse allpool päikesekiirguse komponentide (otse- ja hajukiirguse) uudset hindamismetoodikat ning tuuakse sisse senitundmatu

¹ Kõikide kasutatud sümbolite tähendus on seletatud artikli lõpus avaldatud sümbolite loendis.



Joonis 1. Rippuva fassaadiga hoone Peterburi teel Tallinnas
 Figure 1. A self-shaded façade in Tallinn at St. Petersburg Highway

imaginaarkiirguse G_p (*imaginable component*) mõiste. Mõistagi on dünaamilises režiimis leitud seaduspärasustelt kerge tagasi tulla staatika juurde.

Mõõteaparatuur ja -metoodika

Kiiritustiheduse jaotuse dünaamilise arvutusmudeli sisendiks on tarvis kogukiirguse kiiritustiheduse (põhimõtteliselt üheaegselt mõõdetud) väärtusi neljas tasapinnas: ülespidisel horisontaalpinnal G_θ , alaspidisel horisontaalpinnal G_r , päikese poole suunatud vertikaalpinnal G_{FV} ning selle vastasküljel, varjus oleval vertikaalpinnal G_{BV} . Kasutatud mõõtestendi tutvustab foto joonisel 2. Stend koosneb vertikaalsest rattast, millele on kinnitatud sammuga $22,5^\circ$ (või 45°) inertsivabad fotoelektrilised püranomeetrid $S(0) \dots S(180)$. Sulgudes on näidatud anduri kaldenurk horisontaaltasapinna suhtes; positiivsed kalded on päikese poole pööratud, negatiivsed sellest kaugemale. Ratas omakorda on pööratav ümber vertikaaltelje sammuga $22,5^\circ$ või 90° .

Andurite näidud kirjutatakse mitmekanalilisse datalogerisse Midilogger GL-200 samplimisintervalliga 1 sekund. Stend võimaldab mõõta kiiritustiheduse vertikaalsuunalist ja ruumilist jaotust.

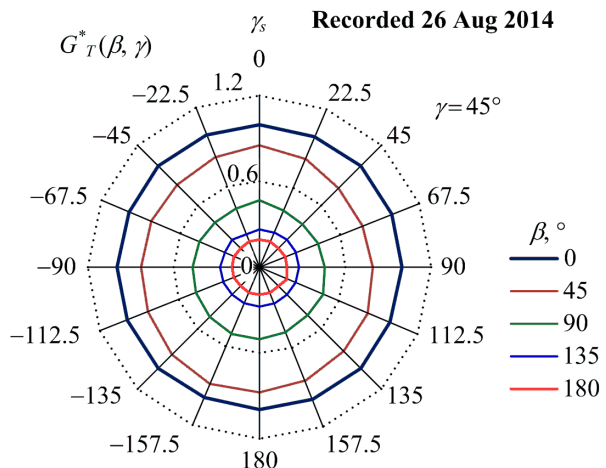


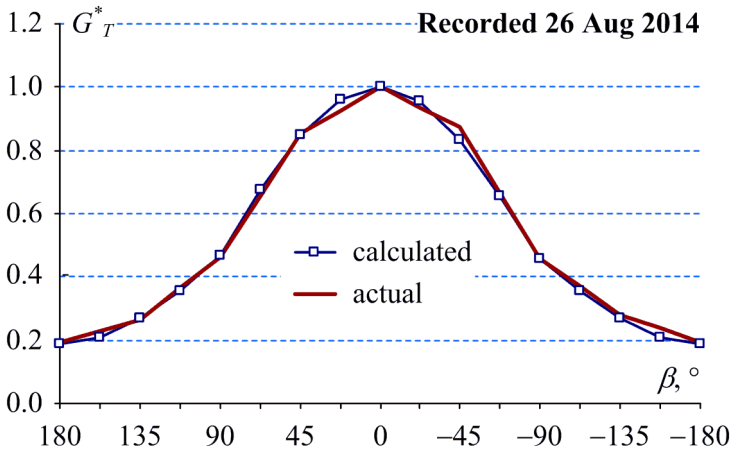
Joonis 2. Eksperimentaalne mõõtestend, kohandatuna kalletele $90^{\circ} < \beta < 180^{\circ}$
 Figure 2. Experimental measurements stand, justified for tilt angles $90^{\circ} < \beta < 180^{\circ}$

Kiiritustiheduse mõõdetud jaotusseadus kaldpindadel

Joonisel 3 on kujutatud kiiritustiheduse ruumiline jaotus tiheda lauspilvituse puhul, mis on sümmeetriline keskpunkti (seniidi) suhtes. Selle päikesesuunaline ($\gamma = 0$) läbilõige (mis on kiiritustiheduse vertikaalne jaotus) on kujutatud joonisel 4 ja seda iseloomustab monotoonselt langev kiiritustihedus ($dG^*_T/d\beta < 0$). Joonisel 3 kujutatud jaotus kehtib ka üksiku paksu pilve varjus, mis põhjustab madala kiiritustiheduse $G_0 < \sim 200 \text{ Wm}^{-2}$. Sellist jaotust põhjustab ühtlaselt jagunenud hajukiirgus otsekiirguse puudumisel. Kiiritustiheduse vertikaalse jaotuse diagrammidel on jämeda joonega kujutatud mõõdetud (*actual*) ning peene joonega simuleeritud (*calculated*) väärtused.

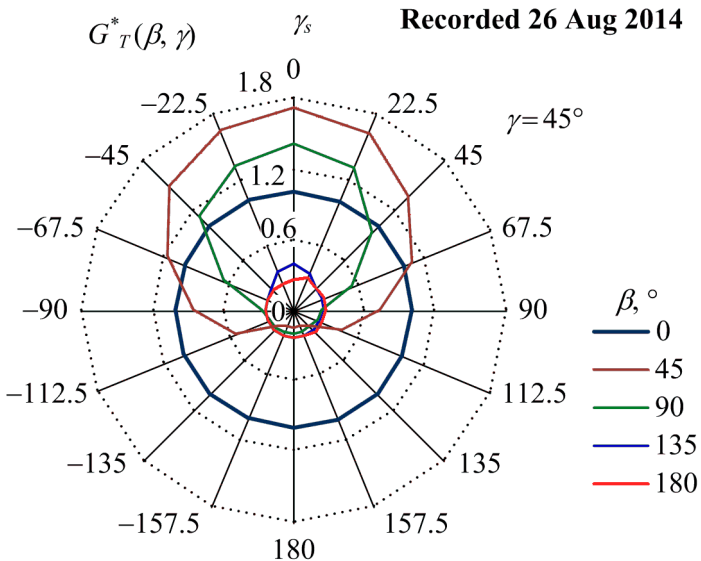
Joonis 3. Kiiritustiheduse ruumiline jaotus tiheda lauspilvituse $G_0 = 110 \text{ Wm}^{-2}$ juures
 Figure 3. Space image of distribution of solar irradiance under thick cloud-cover at $G_0 = 110 \text{ Wm}^{-2}$





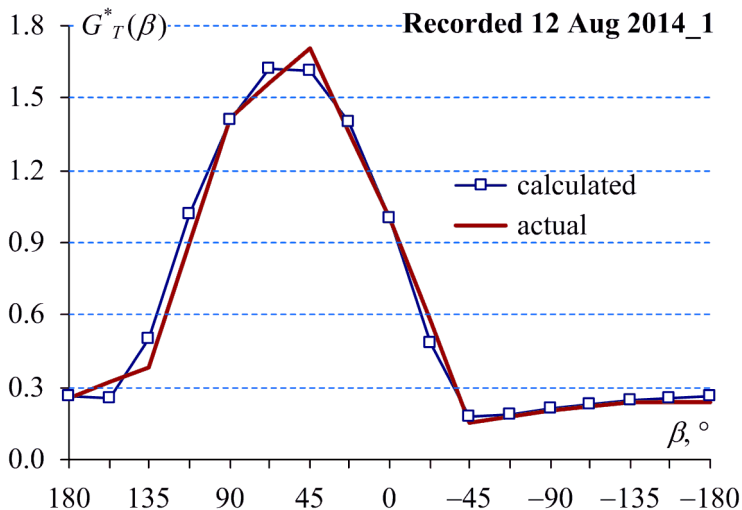
Joonis 4. Kiirustiheduse vertikaalne jaotus tiheda lauspilvituse $G_0 = 110 \text{ Wm}^{-2}$ juures piki $\gamma = 0^\circ/180^\circ$ telge
 Figure 4. Vertical distribution of irradiance under thick cloud-cover at $G_0 = 110 \text{ Wm}^{-2}$ along the $\gamma = 0^\circ/180^\circ$ axis

Selge taeva (suure pilvedevahelise akna) puhul iseloomustab kiirustiheduse ruumilist jaotust sümmeetria päikese suunda läbiva vertikaaltasapinna suhtes ja ebasümmeetria selle risttasapinna suhtes, vt joonised 5 ja 6.



Joonis 5. Kiirustiheduse ruumiline jaotus selge taeva (suure pilvitu akna) $G_0 = 588 \text{ Wm}^{-2}$ juures
 Figure 5. Space image of distribution of solar irradiance in clear-sky conditions (in a large window) at $G_0 = 588 \text{ Wm}^{-2}$

Seda jaotust põhjustab domineeriv otsekiirgus ning hajukiirguse ja peegeldunud kiirguse koostoime pindadel, kuhu otsekiirgus langeda ei saa (varjupoolel).

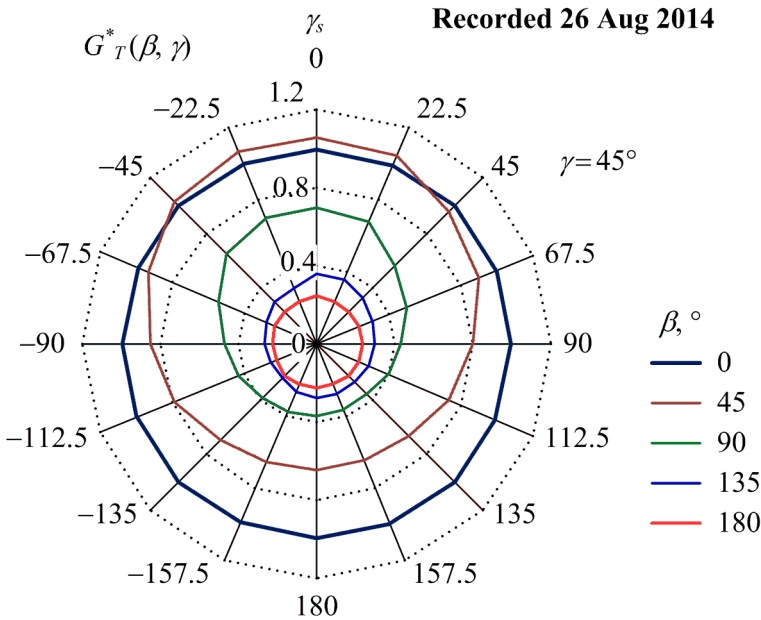


Joonis 6. Kiirustiheduse vertikaalne jaotus selge taeva (suure pilvitu akna) korral piki $\gamma = 0^\circ / 180^\circ$ telge.

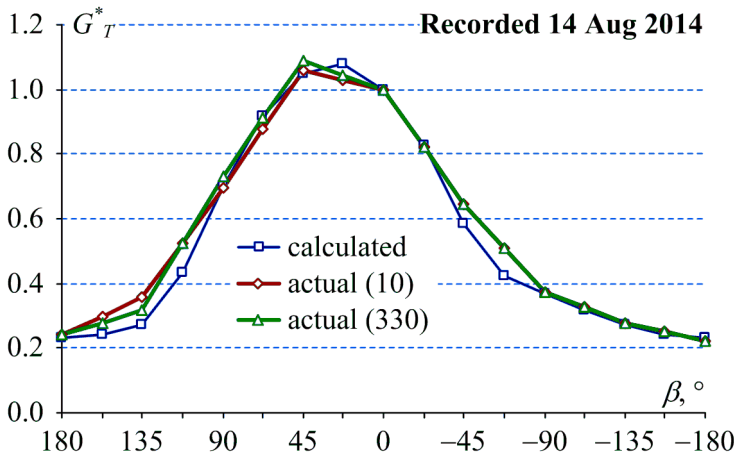
Figure 6. Vertical distribution of irradiance in clear-sky conditions (in a large window) at $G_0 = 588 \text{ Wm}^{-2}$ along the $\gamma = 0^\circ / 180^\circ$ axis

Tuleb osutada tähelepanu sellele (joonis 5), et kõrgete maapinna suunas pööratud kallete juures $\pm\beta > 135^\circ$ jääb kiirustiheduse ruumiline jaotus suunast sõltumatuks. Seda põhjustab domineeriv peegeldunud kiirgus (rohukattega pinnaselt) ning sõltumatu jaotus tõestab selle komponendi isotroopset iseloomu. Kiirustiheduse vertikaalne jaotus joonisel 6 on täiesti ebasümmeetriline ja mittemonotoonne ($dG_T/d\beta < 0 < dG_T/d\beta$). Enamiku lahkpilvede $G_0 > 200 \text{ Wm}^{-2}$ tihedus pole piisav otsekiirguse täielikuks varjutamiseks tema pikalainelises ($\lambda > 0,8 \text{ mm}$) osas ja seetõttu on nende varjudes kiirustihedus kummagi eelmise diagrammi vahepealne – joonised 7 ja 8.

Ruumiline diagramm (joonis 7) jääb valdavalt sümmeetriliseks tasapinna $\gamma = 0^\circ / 180^\circ$ suhtes, kuid erandjuhtudel võib sümmeetriatasapind nihkuda $\gamma \neq 0^\circ / 180^\circ$. Joonisel 8 tuleb pöörata tähelepanu kahele erinevale jaotusele positiivsete kaldenurkade $\beta > 0$ juures, mis on salvestatud vastavalt 10ndal ja 330ndal sekundil. See viitab asjaolule, et otsekiirgus saabub erinevatest suundadest läbi pilvkatte hõredamate kohtade, mis muudavad oma asukohta vastavalt pilvede liikumisele. See olukord vastab muutuva kõrgusega α_p imaginaarsele kiirgusallikale. Seda nähtust on eelnevalt käsitletud (Tomson 2013), kuid käsitluses esitatud pilvedelt peegeldunud kiirguse hüpoteesi oli ilmselt en-



Joonis 7. Kiirustiheduse ruumiline jaotus hõreda lauspilvituse (sama hõreda lahkpilve varjus) juures $G_0 \approx 400 \text{ Wm}^{-2}$
 Figure 7. Space image of distribution of solar irradiance under sparse cloud-cover (under sparse discrete cloud) at $G_0 \approx 400 \text{ Wm}^{-2}$

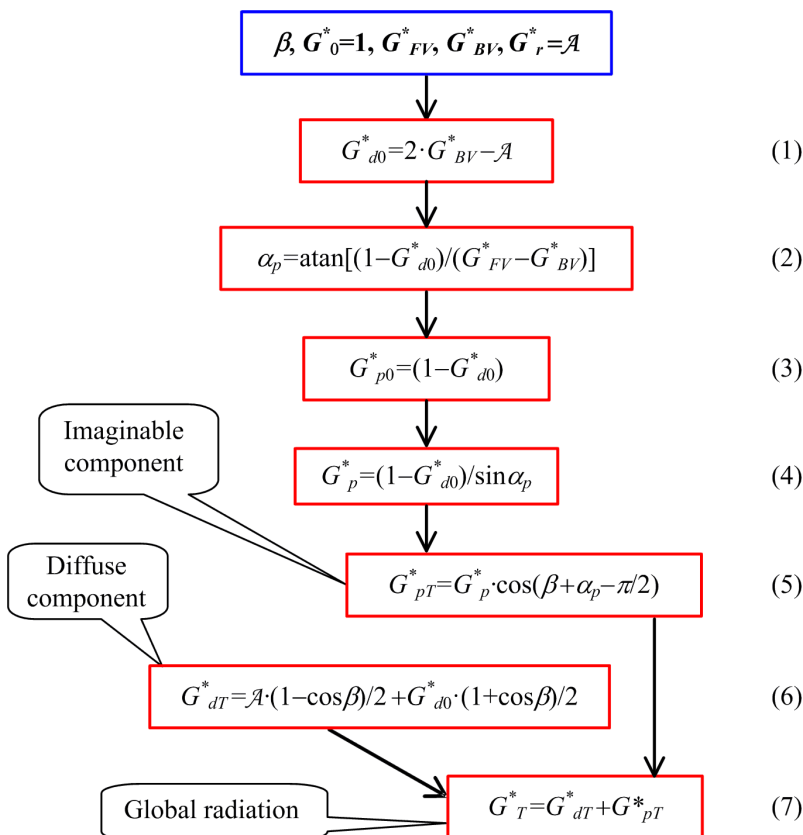


Joonis 8. Kiirustiheduse vertikaalne jaotus hõreda lauspilvituse (hõreda lahkpilve varjus) $G_0 \approx 400 \text{ Wm}^{-2}$ korral piki $\gamma = 0^\circ / 180^\circ$ telge
 Figure 8. Vertical distribution of solar irradiance under sparse cloud-cover (under sparse discrete cloud) at $G_0 \approx 400 \text{ Wm}^{-2}$

natlik ja peamine kiiritustiheduse jaotuse ebastabiilsuse põhjustaja on siiski otsekiirguse selle silmale nähtamatu lainepikkusel. Suurtel kaldenurkadel $\pm\beta > 135^\circ$ on otsekiirguse mõju ainult kaudne (peegeldunud kiirguse arvel) ja jaotusseaduse ebastabiilsus tühine. Küll on see oluline kaldenurgal 90° (harilikel akendel). Andes ette päikese näiva asendi kõrgusnurga juhuslikke väärtusi, on võimalik simuleerida päikesekiirguse dünaamilist käitumist kaldpindadel.

Kiiritustiheduse jaotuse simulatsioonimudel kaldpindadele

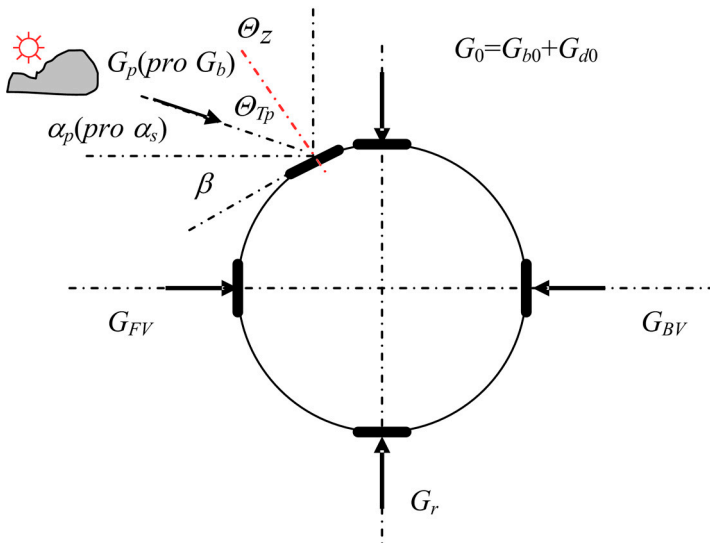
Seni esitatud joonistel 3–8 on vastandatud mõõdetud ja arvatud kiiritustiheduse jaotust. Arvutamiseks on kasutatud ühedimensioonilist (1D) kiiritusjaotuse simulatsiooni-mudelit; esialgu päikese asendit läbivas vertikaaltasapinnas, vt joonis 9. Jaotusseadusele erinevates suundades on viidatud allpool.



Joonis 9. 1D simulatsioonimodeli graaf kiiritustiheduse (kogukiirgus) leidmiseks suvalise kaldega tasapinnal

Figure 9. Flow diagram of the 1D simulation model calculating global irradiance on any optionally tilted surface

Kirjeldatav simulatsioonimudel on komponeeritud suhtelistes ühikutes vastavalt hüpo-teesile, et peegeldunud ja hajukiirgus on mõlemad jaotunud isotroopselt (Liu ja Jordan 1963) ja mitteisotroopsust põhjustab päikese näiv asend kõrgusnurgaga $\alpha_p = \text{var}$, mis üldjuhul erineb tema füüsilisest kõrgusest α_s . Joonisel 10 on kujutatud simulatsioonimudeli graaf, mis näitab operatsioonide järjekorda. Ette antud või mõõdetud lähteandmed on kujutatud poolpaksus kirjas. Suhtelised suurused on tähistatud viitemärgiga * ja kasutatud sümboleid selgitab joonis 10; Φ tähendab päikese suunda. Päikese näiv kõrgusnurk α_p on leitav neljas erinevas tasapinnas mõõdetud kogukiirgusest. Seejuures on tegemist kõikide komponentide jooksva (s.o antud hetkel määratud) väärtustega, mis on vajalik dünaamilise situatsiooni kirjeldamiseks.



Joonis 10. Kirjeldatavas 1D mudelis kasutatud sümboleite graafilise selgitus
Figure 10. Graphical comments on symbols, which are used in the flow diagram above

Tutvustatav mudel on universaalne: tiheda lauspilvituse puhul $G^*_{pT} = 0$ ja kui on tegemist päikese suunast erineva kaldpinnaga, siis

$$G^*_{pT}(\gamma) = G^*_{pT} \cdot \cos\gamma. \quad (8)$$

Üle 30 eksperimentaalselt kontrollitud kiiritustiheduse jaotuse juures vaid 3% juhtumitel olid kindlad tunnused sellest, et päikese näiv asend ei lange kokku tema tegeliku asimuudiga. Esitatud ja allpool täiendavalt esitatavate diagrammide arvutuslik ja tegelik jaotus langevad hästi kokku.

Erinevate pinnaste albeedo

Kuna mudel toetub oluliselt maapinnalt tagasi peegelduva kiirguse väärtusele, kontrolliti erinevate pindade albeedot $G^*_r = A$ eksperimentaalselt. Tabelis 1 on esitatuid võrdluseks ka käsiraamatu (Martin ja Goswami 2005) andmed A .

Tabel 1. Mõõdetud albeedo

Table 1. Actual albedo

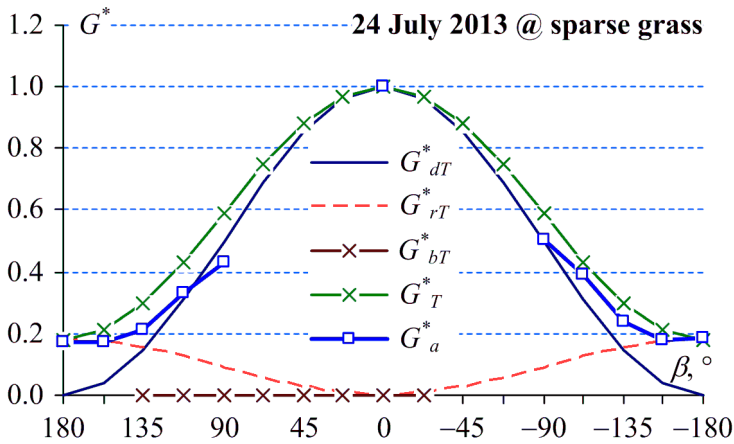
Pinnas	G_0 , Wm ⁻² ja kommentaar	α_s , °	γ_s , °	G^*_{FV}	$G^*_r = A$	A
Lopsakas rohi	826, selge	48,1	136,9	1,1	0,23	0,26
Lopsakas rohi	215, lauspilves	46,4	134,1	0,58	0,23	- " -
Kidur rohi	690, selge	47,6	141,6	0,95	0,20	0,20
Asfalteeritud	527, selge	35,5	106,6	1,3	0,16	0,13
Asfalteeritud	197, lauspilves	36,6	108,8	0,49	0,15	- " -
Paekillustik	671, selge	48,1	166,3	1,15	0,27	-
(ranna)liival	712, selge	44,5	131,1	1,05	0,19	-
(Tiigi)vees	823, selge	46,4	137,5	0,92	0,07	0,07
Lumel	526, selge	35,7	174,6	1,84	0,7	0,75

Tabel kinnitab, et albeedo ei sõltu kiirustingimustest. Eriti kõrge vertikaalse suhtelise kiirustiheduse väärtus on lumel: päikesepoolsel vertikaalpinnal $G^*_{FV} = 1,84$, mis viitab lume eriomadustele ja see ilmneb ka allpool. Vesi päikesekiirgust praktiliselt ei peegelda.

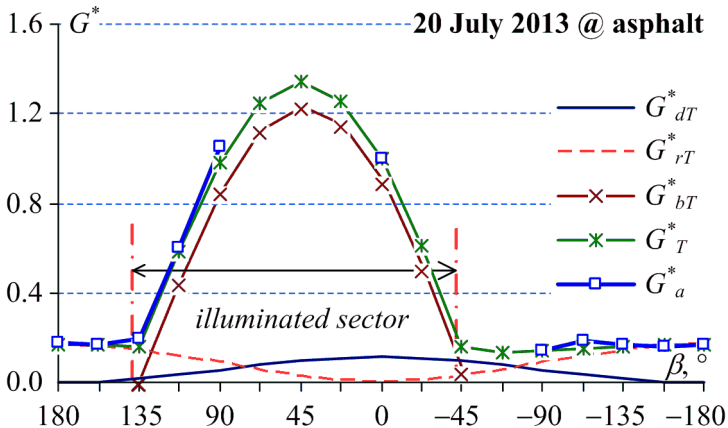
Kiirustiheduse jaotus kaldpindadel erinevate pinnaste puhul

Käesolevas lõigus kasutatakse kaldpindade $22,5^\circ$ sammu $\beta \in \{0, 22.5, \dots, 90\}$. Joonised 11–13 esitavad mõõtetulemusi koos arvutatud väärtustega. Jäme joon G^*_α on mõõdetud tegelik (*actual*) suhteline kiirustihedus, peened jooned on 1D simulatsioonimudeliga arvutatud väärtused. Selguse mõttes on esitatud ka selle üksikud komponendid: haju- G^*_{dT} , peegeldunud G^*_{drT} ja otsene kiirgus G^*_{dbT} . Mudeli kvaliteeti saab võrrelda joonte G^*_α ja kogukiirguse G^*_T omavahelise asendi järgi. Joonis 11 esitab TTÜ staadionil hõredal rohul lauspilvede all mõõdetud kiirustihedust päikese asimuudi suunalises vertikaaltasapinnas.

Joonis 12 esitab samasuguse jaotuse mõõdetuna Laagri Maksimarketis asfalteeritud parkimisplatsil selge ilma puhul.



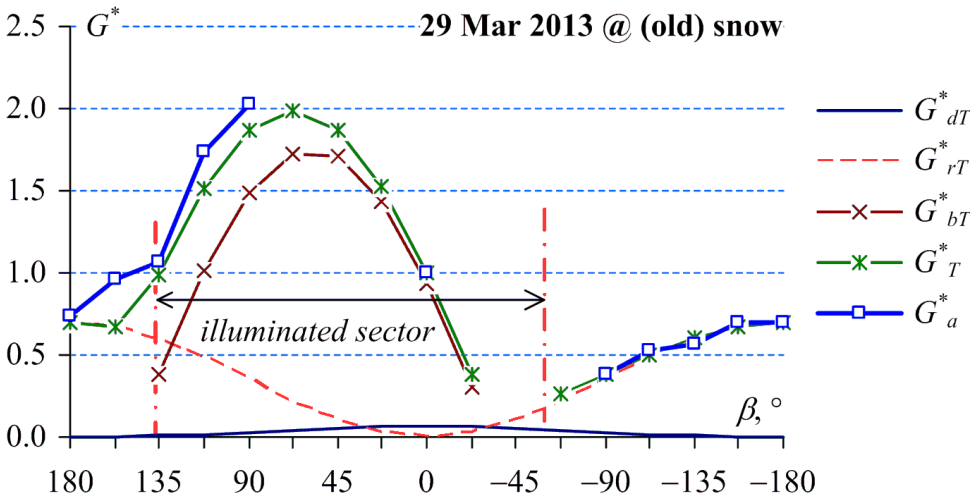
Joonis 11. TTÜ staadionil hõredal rohul lauspilvede all mõõdetud kiirustihedus päikese asimuudi suunalises vertikaaltasapinnas
 Figure 11. Vertical distribution of solar irradiance, measured on sparse grass at stadium of Tallinn University of Technology under overcast clouds



Joonis 12. Selge ilmaga asfaltkattel mõõdetud kiirustiheduse jaotus päikese asimuudisuunalises vertikaaltasapinnas
 Figure 12. Vertical distribution of solar irradiance, measured on asphalt of a car park in clear-sky conditions

Joonis 13 esitab vana lumega kaetud Pääsküla prügimäel selge ilmaga mõõdetud kiirustiheduse jaotuse. Siin on näha, et nurkadel $\beta > 135^\circ$ isotroopse peegeldunud kiirguse mudel ei kehti. Nähtavasti on lumi küllalt peene struktuuriga selleks, et piki päikest toimiks peegli-tüüpi (*mirror-like*) peegeldumine. Sama efekt esineb ka värskel lume korral ja kuna on tegemist anomaaliaga, korrati neid mõõtmisi mitu korda, et vältida võimalik-

ku eksitust. Küllalt heledal paekillustiku karjääri põhjal (joonis 2) samasugust efekti ei teki ja seal jääb peegeldunud kiirguse jaotus isotroopseks. Joonis 13 tõestab, et ka päikesest ära pööratud pindadele $\beta < -90^\circ$ toimib lumelt peegeldunud kiirgus isotroopsena. Mitmete (siin mitte esitatud) diagrammide võrdlemisel näib, et mida madalam on albeedo, seda paremini kirjeldatud mudel tegelikkust peegeldab. Eriti hea kokkulangevus ilmneb vee poole pööratud kaldpindadel.



Joonis 13. Selge ilmaga vanal lumel mõõdetud kiiritustiheduse jaotus päikese asimuudi suunaliises vertikaaltasapinnas

Figure 13. Vertical distribution of solar irradiance, measured on old snow-cover in clear-sky conditions

Kokkuvõte

Päikesekiirguse tiheduse dünaamilist jaotust mitmesugustel (erinevate kaldenurkade ja asimuutidega) kaldpindadel kirjeldab hästi ühedimensiooniline simulatsioonimudel, mis tugineb neljale kogukiirguse väärtusele, mõõdetud horisontaalsel ülespidisel pinnal, horisontaalsel alaspidisel pinnal ning päikese poole ja sealt eemale pööratud vertikaalpindadel. Hõre ebahütlane pilvkate muudab päikese näivat asendit, mis deformeerib jaokiirgustiheduse jaotusdiagrammi ning pilvkatte liikumise tõttu kujuneb see jaotus teatud piirides juhuslikuks. Andes ette päikese näiva asendi kõrgusnurga juhuslikke väärtusi, on võimalik simuleerida päikesekiirguse dünaamilist käitumist kaldpindadel.

Sümbolite loend

$A = G_r / G_0$	–	albeedo
G , Wm^{-2}	–	kogukiirguse kiiritustihedus
G_0 , Wm^{-2}	–	kogukiirguse kiiritustihedus ülespidi horisontaalpinnal
$G_{\alpha T}$, Wm^{-2}	–	mõõdetud tegelik kiiritustihedus kaldpinnal
G_b , Wm^{-2}	–	otsekiirguse kiiritustihedus
G_{b0} , Wm^{-2}	–	otsekiirguse kiiritustihedus ülespidi horisontaalpinnal
G_{d0} , Wm^{-2}	–	hajukiirguse kiiritustihedus ülespidi horisontaalpinnal
G_p , Wm^{-2}	–	imaginaarkiirguse kiiritustihedus
G_r , Wm^{-2}	–	aluspinnaal peegeldunud kiirguse kiiritustihedus
G_{VB} , Wm^{-2}	–	kogukiirguse kiiritustihedus varjus oleval vertikaalpinnal
G_{VF} , Wm^{-2}	–	kogukiirguse kiiritustihedus valgustatud vertikaalpinnal
G_T , Wm^{-2}	–	kogukiirguse kiiritustihedus kaldpinnal
G_{bT} , Wm^{-2}	–	otsekiirguse kiiritustihedus kaldpinnal
G_{dT} , Wm^{-2}	–	hajukiirguse kiiritustihedus kaldpinnal
G_{pT} , Wm^{-2}	–	imaginaarkiirguse kiiritustihedus kaldpinnal
G_{rT} , Wm^{-2}	–	peegeldunud kiirguse kiiritustihedus kaldpinnal
G_{bT} , Wm^{-2}	–	otsekiirguse kiiritustihedus kaldpinnal
G_T , Wm^{-2}	–	kogukiirguse kiiritustihedus kaldpinnal

NB: suhteliste väärtuste eraldamiseks on kasutatud viitemärki, näiteks

$G^*_{b=Gb} / G_0$	–	suhteline otsekiirguse kiiritustihedus
α_s	–	päikese kõrgusnurk
α_p	–	päikese näiv kõrgusnurk
θ_T	–	otsekiirguse kohtumisnurk (kaldpinnal)
θ_{Tp}	–	imaginaarkiirguse kohtumisnurk (kaldpinnal)
θ_Z	–	seniidinurk

Kasutatud kirjandus

- Liu, B.Y.H., Jordan, C. 1963. The long-term Average Performance of Flat-plate Solar Energy Collectors: With design data for the U.S, its outlying possessions and Canada. – Solar Energy 7, 53–74.
- Martin, L., Goswami, B. Y. 2005. Solar Energy Pocket Reference. – ISES, Freiburg, Germany, 36.
- Tomson, T. 2013. Hajukiirgus Eestis. – Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine XV. Eesti Maaülikool, Tartu, 86–95.
- Tooming, H. (Toim). 2003. Eesti kiirguskliima teatmik. – EMHI. Tallinn, 384 lk.

SOLAR RADIATION ON SURFACES, INCLINED DUE TO THE PLANE OF THE GROUND

Teolan Tomson

To achieve better indoor climate in (administrative) buildings time shelf-shaded facades have become popular recently. Unfortunately quality of solar radiation on such surfaces has not been studied much. In the present study distribution of solar irradiance on inclined surfaces have been studied in conditions of various clouds and grounds (grass, asphalt, gravel, sand, water and snow). Actual experimental results have been compared with calculated values using a novel dynamical 1D simulation model. This model uses measured values of the global irradiance on four planes as input data: horizontal, reverse horizontal and on vertical planes due sun and backward. Coincidence of both (calculated and actual) distribution laws is satisfactory. Varying height angles of the imaginable position of sun randomly, it is easy to simulate influence of moving clouds to the distribution of irradiance on tilted surfaces.

**UUENDUSED HOONE ELEKTRISÜSTEEMIS: MUDEL,
KLASSIFIKATSIOON JA KASUTAMISE TULEMUSTE
PROGNOOSIMINE. PÄIKESEPANEELIDE KASUTAMINE
NURMEVÄLJA LOGISTIKAKESKUSES (80 KW) JA AGAL
KINNISVARADE TOOTMISHOONES (140 KW) –
ESMANE ANALÜÜS**

Valeri Saikovski

doktorant, TTÜ elektrotehnika instituut

AS Caverion Eesti käidujuht

valeri.saikovski@caverion.ee

Annotatsioon

Antud artikkel koosneb kahest osast. Esimene on teoreetiline, mis sisaldab niisuguste meetodite kirjeldust, mida on võimalik kasutada hoone elektrisüsteemi (ES) uuringutes ja analüüsimises. Suurem osa meetoditest on kirjeldatud autori varasemates artiklites, mis on ilmunud TEUK-XIII, TEUK-XIV ja TEUK XV konverentside kogumikes: hoone elektrisüsteemi mudel (TEUK-XIII), arukas võrk ja uuenduste klassifitseerimine (TEUK-XIV) ning uuenduste prognoosimine (TEUK-XV).

Artikli teises osas esitakse kahe uuringu tulemusi kahe päikesepaneelidega objekti kohta, mis on ehitatud 2014. aasta kevadel ning mis on kõige suurema võimsusega päikesepaneelidega objektid käesoleval ajal Eestis. Artikkel sisaldab nende planeeritud tasuvuse andmeid, maksimaalse võimsuse saavutamise tulemusi ja tootlikkuse andmeid kuude kaupa.

Märksõnad: hoone elektrisüsteem, hoone elektrisüsteemi mudel, uuendus, uuenduste tulemuste prognoosimine, taastuenergia allikad, fotoelektrilised päikese süsteemid, päikesepaneelide kaldenurk, tasuvus.

Sissejuhatus

Tavaline elektrisüsteemi ehitamise praktika on iga võimaliku uuenduse kasutamise kohta projekti ja eelarve (hinnapakumine) koostamine, et siis finantsvõimalustest lähtuvalt langetada otsus uuenduse otstarbekuse kohta. Tihti ei arvestata nende uuenduste valiku otsuse langetamisel konkreetse uuenduse mõjuga ülejäänud elektripaigaldisele ja muude faktoritega (näiteks hoolduskulude muutus, käidu funktsioonid, tasuvusaeg).

Artikli esimeses osas esitatakse 2011.–2014. a TEUK-i konverentsidel avaldatud uurin-
gute kokkuvõte, mis sisaldab katset arvestada komplekselt kõiki võimalikke faktoreid,

süsteematiseerida uuendused ja prognoosida uuenduse kasutamise tulemused ilma kee-
rulist dokumentatsiooni vormistamata.

Teises osas esitatakse kahe uue objekti fotoelektrilise päikesest energia tootmise süs-
teemi (PS) tootlikkuse ja võimsuse andmed ning nende eelnev tasuvusarvutus. Selle
uuringu eesmärk oli võrrelda töövõtja poolt planeeritud tootlikkust ja tasuvust prak-
tilises kasutamises saavutatuga. Lisaks kontrolliti fikseeritud maksimaalset võimsust
projekteeritud nominaalparameetritega. Artiklis selgitatakse ja põhjendatakse esitatud
tulemusi.

1. Hoone elektrisüsteemi (ES) uuendused. Klassifitseerimine ja uuenduste kasuta- mise prognoosimine

1.1. Uuenduste kasutamise analüüs. ES mudel

Autori doktoritöö teema ning kõigi uuringute põhisuund ja -eesmärk on elektripaigaldi-
se tehniliste ning majanduslike parameetrite analüüs ja konkreetse uuenduse kasutamise
tulemuste prognoosimine. Iga uuring peab olema konkreetse eesmärgiga ja sisaldama
hindamise kriteeriume, sest on võimatu saavutada kõiki eesmärgi korruga, nt ei saa olla
odavat lahendust, mis vähendab energiatarbimist, parendab käidu funktsioone ja kasu-
tab keskkonnasõbralikku taastuvenergiaallikat.

Igal positiivsel mõjul on oma hind ja uuringute eesmärgiks ongi määrata vastavus konk-
reetsele kriteeriumile ja arvestada tasuvus.

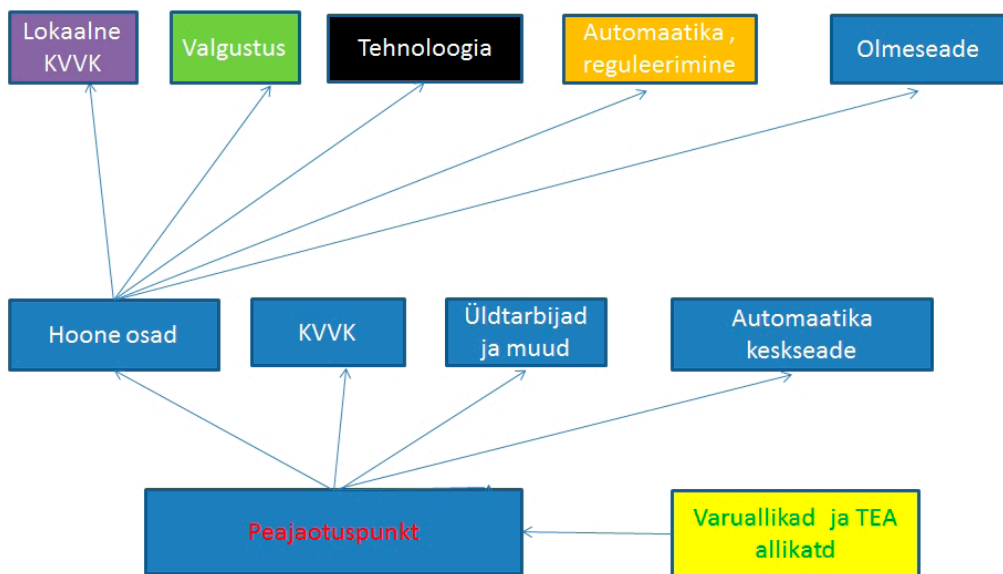
Võimalikud tehnilised kriteeriumid, millega arvestada, on energia kokkuhoid, arvutus-
liku võimsuse vähenemine, käidufunktsioonide ja töökeskkonna paranemine. Võimali-
kud majanduslikud parameetrid on uuenduse realiseerimise maksumus, hoolduskulude
optimeerimine ja mõistlik tasuvusperiood. Uuenduse otstarbekuse kõige tähtsam kritee-
rium on tavaliselt tasuvus, kuid on võimalik, et esialgne prioriteet on teiste kriteeriumite
täitmine.

Autori artiklis „**Innovatiivsed lahendused hoone elektrisüsteemis: struktuuri mo-
delleerimine, lahenduse realiseerimise majanduslikud ja tehnilised aspektid. Lõp-
liku variandi valiku algoritm**“ TEUK-XIII kogumikus on kirjeldatud hoone ES-i
mudelit ja üldisi põhimõtteid, et seatud eesmärgi saavutada. Hoone elektrisüsteemi
mudel (HESM), mis vastab Eesti elektriehituse traditsioonidele, on koostatud, lähtu-
des eesmärgist kirjeldada reaalsete hoonete ES-i füüsilisi protsesse ning selle tehniliste
parameetrite kuju sarnaneb elektriehituse dokumentatsioonile ning majanduslikelt pa-

rameetritelt oma elektriehituse eelarvetele ja muu praktikas kasutatava tegevuse traditsioonidele: tasuvusarvutuse põhimõtted, energiatarbimise arvutused.

Ühtlasi on vaja HESM-i kohandada nii praktika kui teoreetiliste uuringute jaoks. Mudel peab olema universaalne ja kirjeldama iga võimaliku hoone ES-i, sh peab olema võimalus iga uuenduse võimalikku mõju kirjeldada maksimaalse täpsusega. Samuti peab HESM arvestama selle võimaliku realiseerimisega mitmes etapis.

Oluline nõue mudelile on lihtsus, sest ei ole mõislik pakkuda mudelit, mida on keeruline kasutada. Autor loodab, et alltoodud mudel vastab kõigile kirjeldatud nõuetele. Mudel on esitatud joonisel 1.



Joonis 1. Hoone ES-i struktuurimudel
Figure 1. Building ES model

1.2. Elektrisüsteemi uuenduste eesmärk ja võimalik innovatsioonide klassifikatsioon

ES-i uuendamise põhieesmärk on hoone ning selle toitevõrgu tasandil saavutada vastavus uue põlvkonna võrgule, mida nimetatakse arukas võrguks (*smart-grid*). Üksikasjalikult on sellest kirjutatud autori TEUK-XIV artiklis „**Hoone elektrisüsteemi innovatsioonid ja aruka võrgu arendus**“. Kõik realiseeritavad uuendused peavad parinema ES-i aruka võrgu suunas. Hooneosade tasandil peavad tekkima lokaalsed arukad võrgud

(LAV). Uuendused, mille realiseerimise käigus on võimalik saavutada sobiv tasuvus, kuid tulevikus on keeruline aruka võrgu kriteeriume realiseerida, määratletakse kui ebaotstarbekad.

Uuenduste kasutamine tuleb süstematiseerida nii, et oleks võimalik kirjeldada nende mõju elektrisüsteemile. Selle eesmärgi saavutamiseks esitatakse TEUK-XIV artiklis võimalike uuenduste klassifikatsioon (vt tabel 1).

Tabel 1. ES-i innovatsioonide klassifikatsioon
Tabel 1. ES innovations classification

A	Lõpptarbijat puudutavad innovatsioonid
A1	Võimsust või muid näitajaid muutvad tehnilised uuendused
A2	Uuendused juhtimises ja automaatikas
A3	Käidufunktsioone parendavad uuendused
B	Elektritootmist või toitevõrku puudutavad innovatsioonid
B1	Uued tehnoloogilised protsessid, mis on vajalikud elektritootmise 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). Juhtimise uuendamine arendab võrku LAV-i suunas, mõjutades sealhulgas ka käidufunktsioone. Näiteks LED-valgustuse kasutamine ja sellega kaasnev lõpptarbija võimsuse vähenemine on lõpptarbija jaoks tehnoloogiline innovatsioon A1, kuid valguse reguleerimise võimalusega valgustite ja programmeeritavate kontrollrite 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 võimsuse-

ga taastuenergiaallikatest (TEA) tootmine. B2-tüüpi kuuluv uuendus on selle poolest A2-tüüpi uuendusega sarnane, et see ei muuda võimsusi või tehnoloogilisi protsesse. Mitmed uue põlvkonna TEA-d koos tavaelektrivõrguga moodustavad hajatootmise. Uue põlvkonna elektrienergiaallikad ei ole tihti stabiilse tootlikkusega. Tuleb kasutada keerulist reguleerimist, tagasisidet tavavõrgust ja otsuste langetamise automaatikat. Uue põlvkonna energiaallikate kasutamine toob kaasa elektrienergia kvaliteedi tagamise probleemid. Kirjeldatud funktsioonid on erinevad võrreldes A2 uuendustega, sealhulgas tehnilise realiseerimise mõttes, mis teeb vajalikuks eraldi grupi moodustamise.

On võimalikud olukorrad, milles LED-valgustus ei mõjuta kuigi oluliselt elektrisüsteemi tehnilisi parameetreid, nt värviline fassaadivalgustus on lihtsalt ilusam või mingi uuenduse kasutamise korral töökeskkond natuke ohutum – see on C-tüüpi innovatsioon. Analoogiliselt eelmise näitega on ka väiksed elektrituulikud ja päikesepatareid tihti lõpptarbijale lihtsalt varu-energiaallikad ja B-tüübi alla ei saa neid liigitada. Elektrit on võimalik toota ka vähevõimsate taastuenergiaallikate abil, mis ei mõjuta oluliselt ei lõpptarbijat ega elektrisüsteemi. Nad ei ole võrguga pidevas ühenduses ja neid ei saa elektrisüsteemiga koos reguleerida, sellepärast ei ole põhjust neil pikemalt peatuda.

1.3. Uuenduste tulemuse prognoosimine makroökonomika meetodite abiga

Makromajanduses on võimalik konkreetse riigi majanduse struktuuri ja olemasoleva investeringute struktuuri kaudu innovatsiooni võimalusi prognoosida, kaasnevaid riske ennustada ja soovitada arengustsenaariume või algoritme. Sarnast meetodit pakutakse kasutamiseks ka hoone elektrisüsteemi uuenduste kavandamisel.

Nimetatud meetodi täpset kirjeldust sisaldab artikkel „Makroökonomika meetodite kohandamine hoone elektrisüsteemi uuenduste prognoosimisel. Prognoosimiseprotsessi kirjeldus. Konkreetse elektripaigaldise uuenduse analüüs“ TEUK-XV konverentsi kogumikus.

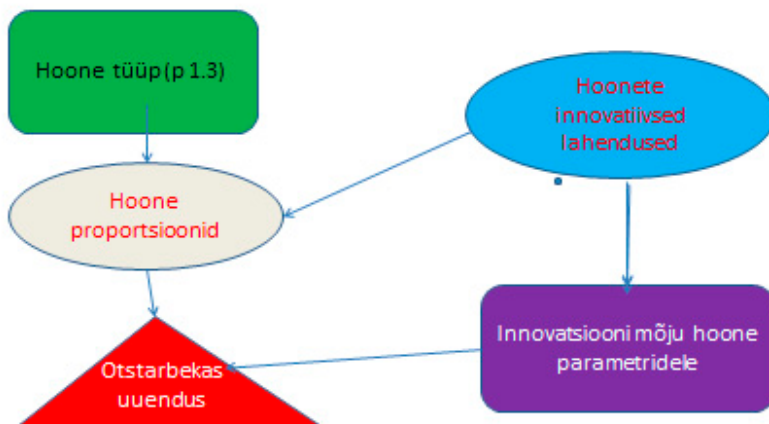
Pakutavate meetodite nurgakivi: hoone ES-i uuenduse mõju on otseselt seotud tehniliste ja majanduslike proportsioonidega. Võimalik on leida objekti eripärad, mis sobivad uuenduste kasutamiseks (*draiverid*) ja prognoosida nende uuenduste liigid, mida on otstarbekas või ebaotstarbekas konkreetses hoones kasutada. Kuna sarnast tüüpi hoonete proportsioonid on sarnased, on võimalik seostata hoone tüüp ja sellele sobivad uuendused.

Terminit „hoone tüüp“ kasutatakse artiklis samas tähenduses nagu elektristandardites ja eeskirjades:

1. Liiklusalad ja hoonesisesed üldpiirkonnad.
2. Tööstus ja tööndustegevus.
3. Bürood.
4. Müügiruumid.
5. Avalikud asutused.
6. Haridusasutused.
7. Tervishoiuasutused.
8. Lennujaamad, raudteejaamad jms.

Autori eesmärk on otstarbeka innovatsioonistsenaariumi valimisel keeruliste arvutuste vältimine. Uuringute objekt on hoone elektrisüsteem, kuid autor näeb võimalusi, et väikese adapteerimise abiga saab seda meetodit kasutada ka teiste elektrisüsteemide ja muude tehnosüsteemide jaoks.

Pakutavat prognoosimise meetodit kirjeldab joonis 2.



Joonis 2. Uuenduste tulemuste prognoosimise põhimõtte kirjeldus
Figure 2. Building renovations results predict process description

2. Päikesepaneelide kasutamise analüüs

Artiklis on esitatud kirjeldused ja uuringud kahe objekti päikeseenergiasüsteemi kohta, mis mõlemad on ehitatud 2014. aasta kevadel. Artikkel sisaldab tulemusi ajavahemikust aprillist augustini. Esialgsed tasuvusarvutused ja PS-i tehnilised andmed esitas paigaldaja, Energogen OÜ. Jooksvad andmed saadi portaalist www.sunnyportal.com.

2.1 Nurmevälja logistikakeskuse päikeseenergiasüsteem

Süsteemi üldkirjeldus. Esialgselt planeeritud tehnilised parameetrid

Nimetatud hoone asub Iru SEJ läheduses, aadressil Välja tee 1, Jõelähtme vald. Lisaks tavalisele elektrisüsteemile hoone fassaadil on sinna paigaldatud elektrienergia tootmise süsteem päikesepaneelide kasutamiseks.



Tegemist on märkimisväärse suurusega süsteemiga, mille fassaadil olevad 368 patareid loovad võimsa mulje (joonis 3).

Joonis 3. Nurmevälja logistikakeskuse fassaad
Figure 3. Facade of Nurmevälja Logistics Centre

Paneelide asukoht on projekteeritud vastavalt hoone ehitusprojektile, hoone lõunapoolsele küljele 70° nurga all (horisondi suhtes) suunaga 10° lõunast ida poole.

Toote reaalne väljundvõimsus on algspetsifikatsioonis märgitud võimsusest mitte vähem kui 97% esimesel aastal. 24-aastase perioodi vältel ei tohi igal järgneval aastal

reaalne väljundvõimsus langeda rohkem kui 0,6%. Seega, peale 25-aastast töötamist on väljundvõimsus vähemalt 83% toote algspetsifikatsioonist.

Päikesepaneelide tootmisvõimsus on 92 kW, inverterite summaarne tootmisvõimsus $4 \times 20 \text{ kW} = 80 \text{ kW}$ (tootmisseedme võimsus). Süsteemi voolutugevus maksimaalsel tootmisel on 116 A. Võimsustegur ($\cos \phi$) on 1,0. Päikesepaneelide ühendamiseks elektrivõrguga kasutatakse nelja 20 kW võimsusega võrguinverterit SMA STP 20000 TL EE, mis on paigaldatud hoone katusekonstruktsiooni külge vastavalt ehitusprojektile. Jaotuskilpi lisatakse võrguinverterite tarbeks mootorajamiga lüliti ning $3 \times 32 \text{ A}$ moodulkaitselülitid.

Inverter seadistatakse vastavalt Eesti vabariigis kehtivale võrgueeskirjale:

- Paneeli lubatud võimsuse tolerants (*power tolerance*) $-0 / +5 \%$.
- Klaas paksusega vähemalt 3,2 mm, karastatud.
- Rõhutamatus: 5400 Pa vastavalt ICE 61215.
- Mõõdaviik(*bypass*)dioode ühel paneelil vähemalt kolm.
- Tootja garantii, minimaalselt 12 aastat, hõlmab:
 - Mehaanilisi muutusi ulatuses, mis seavad paneeli edasise mehaanilise stabiilsuse kahtluse alla.
 - Klaasi pleekimine või värvimuutus.
 - Kaablite ja ühenduspesade purunemine.
 - Raami profiili lõhkikülmumine sinna kogunenud vee tõttu
- Tootja garantii 25 aastaks hõlmab:
 - Toote reaalne väljundvõimsus on märgitud võimsusest mitte vähem kui 97% esimesel aastal. Igal järgneval aastal ei tohi reaalne väljundvõimsus langeda rohkem kui 0,6% 24-aastase perioodi vältel. Seega peale 25-aastast töötamist on väljundvõimsus vähemalt 83% toote algspetsifikatsioonist.

2.2. Projekti realiseerimise finantstingimused. Planeeritud tasuvus

Alltoodud tasuvuse analüüs on arvatud alljärgnevatest eeltingimustest lähtudes:

- elektrienergia ostuhind perioodil 2014–2020 muutub vahemikus 0,05–0,12 €/kWh
- taastuvenergia tasu tõuseb 0,01116 kuni 0,03216 €/kWh
- elektrienergia aktsiis võrdub 0,00447 €/kWh
- võrgutasu tõuseb 0,056 kuni 0,070 €/kWh
- päikeseenergia süsteemi tootlikkus aastas on 78 500 kWh

Tabel 2. Nurmevälja logistikakeskuse päikeseenergiasüsteemi tasuvuse arvutus
 Tabel 2. Nurmevälja logistik centre solar system calculation of profitability

Tasuvusanalüüs		Eesti Energia Kindel pakett						
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Elektri ostuhind tavatarbijale euro/kwh	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12
Võrgutasu tavatarbijale euro/kwh	0,056	0,058	0,060	0,062	0,064	0,066	0,068	0,070
Taastuenergia (TE) tasu tavatarbijale	0,01116	0,014	0,02 €	0,02016	0,02316	0,02616	0,02916	0,03216
Aktsiis	0,00447	0,00447	0,00447	0,00447	0,00447	0,00447	0,00447	0,00447
Käibemaks	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%
Elektri ostuhind kokku	0,12093	0,163116	0,181116	0,199116	0,217116	0,235116	0,253116	0,271116
Toodetud energia müügihind	0,05 €	0,0708	0,0858	0,1008	0,1158	0,1308	0,1458	0,1608
TE toetus (Ele-ringilt = 9,3 senti, eelmise kuu keskmine börsihind)	0,05 €							
Taastuenergia tootmise eest saadav tulu	0,10 €							
Sisestatavad andmed								
Süsteemi tootlikkus aastas, kWh	78 500							
Süsteemi hind, eurodes	104 213							
Süsteemi hind koos käibemaksuga, eurodes	125 056							
Eeldatav hinnatõus aastas, eurodes	0,01 €							
Toodetud elektri tarbimise % oma tarbeks	100%							
Tarbitud taastuenergiast tulev kokkuvõtte, eurot aastas	9493	12 805	14 218	15 631	17 044	18 457	19 870	21 283
Akumuleeruv tulu	9493	22 298	36 515	52 146	69 189	87646	107 516	128 798

Ülaltoodud arvutuse on esitanud töövõtja, Energogen OÜ.

PS-i tootlikkus. Maksimaalse võimsuse saavutamine

Vastavalt seadmete parameetritele, mida kirjeldati punktis 2.1, on objekti nominaalvõimsus 80 kW. Infosüsteem fikseeris 2. mail 2014. a võimsuse 78,5 kW, mis on 98,13% maksimaalsest. Maksimumi lähedal oli võimsus ka 25. aprill 2014. a – 78,1 kW (97,63%).

Tootlikkuse andmeid sisaldab tabel 3, mis näitab, et maksimaalne tootlikkus saavutati juulis. Objekti tootlikkus ajavahemikus 15. aprillist kuni 31. augustini 2014. a on 43 628 kWh. Autori arvates on 2014. aasta võimalik summaarne tootlikkus 65 000–70 000 kWh, mis on 90–93% võrreldes planeeritud aastatootlikkusega (vt tabel 2).

Tabel 3. Nurmevälja logistikakeskuse PS-i tootlikkus ja maksimaalne võimsus

Tabel 3. Nurmevälja logistik centre productivity of the solar system, and the maximum power

Kuu	Tootlikkus	Maksimaalne võimsus	Päev	Aeg	Märkused
	kWh	kW			
1	2	3	4	5	6
aprill	7908	78,1	25. aprill	kl 12.00	Töös alates 15.04
mai	8366	78,5	2. mai	kl 12.00	
juuni	7301	70	28. juuni	kl 13.00	
juuli	10 732	64	26. juuli	kl 13.00	
august	9321	69	17. august	kl 14.00	
	43 628				

Autori esmased hinnangud ehitatud päikeseenergiastüsteemile:

1. Maksimaalne võimsus on edukalt saavutatud. Süsteemi kaldenurk on õige. Hoone orientatsioon on soodne päikeseenergiastüsteemi kasutamiseks (eraldi hoone, puuduvad lähedalasuvad hooned). Projekti ja paigaldustööde kvaliteet on kõrgel tasemel.
2. Paigaldatud süsteemi tootlikkus oli piisaval tasemel soodsatel kuudel, kuid prognoositav summaarne tootlikkus 2014. a on madalam võrreldes kasutatud tasuvusarvutustega. See tähendab, et aastatel, mil päikekiirgus langeb, võib esineda probleeme tasuvusgraafiku täitmisega.
3. Esitatud tasuvuse tabelis on tariifide tõusu prognoos maailmamajanduse positiivsetest arengutest lähtudes. On võimalik ka negatiivne stsenaarium, mis kaasneb minimaalse energiatarbimise, tariifide minimaalse tõusu ja tasuvusperioodi pikenedamisega.

4. PS töötab kevadel ja suvel väga suure võimsusega, mis on ka õige kaldenurga kasutamise järel. Projekti ja paigaldustööde kvaliteet on kõrgel tasemel.

2.3 Pärnus asuva Agal Kinnisvarad OÜ kauba-tootmishoone päikesenergia süsteem

Tootmis- ja laohoones, mis asub aadressil Pärnu, Riia mnt. 233a, on paigaldatud päikesepaneelide kasutamiseks energia tootmise süsteem, mis on hetkel Eestis kõige suurema võimsusega.

Süsteemi koguvõimsus: 176,25 kW (705 paneeli)

Kasutatavad paneelid: ZIP6-60-250 P

Katuseraamistik: Renusol MetaSole

Lähtudes inverteerite võimsusest, on selle PS-i nominaalvõimsus $7 \times 20 \text{ kW} = 140 \text{ kW}$. Süsteemi üldmaksumus koos käibemaksuga on 190 000 eurot ja projekti realiseerimise planeeritud tasuvus on 8,5–9 aastat.

Tabel 4. Agal Kinnisvarade hoone päikesenergia süsteemi tootlikkus ja maksimaalne võimsus
 Tabel 4. Agal Real Estate productivity of the solar system, and the maximum power

Kuu	Tootlikkus kWh	Maksimaalne võimsus (kW)	Päev	Aeg
1	2	4	6	7
aprill	16602	119	23. apr	14.00
mai	21380	115	15. mai	12.00
juuni	20863	119	7. juuni	14.00
juuli	26671	123	11. juuli	13.00
august	19906	100	1. aug	14.00
september	14380	96,3	5. sept	13.00
	119804			

Esmane PS-i tehniliste ja majanduslike parameetrite täitmise analüüs:

1. Maksimaalse võimsuse saavutamine: 23. juulil kl 13.00 oli võimsus 123 kW (88% nominaalist). Vaadeldud perioodil (aprill – august) oli tootlikkus 105 424 kWh. Pärnu regiooni tootlikkus <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/> alusel on parem võrreldes Tallinna regiooniga. Ka katusekonstruktsioon ja väike kaldenurk (10–15°) on suure tootlikkuse põhjuseks.
2. Prognoositav 2014. a summaarne tootlikkus on 125 000–130 000 kWh, mis on 93–97% võrreldes plaanitud tootlikkusega ning oluliselt parem meie esimese uuringuobjekti tulemusest.

3. Tasuvusplaani täitmise perspektiiv on Pärnu objektil samuti parem.

Kahe objekti tulemuste võrdlemine

Esitatud kahe objekti esmane analüüs näitab, et Nurmevälja objektil on väga head võimsuse saavutamise tulemused, kuid tootlikkus on Pärnu objektil oluliselt parem. Seda oli võimalik oletada, sest lõuna-ida suund minimaalse nurgaga (10 kraadi) toob kaasa päikesekiirguse maksimaalse kasutamise. Nurmeväljal on soodsad tingimused paneelide jahutamiseks, samal ajal asub Pärnu regioon paremates tingimustes summaarse päikesekiirguse osas.

Paneelide paigalduse viis katusel väikese kaldenurgaga tagab võrdse kiirguse päeva esimesel ja teisel poolel. Nurmeväljas ja Pärnus on tootlikkus sarnane kl 7.00–14.00. Nurmeväljal langeb tootlikkus kuni 10% juba kell 17.00, kuid Pärnus on sarnane tootlikkus kl 20.00–21.00.

Kokkuvõte

Hoone elektrisüsteemi uuringuid on otstarbekas teha mudeli abil. Enne konkreetse elektrisüsteemi uuringu algust peab täpsustama uuenduse eesmärged ja määrama sobivuse kriteeriumid. Igale uuendusele peab olema määratud tüüp vastavalt selle mõjule elektrisüsteemile.

Uuenduste tulemusi on võimalik prognoosida. Selleks tuleb arvutada tehnilised (võimsus, elektritarbimine, arvutuslik võimsus) ja majanduslikud (ehitusmaksumus, hoolduskulud) proportsioonid, eelnevalt analüüsida konkreetse hoone ES-i proportsioone ning leida uuendustele sobivad eripärad (*draiverid*). Kirjeldatud meetod võimaldab vältida keerulise dokumentatsiooni koostamist ning loobuda ebaotstarbekatest uuendustest enne projektdokumentatsiooni koostamist.

Nurmevälja logistikakeskuse ja Agal Kinnisvarade hoone päikesenergia-süsteemi analüüs näitab, et tootlikkuse saavutamiseks sobivad hea päikesekiirgusega regioonid ning väikese kaldenurgaga suured katused. Eduka maksimaalse võimsuse saavutamiseks sobivad suured kaldenurgad ja avatud hoone küljed orientatsiooniga lõunast ida poole.

Kasutatud kirjandus

- Saikovski, V., 2011. Innovatiivsed lahendused hoone elektrisüsteemis: struktuuri modelleerimine, lahenduse realiseerimise majanduslikud ja tehnilised aspektid. Lõpliku variandi valiku algoritm. – Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine, XIII. Tartu, 143–156.
- Saikovski, V., Teemets, R., 2012. Hoone elektrisüsteemi innovatsioonid ja aruka võrgu arendus. – Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine, XIV. Tartu, 88–97.
- Saikovski, V., Teemets, R., 2013. Makroökonomika meetodite kohandamine hoone elektrisüsteemi uuenduste prognoosimisel. Prognoosimisprotsessi kirjeldus. Konkreetse elektripaigaldise uuenduse analüüs. – Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine, XV. Tartu 77–87.
- Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) – interaktiivne süsteem päikeseenergia ressurssidest ja fotomeetristest võimalustest Euroopa riikides. – Kättesaadav: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>
- OÜ Energogen poolt esitatud andmed paigaldatud päikesesüsteemide kohta

BUILDING ELECTRICAL SYSTEM RENOVATION: MODEL, CLASSIFICATION AND RESULTS PREDICTION. OPERATING SOLAR SYSTEM RESULT ANALYSIS: NURMEVÄLJA LOGISTICS CENTRE (80KW) AND AGAL REAL ESTATE STORE-MANUFACTURING BUILDING (140 KW)

Valeri Saikovski

Survey for building electrical systems (ES) is carried out with the help of a model. Before the start of the study it is necessary to determine purpose and criteria according to the power of the update. Any innovation must be determined according to the impact on the electrical system. Update results are impossible to predict.

Calculating the technical and economic proportions, analyzing, and determining ES drivers must be done in accordance with specific building.

The described method will contribute to the complex documentation compilation and avoid irrational updates to abandon the previous stage.

The Nurmevälja logistics centre and Agal Real Estate building solar systems analysis shows that the solar radiation productivity achieved good results. Also, such system is suitable for achieving high productivity on low angle roofs. Best achievement of maximum power is made on large angle of incidence and with open spaces oriented towards the south east.

BIOMETAANI TEEKAART 2030 JA BIOMETAANI TOETAMISE SEADUSANDLIKUD VÕIMALUSED EESTIS – KUIDAS PUNNSEISUST VÄLJA TULLA?

Ahto Oja

Mõnus Minek OÜ

Annotatsioon

Biometaani kasutuselevõtupotentsiaal maksimaalselt sekkuva teekaardi puhul on 380 mln Nm³ aastal 2050. Biometaani majanduslikud mõjud ühiskonnale koos teiste valdkondadega on üle 500 mln eurot aastas. Põllumajanduslike biogaasijaamade projektide biometaani tootmise tasuvusarvutused näitavad, et ilma investeeringutoetusega on biometaani omahind vahemikus 0,6–0,9 €/Nm³, keskmiselt 0,75 €/Nm³. Sõltumata tarbijast on soovitatav saavutada olukord, kus biometaan ja maagaas ei konkureeri omavahel, vaid vedelate transpordikütustega, jäädes viimastest 20–30% soodsamaks. Biometaani tootmise tasuvust takistavat hinnaerinevust surumaagaasiga on võimalik lahendada mitmeti, nagu näiteks fikseeritud kokkuostuhind, müügihinnatoetus, aktsiisimaksud, segamiskohustus, (ühistranspordi, liiniveo jmt) hanketingimustes biometaani tarbimise kohustamine, investeeringutoetused, kuid ilma riikliku konkreetse tegevuskavata, milles lahendusviis on seadusandlikult fikseeritud, ei ole biometaani tootmise alustamine Eestis tõenäoline. Ilma seadusandlikult fikseeritud lahenduseta on proportsionaalselt liialt suured riskid jäetud biometaanitootjate kanda. Käesolevas artiklis kirjeldatakse kolme võimalikku seadusandlikku meetet biometaani ja maagaasi hinnaerinevuse ühtlustamiseks. Nendeks on (1) transpordis kasutatava surumaagaasi aktsiisi järkjärguline tõstmine, mis ühtlustab maagaasi ja biometaani hinna lõpptarbijale tanklas, kuna biometaani tootjat toetatakse surumaagaasi aktsiisist laekuvate summadega. Teiseks (2) sätestada biometaani ja surumaagaasi segamiskohustus ning kolmandaks (3) sätestada seadusandlikult ühistranspordi ja muude avaliku sektori hangetes metaankütuste sõidukite hankimise ja biometaani tarbimise kohustus.

Sissejuhatus

Eesti Energiamaajanduse Arengukava aastani 2030, visiooniga aastani 2050 (edaspidi ENMAK 2030) ettevalmistamise raames koostati biometaani kasutuselevõtu edendamiseks kolm stsenaariumi: mittesekkuv, vähesekkuv ja maksimaalselt sekkuv ehk teadmispõhine.

Biometaani tootmine on hetkel ainuke väljakujunenud tehnoloogiaga kohaliku taastuva biokütuse tootmise võimalus Eestis. Biometaani omaduste sarnasusest maagaasi oma-

dustega johtub ka selle tootmise takistus. Samadel tingimustel on maagaasi ja biometaanikiütteväärtused võrdsed või on maagaasil see natuke suurem. Arvutustes on keskmistatud maagaasi ja biometaanikiütteväärtused võetud võrdseks normaaltingimustel 10 kWh/Nm^3 (36 MJ/Nm^3) ning metaangaasi tihedusena kasutatud on väärtust $0,714 \text{ kg/Nm}^3$ ($1 \text{ kg} = 1,4 \text{ Nm}^3$). **Biometaanikiütmiseks on vaja teha investeeringuid, mistõttu tema omahind kujuneb suuremaks kui surumaagaasi hind maagaasitanklas.** Viimaseid on Eestis viis ja teedel sõidab ligi 300 metaankütust kasutavat sõidukit. **Seega biometaanikiütmist tuleb toetada, kui ühiskonna soov on asendada osa imporditava test fossiilsetest kütustest kohaliku taastuva kütusega – biometaaniga.** Sügisel 2014 võib Eestis täheldada biogaasi „punnseisu“ ehk kahesugust vastandlikku ootust. Ühest küljest ootab vabariigi valitsus esimeste biometaanitootmise pilootjaamade valmimist, kuna neile on antud 50% investeeringutoetust, eeldades, et sellest piisab biometaanikiütuse ja maagaasi hinnaerinevuse lahendamiseks. Biometaanikiütusest huvitatud ettevõtjad väidavad, et ainult investeerimistoetusest ei piisa ja neil on Eesti poliitikakujundajatele ootus, et biometaanikiütuse ja maagaasi hinnaerinevus lahendatakse seadusandlikult, kuna samaväärset toodet (biometaanikiütust) ei ole turumajanduses ilma regulatsioonita mitte kuidagi võimalik surumaagaasist kallimalt müüa. Ilma seadusandlikult fikseeritud lahendusest on proportsionaalselt liialt suured riskid tootjate kanda. Käesolevas artiklis pakutakse kolme seadusandlikku lahenduseettepanekut, mida tuleks vaadata komplekselt. Toodud kolmest ettepanekust maagaasiaktsiisi järk-järgulise tõstmise ja ühistranspordi hangetesse metaankütustel töötavate sõidukite hankimise tingimuste lisamise suunalisi vihjeid on poliitikakujundajad suuliselt ja konsultatsioonipaberite näol edastanud, kuid seadusandlike aktide ja meetmete väljatöötamise ajakava ja sisu eest vastutav Majandus- ja kommunikatsiooniministeerium ei ole senini avaldanud, millal on kavas need aktid vastu võtta. Ilma neid vastu võtmata investorid suure tõenäosusega biometaanijaamade, sh juba alustatud pilootide rajamisele rohelist tuld ei anna.

Eesmärk ja meetodika

Käesoleva artikli eesmärk on kirjeldada ENMAK 2030 ettevalmistamise raames koostatud Eesti biometaanikiütuse ja bioetanooli teekaarte aastaks 2030 ning nende majanduslikku mõju ühiskonnale. Samuti on eesmärk tutvustada kolme võimalikku lahendust biometaanikiütuse ja maagaasi hinnaerinevuse tasandamiseks. Artikkel põhineb vastavatel Arengufondi kohalike kütuste stsenaariumitel (Oja 2014), nende majandusmõju hinnangul (Grünvald ja Lökk 2014) ning Eesti Biogaasi Assotsiatsiooni ettepanekutel Majandus- ja kommunikatsiooniministeeriumile. Stsenaariumi eestikeelse vastena kasutame paralleelselt nimetust „teekaart“.

Tulemused

Biogaasi saab biomassi anaeroobse käärimise teel vähemalt 37 °C juures. Biogaasis on keskmiselt 60% metaani (CH₄). Biometaan on puhastatud biogaas, kus metaanisaldus on 90–99%. Biometaan ja maagaas on sarnase koostise ja kütteväärtusega: 10 kWh/Nm³, 37 MJ/Nm³. Reaalselt kasutatav biogaasi hulk 2050. aastal on 633 mln Nm³/a, sellele vastav biometaanipotentsiaalne kogus on 380 miljonit Nm³/a, millest 9 miljonit Nm³ moodustab prügilagaas (Oja ja Siitam 2013).

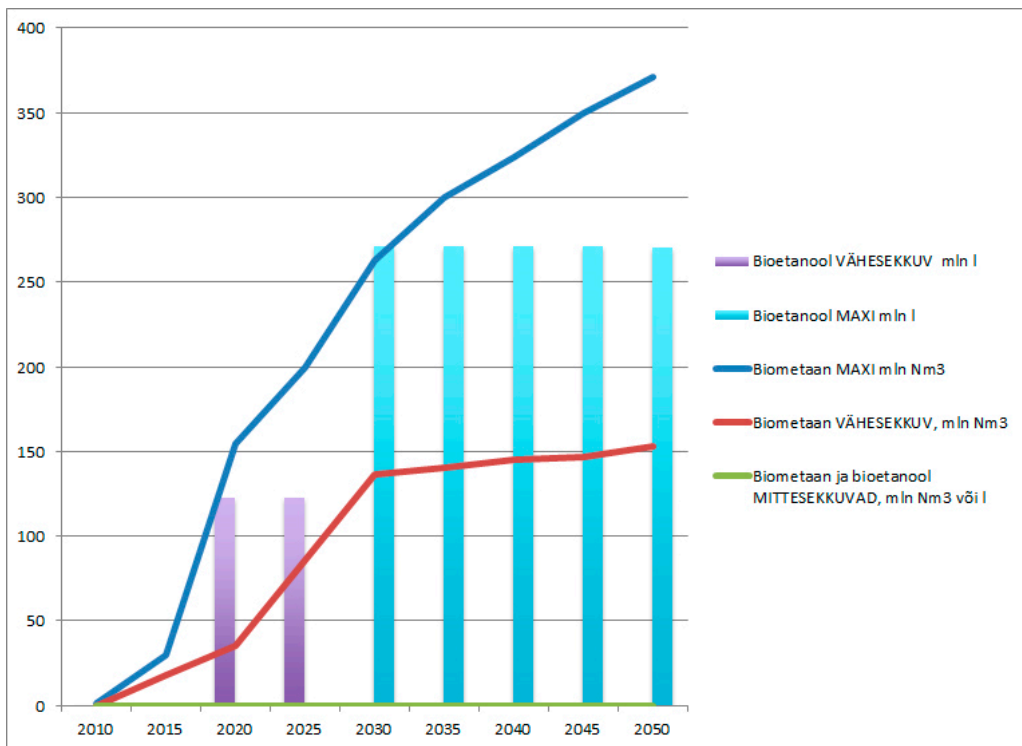
Biometaanite teekaardid 2030

Mittesekkuva stsenaariumi puhul võeti eelduseks, et arengukava raames ei tehta midagi, 10% taastuvkütuste osakaalu saavutamiseks bioetanooli ainult imporditakse, mistõttu jääb aastaks 2030 ka 10% taastuvkütuste osakaalu eesmärk transpordis saavutamata. **Väheseckuva stsenaariumi** puhul kasutatakse ligi kolmandik biometaanipotentsiaalset (137 mln Nm³) aastal 2030 ja piirduakse ühe bioetanoolitehasega (100 000 t/a), millega saavutatakse taastuvkütuste osakaal transpordis **7,4% aastal 2020 ja 12,6% aastal 2030. Maksimaalse ehk teadmistepõhise** stsenaariumi puhul jõutakse biometaanipotentsiaali (380 Nm³ koos prügilagaasiga) kasutamiseni aastal 2050. 70% biometaanipotentsiaalset ehk **263 mln Nm³ toodetakse aastal 2030**, millest kodumaine tarbimine moodustab 62% (**163 mln Nm³, 5848 TJ**, 140 ktoe) ja ülejäänud eksporditakse (või asendab see torumaagaasi). Maksistsenaariumis moodustavad kohalikud taastuvkütused (biometaan ja bioetanool kokku) 26% transpordikütuste tarbimisest 2030. a (tabel 1 ja joonis 1).

Tabel 1. Bioetanooli ja biometaanipotentsiaali kui biokütuste kasutamise osakaal transpordis aastani 2030
Table 1. Biomethane and bioethanol scenarios of share of renewable fuels in transport until 2030

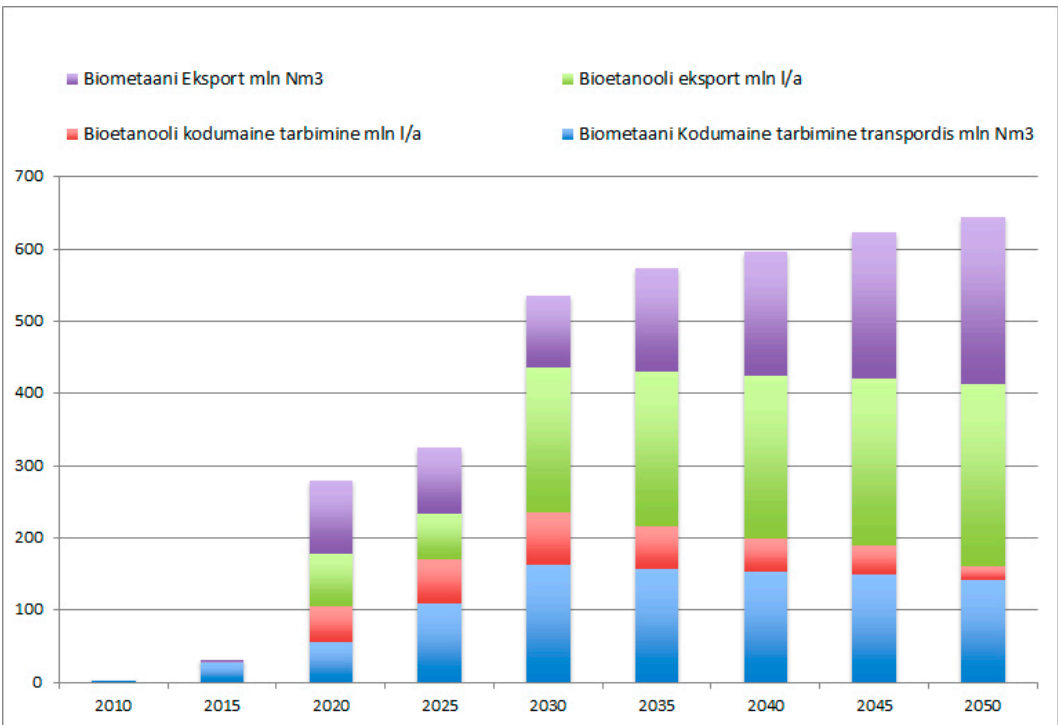
Stsenaariumid	Biokütuste potentsiaali kasutamise eeldused	Biokütuste osakaal transpordis 2030
Mittesekkuv	Biometaanipotentsiaali ja bioetanooli Eestis ei toodeta, biometaanipotentsiaali ei impordita, bioetanooli ja biodiisli imporditakse, kuid eesmärk 10% transpordikütuste taastuvatest allikatest jääb täitumata, imporditud bioetanooli osakaal on 2,48%, import-biodiisli osakaal on 6,42%.	9%
Väheseckuv	Rajatakse üks bioetanoolitehas, võimsusega 100 000 t/a. Bioetanooli osakaal transpordikütustes on 2,64%. Kogu toodetud biometaanipotentsiaali tarbitakse Eestis 137 mln Nm ³ . Biometaanipotentsiaali ei ekspordita. Biometaanipotentsiaali osakaal on 12,56%. Import-biodiisli osakaal on 0,31%.	15%

Maksisekkuv ehk teadmiste- põhine	Rajatakse kaks bioetanoolitehast, koguvõimsusega 220 000 t/a. Bioetanooli tarbimine Eesti transpordikütustes on 5,48%. Bioetanooli eksporditakse 200 mln l/a. Biometaani tarbitakse 163 mln Nm ³ , see moodustab 20,5% kodumaisest tarbimisest. Biometaani eksporditakse 101 mln Nm ³ . Import-biodiisli osakaal on aastal 2030 0%.	26%
--	---	-----



Joonis 1. Biometaani ja bioetanooli tootmise potentsiaalid erinevate teekaartide puhul Eestis
Figure 1. Production potential of biomethane and bioethanol by different production scenarious

Näeme, et mittesekkuva ja vähesekkuva teekaardi valimisel 10% taastuvkütuste kasutamise osakaalu eesmärki transpordis ei saavutata. Küll aga ületatakse see eesmärk aastal 2030. Maksimaalse sekkumise teekaardi puhul on bioetanooli ja biometaani osakaal Eesti transpordikütustes 26%. Kodumaise ja eksporditud bioetanooli ja biometaani suhe teekaartides tuleneb vastavatest transpordi teekaartidest, kuna need on omavahel sünkroniseeritud (joonis 2).



Joonis 2. Bioetanooli ja biometaanu kasutamise jagunemise dünaamika kodumaise tarbimise ja ekspordi vahel

Figure 2. Dynamic division of biomethane and bioethanol between domestic consumption and export

Varasemates biometaanu tootmise ja tarbimise arvutustes on vaadeldud biogaasisektorit eraldi ja saadud ühiskonnale positiivseks mõjuks 271 mln Nm³/a (Oja ja Siitam 2013). ENMAK 2030 majandusmõjude hindamise raames arvutasid Grünvald ja Lokk (2014) input-output mudelit kasutades biometaanu mõjud kõikidesse majandusvaldkondadesse. Tabelis 2 on toodud biometaanu positiivsed mõjud SKP-sse. MAKSI-teeaardi puhul suureneb biometaanu potentsiaali kasutuselevõtmisel 2030. a SKP 472 mln euro võrra, tööhõives lisandub 6185 töökohta, valitsussektori neto-tulud on 69 mln eurot. Need näitajad on oluliselt suurema mõjuga kui varasemad biometaanu kasutuselevõtu positiivse mõju hinnangud ühiskonnale ja seetõttu ei tuleks käsitleda biometaanu tootmise ja kasutamise toetamist kui kulu ühiskonnale, vaid kui investeeringut tulevikus tulude suurendamiseks. Lisanduvad mitmed positiivsed rahatud keskkonnamõjud.

Tabel 2. Biometaani teadmistepõhise teekaardi majanduslikud mõjud ühiskonnale input-output mudelit kasutades (Grünvald ja Lökk 2014)

Table 2. Positive impact of biomethane production using input-output model (Grünvald and Lökk 2014)

Näitaja	Ühik	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	
SISEMAJANDUSE KOGUPRODUKT (SKP)										
SKP_Baasprognoos	MEUR	18,362	21,842	25,237	28,643	31,738	34,530	36,897	38,693	29,493
SKP muutus_ENMAK mõjul	MEUR	71	280	281	472	479	513	554	589	405
kasv	%	0.39%	1.28%	1.11%	1.65%	1.51%	1.49%	1.50%	1.52%	1.31%
SKP inimene (PPP**)_Baasprognoos	EUR/in.	18,585	21,301	24,027	26,907	29,698	32,279	34,368	36,054	27,902
SKP inimene_ENMAK mõjul	EUR/in.	72	274	267	443	449	480	516	549	381
kasv ENMAK mõjul	%	0.39%	1.28%	1.11%	1.65%	1.51%	1.49%	1.50%	1.52%	
VALITSUSSEKTOR JA VÄLISKAUBANDUS										
Valitsussektori neto-tulud	MEUR	8	33	66	69	129	137	147	156	93
Väliskaubanduse saldo	MEUR	-94	-81	6	-63	125	173	208	263	67
Väliskaubanduse saldo/SKP	%	-0.5%	-0.4%	0.0%	-0.2%	0.4%	0.5%	0.6%	0.7%	0.13%
TÖÖTURG										
Tööhõive_Baasprognoos	Inimest	635,000	629,933	620,541	607,653	593,262	575,952	552,230	523,165	
Hõive muutus_ENMAK mõjul	Inimest	2,037	5,286	4,404	6,185	5,049	4,808	4,724	4,528	
muutus	%	0.32%	0.84%	0.71%	1.02%	0.85%	0.83%	0.86%	0.87%	0.79%
Töövõljalikus_Baasprognoos	EUR/hõivatu	28,916	34,674	40,669	47,137	53,498	59,952	66,814	73,960	50,703
Töövõljalikus_ENMAK mõjul	EUR/hõivatu	28,936	34,827	40,832	47,431	53,848	60,340	67,243	74,442	50,987
ENMAK/Baasprognoos		100.1%	100.4%	100.4%	100.6%	100.7%	100.6%	100.6%	100.7%	100.6%

Ettepanekud biometaani ja surumaagaasi hinnaerinevuse ühtlustamiseks ehk kuidas „punnseisust“ välja tulla

Kuigi ühiskond saab otseselt ja kaudselt biometaani tootmise toetamisest lisatulu ligi pool miljardit eurot aastas, täna biometaani Eestis ei toodeta ja toetata. Esimesed reaalsed piloottehaste tasuvusarvutused näitavad, et ainult investeringutoetusest ei piisa, mis mõjutab biometaani hinda ca 10%. Põhjus on biometaanile samaväärse kütuse, maagaasi oluliselt (ca 38%) madalam hind turul – surumaagaasi hind tanklas on 0,779 €/kg (ilma käibemaksuta, taandatuna kuupmeetrite tiheduse juures 1,4 kg/m³, on hind 0,46 €/Nm³). Samal ajal on biometaani tootmise investeerimist ärgitavates äriplaanide rahuldav müügihind keskmiselt 0,75 €/Nm³. Tinglikult on võetud see hind ka maagaasi aktiivsitusse ettepaneku aluseks. Kuidas tegelikkuses lahendada biometaani müügihinna kompensatsioonimehhanismid erinevate tootjate erinevate biometaanihindade puhul, tuleb selgitada avaliku ja erasektori avatud ja tulemusele orienteeritud koostöös – ainult see aitab meid „biogaasi punnseisust anno 2014“ välja.

Eesti Biogaasi Assotsiatsioon (EBA) on teinud omapoolsed ettepanekud, kuidas „punnseisust“ välja tulla ehk kuidas tõhusamalt kaasa aidata metaankütuste, sh kodumaise biometaani kasutamisele Eesti transpordis. Sõltumata asjaolust, et bussid tarbivad 100 km läbimiseks 40,2 liitrit vedelkütust või 38,8 kg metaangaasi¹ (maagaasi või biometaani), ei muuda see biometaani tootjate tegevust majanduslikult põhjendatuks, kui biometaani

¹ Allikas Sebe ettekanne 20.04.2012: http://monusminek.ee/documents/kuldarsebeettekanne_aprill_20042012_oja.pdf

tootmise omahind on sõltuvalt sisendist ja tootmiskahtudest keskmiselt 0,75 €/Nm³ (vahemikus 0,6–0,9 €/Nm³). Sõnnikust saadava biometaani (mille omahind võib olla madalam) maksimaalselt kasutatavat potentsiaali on EBA, EAS-i ja Arengufondi uuringutes hinnatud kuni 44 mln/Nm³, millest juba oluline osa kasutatakse täna elektri ja soojuste koostootmiseks (Jööri, Aravete, Ilmatsalu, Vinni ja Oisu biogaasijaamades). Rohelisest biomassist saadava biometaani potentsiaali on hinnatud kuni 220 mln/Nm³. Tulenevalt sõnniku ja läga piiratud kogusest on selge, et enamuse Eesti biometaani hakatakse tootma rohelisest biomassist.

Tabel 3. Samade kütteväärtuste puhul biometaani ja surumaagaasi hind ja hinnaerinevus tanklas püstolis käibemaksuga ning ilma käibe- ja aktsiisimaksuta
Table 3. Comparison of biomethane and compressed natural gas by heating value and price

	Kütteväärtus, MJ/Nm ³	Hind tanklas, km-ga, €/kg	Hind ilma käibemaksuta, €/kg	Soovitatav hind lõpptarbijale €/kg, ilma km-ta, 2020	Vahe tänase seisuga €/kg
Biometaan	36	1,26	1,05	0,85	-0,20
Maagaas	36	0,779	0,649	0,85	0,20
erinevus	0	0,481	0,401	0	0

Tabelis 3 vastab biometaani ilma käibemaksuta hinnale 1,05 €/kg tinglik biometaani keskmine hind 0,75 €/Nm³, mis erineb täna surumaagaasi hinnast 0,4 €/kg kohta (käibemaksuta, edaspidi km-ta). Selleks, et viia ellu põhimõtet, et biometaan ja surumaagaas ei konkureeriks omavahel, vaid oleks tanklas lõpptarbijale sama hinnaga ja vedelatest fossiilkütustest kuni 30% soodsam, on eeldatud, et biometaani ja surumaagaasi hind tanklas võiks olla 0,85 €/kg (km-ta). See hind on seega 20 eurosentit kg kohta vähem kui biometaani hind (1,05 €/kg, 0,75 €/Nm³) ja 20 eurosentit rohkem kui surumaagaasi hind täna (0,649 €/kg, 0,46 €/Nm³). Tekib küsimus, kuidas sellise nn metaankütuse hinna ühtlustamiseni jõuda? Üks võimalus on järk-järgult tõsta surumaagaasiaktsiisi määranani 0,2 €/kg, mis kompenseerib biometaani kõrgema hinna. Selline biometaani kõrgema hinna kompensatsioon oleks ka riigieelarve neutraalne selles mõttes, et biometaani kõrgema hinna kompensatsiooni ei maksta lihtsalt riigieelarvest, vaid selle allikaks on surumaagaasi aktsiis.

Tabelis 3 toodud soovitusliku metaankütuse hinna realiseerumisel lõpptarbijale (tanklas 0,85 €/kg km-ta) saavutatakse ka eesmärk, et metaangaas jääks fossiilsetest kütustest odavamaks. Selle variandi puhul on metaangaas diislikütuse hinnast (1,08 €/l) ilma käibemaksuta 22% madalam. Bensiiniautode puhul on biometaani hind lõpptarbijale 30% soodsam bensiini hinnast.² Pika-ajaliselt ette kokku lepitud maagaasi aktsiisimaksu

2 Bensiini kasutavate sõiduautode puhul on vedelkütuse tarbimine 100 km kohta

järk-järguline tõstmine ja laekuvast maagaasiaktsiisist biometaani kallima müügihinna kompenseerimine on üks võimalus maagaasi ja biometaani hinnaerinevust vähendada. Reguleerimata turusituatsioonis ei ostaks keegi kallimat biometaani, kui on võimalus osta odavamalt maagaasi.

EBA ettepanekud perioodil 2015–2020 maagaasiaktsiisi järk-järguliseks tõstmiseks on toodud tabelis 4. Muutunud on ka olukord maagaasi kättesaadavusega – veeldatud maagaasi (LNG) transportimine termos-tsisternidega võimaldab maagaasi tarnida igasse Eesti geograafilisse punkti, sõltumata maagaasitorustiku olemasolust. Juhul kui majandussituatsioon on aastaks 2020 kujunenud selliseks, et biometaani hind on maagaasi hinnaga konkurentsivõimeline ka ilma toetuseta, siis lõpetatakse toetuse maksmine. Kuni aastani 2020 tuleb lisaks laekuvale maagaasiaktsiisile biometaani hinnaerinevust täiendavalt kompenseerida, kompensatsioonisummade allikaks võiks olla CO₂ kvoodimüügi tulu, mis on samuti riigieelarvенеutraalne.

Tabel 4. MKM (sinisega) ja EBA (punasega) toodud ettepanekud maagaasile järk-järgult aktsiisi kehtestamise kohta aastani 2020, inflatsiooni arvestamata

Table 4. Proposals of Ministry of Economic Affairs and Communication (blue) and Estonian Biogas Association (red) for gradual increase of excise tax for compressed natural gas to compensate price difference with biomethane, without inflation

	MKM ettepanek maagaasi aktsiisiks, €/1000 Nm ³	EBA ettepanek maagaasi aktsiisiks, €/1000 Nm ³	Suru-maagaasi hind tanklas km-ga, €/kg	Surubio-metaani hind tanklas km-ga, €/kg	Suru-bio-metaani hind tanklas km-ta, €/Nm ³	Investee-ringuid tagav biometaani hind, km-ta €/Nm ³	Biome-taani omahinna ja tanklas müügi-hinna erinevus, km-ta, €/Nm ³	Täiendav (kuni 2020) biometaani hinna erinevuse katmise vajadus, €/Nm ³
	1	2	3	4	4 : 1,4 : 1,2 = 5	(2/1000) + 5 + 8 = 6	6 – 5 = 7	7 - (2/1000) = 8
2014	0	0	0,779	0,779	0,464	0,75	0,286	0,286
2015	28,14	28,14	0,826	0,826	0,492	0,75	0,258	0,230
2016	33,77	33,77	0,844	0,844	0,503	0,75	0,247	0,214
2017	40,52	53,98	0,869	0,869	0,518	0,75	0,232	0,178
2018	48,63	74,76	0,904	0,904	0,538	0,75	0,212	0,137
2019	58,35	103,54	0,953	0,953	0,567	0,75	0,183	0,079
2020	75,86	143,41	1,020	1,020	0,607	0,75	0,143	0,000

samaväärne metaangaasi normaalkuupmeetrite tarbimisega sama maa läbimiseks. Diislikütust kasutavate busside ja veoautode puhul aga 100 km läbimiseks vastab 1 liitri diislikütuse kulule 1 kg metaangaasi kulu ehk 1,4 Nm³ metaangaasi.

Tabelist 4 on näha, et biometaanii müügihind koosneb kuni aastani 2020 kolmest komponendist: biometaanii müügihind tanklas (tulp 5), maagaasiaktsiis (tulp 2) ja kuni aastani 2020 täiendav hinnavahe kompensatsioon (tulp 8). Kui surumaagaasiaktsiis jõuab aastal 2020 tasemele 0,2 €/kg (143,41 €/1000 Nm³), siis biometaan ei vaja enam täiendavat toetust **juhul, kui laekuvat maagaasiaktsiisi kasutatakse biometaanii hinnaerinevuse katmiseks**. Sel juhul on biometaanii müügihinna toetus riigielarv neutraalne ja allikaks on ainult maagaasiaktsiis. Kuni aastani 2020 tuleb leida lahendus biometaanii ja maagaasi hinnaerinevuse katmiseks, näiteks CO₂ kvoodimüügi tuludest, ja teadaolevalt on EL struktuurivahenditest planeeritud ca 10 mln eurot biometaanii tootmise ja taristu ning sõidukite investeeringutoetusteks, mis alandab biometaanii müügihinda keskmiselt 10%.

Eeltoodud maagaasiaktsiisi järk-järgulise tõstmise alternatiiviks biometaanii tootmise tasuvaks muutmisel on kehtestada fikseeritud biometaanii ostuhind (*feed-in-tariff*), nagu seda on tehtud UK-s, Saksamaal, Šveitsis jt riikides (näiteks Ühendkuningriigis on see suurusjärgus 0,75 €/Nm³). Samas on mõisteta, et Eestis puudub sellele alternatiivile täna poliitiline toetus, kuigi turu käivitamise tingimustes on see toetusmeede ilmselt kõige efektiivsem ja investorite jaoks tururiske maandav. Võrdluseks võib tuua taastu-velektri ostuhinna toetuse, mis käivitas hoogsalt tuuleenergiasektori.

Täiendav administratiivne võimalus – biometaanitootmist käivitav meede – on sätestada seadusandlikult biometaanii segamise kohustus transpordis tarbitava maagaasiga näiteks 50% ulatuses. Segamiskohustuse täitmine on eelduseks (transpordi)ettevõtetele metaankütustele ülemineku jaoks investeeringutoetuste taotlemisel.

Majandus- ja kommunikatsiooniministeerium ning SA Keskkonnainvesteeringute Keskus on hoogsalt propageerinud biometaanii tarbimist loovat kolmandat administratiivset võimalust, et ühistranspordi liiniveo ja muudesse transpordivahendite hankimisega seotud riigihangete tingimustesse viiakse seadusandlikult sätestatud kohustus kasutada teatud ulatuses metaankütust kasutavaid sõidukeid ja kasutada kütusena biometaanii. EBA igal juhul toetab seda ettepanekut, kuid vajaka jääb ajakavast – mis ajaks on kavas nii see meede kui eeltoodud aktsiisimaksu kehtestamise ja biometaanii segamiskohustust sätestavad meetmed välja töötada. Eriti praeguses majanduslikus ja poliitilises olukorras ei tee potentsiaalsed biometaanijaama investorid otsuseid suuliste lubaduste peale, et midagi on kavas välja töötada. Ilma seadusandlikult fikseeritud lahenduseta on proportsionaalselt liialt suured riskid jäetud biometaanitootjate kanda.

Kokkuvõte

Eeltoodud ettepanekud katavad enamus põhimõtteid, mida soovime biometaan turuletoomisega saavutada:

1. Biometaan ja maagaas ei konkureeri omavahel, vaid on tanklas lõpptarbijale sama hinnaga, jäädes fossiilsetest vedelkütustest 20–30% odavamaks.
2. Saastaja maksab – maksustame fossiilset maagaasi ja toetame kohalikku.
3. Teised fossiilsed kütused on maksustatud kõrgelt, maagaas transpordis on maksustanud 0-ga. Viime maagaasiaktsiisi lähemale teiste fossiilsete kütuste aktsiisile, kuid kuna metaankütused on keskkonnasõbralikumad, siis on ka maagaasiaktsiis ainult ligi kolmandik fossiilsete kütuste aktsiisist.
4. Laekuvat maagaasiaktsiisi kasutatakse biometaanitootmise toetamiseks.
5. Biometaan kasutuselevõtu toetamine on seetõttu riigieelarveneutraalne.
6. Fossiilkütuste laekumata aktsiis on riigi panus taastuvkütuste kasutamise edendamise, kuna ühiskond saab otseselt kasu 271 mln eur/a ja kaudselt ca 500 mln eur/a. Otseselt luuakse 1000 töökohta, kaudselt kuni 5000.
7. Ühiskond saab puhtama keskkonna, puhtama linnaõhu, inimesed parema tervise ja biometaanipotentsiaali kasutuselevõtuga luuakse 1000 otsest töökohta maapiirkondades, asendatakse fossiilsed kütused, suureneb kodumaine energiaga varustatus ja sõltumatus impordist.

Kasutatud kirjandus

- Grünvald, O., Loka, A. 2014. „Energiamajanduse arengukava aastani 2030“ stsenaariumide majandusmõju analüüs. Majandusmõjude hindamise meetodika ja prognoosimudeli tutvustus. Aruanne. – Energiatalgud. Riigikantselei, OÜ Finantsakadeemia, OÜ Väärtusinsener. Kättesaadav: http://www.energiatalgud.ee/index.php?title=ENMAK:Stsenaariumid#Stsenaariumite_majandusm.C3.B5ju
- Oja, A., 2014. ENMAK 2030 kohalike kütuste stsenaariumid. – Energiatalgud.ee. Kättesaadav: http://www.energiatalgud.ee/index.php?title=ENMAK_2030._K%C3%BCtuste_stsenaariumid
- Oja, A., Siitam, P. 2013. Biometaan avalikud hüved aastast 2013 on 271 miljonit eurot. – Eesti Arengufond. www.energiatalgud.ee. Eesti Maaülikool, Konverentsi Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine XV (TEUK XV) kogumik.

BIOMETHANE ROADMAP TO 2030 AND LEGISLATIVE PROPOSALS TO SUPPORT THE PRODUCTION OF BIOMETHANE – HOW TO GET OUT FROM “BIOGAS DEAD-END” SITUATION ANNO 2014?

Ahto Oja

Public benefits from 380 Nm³ biomethane are 271 million € in year, the annual positive impact indirectly using input-output model is 500–600 million € in total. The price difference of biomethane and natural gas hinders the biomethane investments, the legal acts need to be adopted to compensate the higher price of biomethane. Biomethane production cost of agricultural biogas plants shows that without the support of investment in biomethane production is in the range of 0,6–0,9 €/Nm³, an average of 0,75 €/Nm³. Biomethane production is prevented because of price difference with CNG. This article describes three possible legislative proposals to solve biomethane and natural gas price disparities. These are (1) to increase gradually the excise tax of compressed natural gas. Second, (2) to implement the blending obligation of biomethane and CNG (3) to implement the obligation to include legislatively methane vehicles into public transport procurement tenders.

AHJUEHITUSE KAASAJASTAMISE VÕIMALUSED EESTI OLUDES

Annes Andresson¹, Mart Hovi²

¹OÜ Ahjutarve

²EMÜ tehnikainstituut

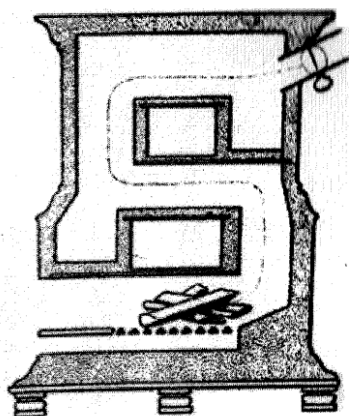
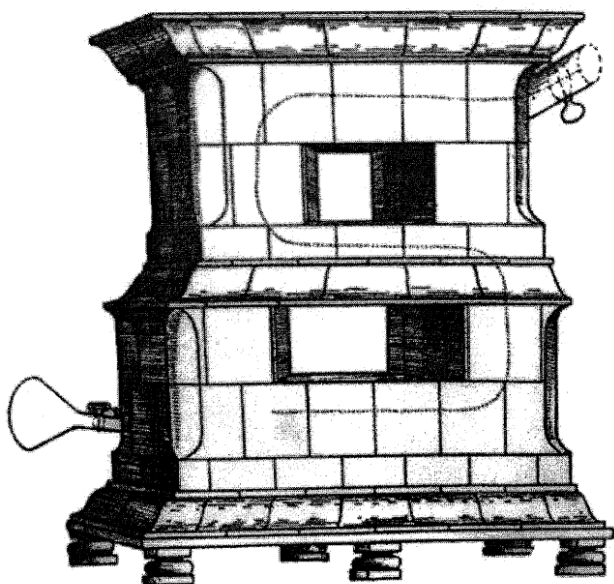
Annotatsioon

Ahjude põhiliseks kütuseks Eesti oludes on küttepuid. Seda loetakse ka üheks odavamaks võimaluseks kodudes soojust saada. Seoses taastuvenergiaallikate valdkonnas toimivate arengutega ei pruugi see nii jääda ja seega peaks aegsasti mõtlema sobiva põletustehnika kaasajastamisele. Kui eelmise sajandi teisel poolel soovitasid mitmed autorid hakata kasutama restkollet, siis tänapäeval näitavad viimased uuringud, et õhu koldesse altjuhtimisega ei saavutata piisavalt puhast põlemist. Lisaks keemiliselt mitetäieliku põlemise soojuskaole loetakse ahikütet peensaaste allikaks. Saksakeelsetes maades, aga ka mujal, on juba sajandeid pööratud tähelepanu ahju tõhusamaks muutmisele. Selles suunas tuleb ka Eesti oludes liikuda.

Märksõnad: ahi, küttepuu, ajalugu, pilukolle, projekteerimine.

Väljakaevamised kinnitavad, et inimesed kasutasid primitiivseid ahjusid juba 2500 aastat e.m.a., kus kütuseks oli suuremalt osalt puit. Euroopas on esinenud perioode, mil metsad on maha raiutud, sest puitu vajati suures koguses kütteks, majade ja laevade ehituseks. Metsade kadumine sundis inimkonda otsima säästlikumaid ahjusid – nii on paljud tuntud inimesed omaalgatuslikult otsinud ökonoomsemaid viise kütmiseks. Ajaloost teame, et Saksa luuletaja Johann Wolfgang Goethe huvitus peale luuletamise ka ahjuehitusest ja ehitas koos vasesepp Christoph Gottlieb Pflugiga balloonahju. Preisi kuningas Fridrich II organiseeris 1764. aastal esimese ahjuehituse konkursi Saksamaal, eesmärgiks saada võimalikult ökonoomne ahi. Võitjaks tuli pottseppmeister Paul Bauer Berliinist, kelle järgi hakati seda tüüpi ahju kutsuma Berliini kahhelahjuks (Berliner Kachelofen), vt joonis 1. Sel ahjul olid kindlas proportsioonis nii kolle kui ka suitsulõõrid. Ahjul olid kolde rest, lõõride süsteem ja siiber suitsugaaside reguleerimiseks. Ahjuehitus on nt huvitanud ka Ameerika president Benjamin Franklinit, kes isiklikust huvist konstrueeris puudega kõetava ahju aastal 1742.

Veel 1800. aasta algul oli probleemiks, kuidas ehitada suitsulõõre nii, et nende kaudu ei läheks ahjust palju soojust korstnasse – kui pikad ja missuguse ristlõikega peaksid lõõrid olema ning kas ehitada lõõrid paralleelselt? Alles siis, kui ahjuehitusega hakkasid tegelema insenerid, tekkisid kahtlused, et üksnes traditsioonilise kogemusele toetudes ei saa projekteerida sobiva kujuga lõõristikke. Kahjuks on Eestis veel tänapäevalgi levinud tänu internetifoorumitele arvamusi, mida ei saa soojusfüüsikast lähtudes tõeseks pi-



Joonis 1. Võitjaks tulnud pottseppmeister Paul Baumeri ahi 1765. aastal
 Figure 1. The winner stove from Paul Baumer in year 1765

dada. Eestis oli kaua aega ainsaks ahjuehituse alaseks kirjanduseks Arvo Veski ja Aksel Vaigu „Pottsepa ja korstnapühkimistööd“, 1964, Tallinn ja selle kordustrükid. Raamat kujutas endast praktilist õpperaamatut ilma erilisel teooriasse süvenemata.

Ahjuehituse alaseid uuringuid arendati Saksa Demokraatlikus Vabariigis (SDV) insener Karl Heinz Pfestorfi eestvõttel, kelle raamatust „Kachelofen und Kamine“ on ilmunud kuus kordustrükki. Raamat oli saksakeelsena kättesaadav ka meil. SDV-s otsiti alternatiivseid kütuseid, sest riik oli vaene kivisöe ja nafta poolest.

Kui kütteõli ja gaasi hinnad tõusid, hakati ka teistes riikides otsima neile alternatiivseid kütuseid. Esimesed tõsiseltvõetavad teaduslikud uuringud küttepuudega töötavate ahjude kohta ilmusid 1990. aastate alguses (Hofbauer 1993, Rath 1995), mis panid aluse tänaseks väljakujunenud seisukohtadele.

Vaatame tänapäevaseid soovitusi salvestava ahju koldele. Ahju mootoriks tuleb lugeda ahju kollet, sest see peab kindlustama kõrge kasuteguri. Kõrge kasutegur saadakse kõrge põlemistemperatuuriga, kus suitsugaasid liiguvad koldest suitsulõõri ca 700-kraadilise temperatuuriga. Selle eelduseks on piisavalt avar kolle, põlemisõhu piisav kogus ja selle hea segunemine põlemisgaasidega. Kolde rest puudub ja kolde ruumi sisepinna



Joonis 2. Pliidi pilukolle, milles saab puhtalt põletada kuni 3,7 kg puitu (Foto Lauri Lõhmus)
Figure 2. Umwelt-Plus fireplace for clean burning of 3,7 kg wood

(6 külge) optimaalseks suuruseks peetakse maksimaalselt lubatud kütuse koguse korrutist 900-ga. Seega 25 kg küttepuude kasutamisel peab kolde sisepindala olema $900 \times 25 = 22\,500 \text{ cm}^2$. Kolde põhja kuju ei ole eriti oluline – kas ristküliku- või ruudukujulise põhjapinnaga. Küll aga ei tohi kolde pikkus ületada kolde laiust üle kahe korra. Pikas koldes, eriti selle nurkades, põlevad puud ebäühtlaselt. Oluline on ka kolderuumi kõrgus, sest küttepuud vajavad põlemiseks ruumi, kõrget temperatuuri ja aega, et suitsugaasid saaksid seguneda küllaldaselt hapnikuga. Arvutuslikult peab eelnevalt esitatud näite puhul kolderuumi kõrgus põrandast kuni kolde laeni olema vähemalt 55 cm. Maksimaalse kütusekogusega kütmisel peab halupuude kohale jääma 25 cm vaba ruumi. Suur kolle toob kaasa suure CO ja põlemata orgaanilise aine hulga ning liigõhk jahutab suitsugaase ja kolde seinu. Liialt väikese kolde korral tõuseb leek esimesse suitsulõõri ja põlemisprotsess jääb poolikuks. Meil on aastaid ehitatud ahjusid, kus kolde suuruse määrab ära pottsepa arvamus, mitte aga soojustehnikaga arvestamine. Tagajärjeks on madal kasutegur. Koldes salvestunud soojus on ca 50% kogu koldes vabanenud soojuse

hulgast. Selleks, et koldes oleks kõrgem temperatuur, mis kindlustaks suurema kasuteguri, oli Soomes aeg, kus kolle soovitati isoleerida 3 cm paksuse isolatsiooniplaadiga. Praeguseks on välja töötatud mitmed paremad šamott-tellised, millel on madal soojusjuhtivus ja suur kuumutustsüklite taluvus. See vähendab soojuse ülekannet läbi kolde seinte ja kindlustab suitsugaaside kõrge temperatuuri. Liigõhutegur ahjul põlemise jooksul on keskmiselt 2,95, s.o õhku kulub põlemisel kolm korda rohkem kui teoreetiliselt on vaja. Põlemise alguses ja lõppfaasis on see tegur 8 ja enam. Soovides vähendada liigset koldesse sisenevat õhku, kasutatakse kaasajal õhu juurdevoolu elektroonilisi reguleerijaid. Et põlemise alg- ja lõppfaasis on temperatuuri ja liigõhu suhe erinev, soovatakse temperatuuri ja liigõhu hulga kõrval pidevalt mõõta ka CO-sisaldust, millega korrigeeritakse õhu juurdevoolu koldesse.

Tabel 1. Kahhelahjude ehitusmaterjalide füüsilised parameetrid (Hofbauer 2001)

Table 1. Physical parameters of building materials for stove

Materjal	Erisoojus	Tihedus	Soojusjuhtivus	Soojasalvestusvõime	Temperatuuri juhtivusvõime	Jahtumisarv
	kJ/kg/K	kg/m^3	W/m/K	$\text{kJ/m}^3/\text{K}$	$\text{m}^2/\text{s } 10^{-6}$	s
Keraamiline kiud	0,94	700	0,24	658	0,36	27 777
Müüritellis	0,94	1570	0,84	1470	0,57	17 543
Pottsepatellis	0,96	1850	0,93	1776	0,52	19 230
Tööstuslik šamott-tellis	0,96	2350	2,04	2256	0,90	11 111
Ränikarbiid	1,20	2600	11,00	3120	3,53	2833
Wolfshöheri šamott-tellis	0,92	1900	0,76	1748	0,435	23000
Ortneri materjal KMS-240	1,09	2600	3,16	2834	1,11	8968
Tulikivi, risti	0,98	2900	2,00	2842	0,70	14 286
Tulikivi, paralleelne	0,98	2900	6,00	2842	2,11	4739
Magnesiit	1.05	3000	9,89	3150	3,13	3195
Teras	0,40	7800	58,00	3600	16,00	625

Soojussalvestusvõime on soojakogus, mis 1 m^3 aine temperatuuri tõstab 1 kraadi võrra $\text{kJ/m}^3/\text{K}$

Temperatuuri juhtivusvõime on materjali soojusjuhtivuse suhe soojussalvestusvõimesse. Tähistatakse a -ga ja mõõtühik on $\text{m}^2/\text{s } 10^{-6}$. **Jahtumisarv** näitab, kui kiirelt plaat, paksusega d , etteantud tingimustes jahtub. Soojaülekanne ei ole piiratud. Jahtumisarv muutub plaadi paksusega. Tabelis on toodud andmed 10 cm paksusega plaadi korral. Aega mõõdetakse sekundites.

Viimasel kolmel aastal on levima hakanud uus kolde ehituse süsteem. Ahju kolde sein koosneb kahest paralleelsest šamott-telistest laotud seinast, mis on eraldatud omavahel 7–8 mm laiuse piluga, mille kaudu juhitakse koldesse põlemisõhk. Pilud on kolde kolmes küljes ja paiknevad seina ülaosas. Pilude pindalad ja omavahelised kaugused saadakse arvutuste teel. Eesmärgiks on suunata ettekuumutatud põlemisõhk ümber kolde küttepuudele, mis kindlustab ahjus kõrge temperatuuri, puhta põlemise ja hea kasuteguri (82%). Selliste ahjude sisemise ehituse projekteerimine toimub arvutiprogrammi alusel (vt joonis 3). Eestis omab selle programmi litsentsi üks firma, OÜ Volt. Kütteseadme lõõride ehituses on eelistatud Wolfshöheri ahju šamott-tellised, mida peetakse üheks parimaks Euroopas ja mida saab osta ka Eestis. Osa firmasid toodab ahjudele sobilikke lõõrisüsteeme moodulitena, kuid need on šamott-tellistega võrreldes kallimad. Suitsulõõri pikkus ja nende õige ristlõige kindlustab hea soojaülekande lõõri seintele. Seinte materjal peab olema piisava soojustahtuvusega, et salvestunud soojus kanduks aeglaselt üle ahju välisseintele.

<p>GENERAL INFORMATION: Project number: 38 Date: 1.07.2014 File: C:\Pakkumised\Taavi\Ahi\Stone ove with sims.k10 Designation: Elutuba Owner: [REDACTED] Address: Location: Sooru</p>	<p>TECHNICAL DATA: Heat output: 3,0 kW = 10236,0 BTU Nominal heating time: 24 hours Maximum fill-up quantity of wood: 22,2 kg = 48,7 pounds Minimal fill-up quantity of wood: 11,1 kg</p>
<p>CHIMNEY: NEW chimney Effective height: 5,7 m Length: : 27,0 cm Width: 27,0 cm</p>	<p>Length of flue = 9,36 m</p>
<p>COMBUSTION CHAMBER: Combustion chamber type: Eco-labeled combustion chamber-UZ37 dimensions of combustion chamber: area: 3000cm² A= 50,0cm B= 60,0cm (H) height of combustion chamber 65,0cm gas slot=22cm²</p>	
<p>RESULTS: Quantity turnover of fuel: 17,3 kg/h Air volume: 0,062 m³/s Flue gas mass flow: 0,078 kg/s Minimum length of flue: 7,06 m Length of flue: 9,36 m</p>	

Joonis 3. Näide Austria pottsepaühingu programmiga projekteeritud ahju passist (K. Koppel)
 Figure 3. Example of computer aided stove design from passport of stove

Esimene põhjalik norm salvestavatele ahjudele kinnitati Austrias 01.01.1999. A, ÖNORM B 8301. Selle materjali põhjal võeti 2010. aastal vastu EN 15544, mis kehtib soovituslikult kogu EL-is. Normis on soovituslikud näitajad CO, NO, lendtuha, põlemata orgaanika ja kasuteguri kohta. Kuidas mõõta salvestavas ahjus neid parameetreid, seda õpetab EN 15250. Keskkonnaministeeriumi tellitud uurimus näitas, et Eestis 2013. a mõõdetud ahjus oli CO-d ja lendtuhka soovituslikust normist neli korda rohkem (Teinemaa 2013).

Taastuva energia kasutamise arengukava ja kehtestatud rangete normidega küttekeha põlemisgaaside kohta on Austria ja Šveitsil kavas nõuda vanade ahjude kohustuslikku ümberehitust. Ümberehituse graafik on koostatud sõltuvalt ahju ehitusaastast. Samal ajal on Saksamaa võtnud vastu otsuse, et ümberehitus toimuks siis, kui antud ahi (küttekeha) vajab remonti suure kulumise tõttu. Saksa autorite seisukoht on ka, et uued ranged normid põlemisgaaside ning kasuteguri kohta tahetakse liialt rangeks viia ja nende normide täitmist saab nõuda ainult vahetult peale kütteseadme vastuvõtmist, sest küttekolde hilisema töö käigus need näitajad halvenevad. Eestis toimub uutele saastanormidele üleminek aeglaselt, neid on veel vähe tutvustatud ja seetõttu pole paljud meistrid mõistnud selle tähendust. Palju on räägitud ka sellest, et müügil peaks olema kuivad halupuud, mille maksimaalne niiskus on 20%.

Kokkuvõte

Eelmise sajandi lõpus Euroopa Liidus toimunud arengud tõid Eestis kaasa samad nõuded umbes kümme aastat hiljem, mil meil hakkasid toimuma pottseppade koolitused, kus tutvustati Euroopa soovitusi ning meie meistrid pääsesid esmakordselt 2009. aastal Austriasse Ortneri firma poolt läbi viidud koolitustele. Sealt tulid sidemed ja erialateadmised ning traditsiooniks muutus messide külastamine. Eeltoodu on tänaseks viinud Eestis ahjuehituse uuele tasemele. Saavutatud olukord peaks vastama Euroopa Liidus kehtivatele nõuetele ja parandab puidu kui taastuva energiaallika kasutust.

Kasutatud kirjandus

- Hofbauer, H., Schiffert, T. 2001. Der Kachelofen in der Praxis Vorortmessungen bei Kachelöfen. – Österfreichischer Kachelofenverband.
- Hofbauer, H. 1993. Kleinholzfeuerungen. Entwicklungen in Österreich. Österreich, Kufstein, AT.
- Rath, M. 1995. Einsatz neuer Techniken zur Optimierung der Verbrennung und Erhöhung der Anwendungs- und Bedienungsfreundlichkeit des Holzbrandkachelöfens – Forschungsbericht. – AG Wien.

Teinemaa, E., Maasikmets, M., jt. 2013. Genfi piiriülese õhusaaste kauglevi konventsiooni püsivate orgaaniliste saasteainete protokoll nõuete täitmine. – Keskkonnaministeerium. Kättesaadav http://www.envir.ee/sites/default/files/genfi_aruanne_final.pdf (1.10.2014)

ABOUT THE DEVELOPMENT OF WOOD AS A RENEWABLE ENERGY SOURCE IN ESTONIA

Annes Andresson, Mart Hovi

In Estonia the main fuel for ovens is firewood and it is considered to be one of the cheapest options to heat homes. Due to the development in the field of renewable energy sources it might not stay as it has been. It is advisable to think about the modernisation of suitable combustion technique beforehand. Even though many authors advised to start using grate-firebox during the second half of 20th century, the newer research shows that clean burning is not achieved when steering air into the furnace from under the furnace. In addition to the heat loss that comes from the chemically incomplete burning, oven is also considered to be the source of fine pollution. For Centuries the emphasis has been on making ovens more effective in German speaking countries (and elsewhere). Considering the conditions in Estonia, we should have the same aim.

LISANDITEGA PUITBRIKETI ENERGIABILANSS

Mart Hovi ja Külli Hovi

EMÜ tehnikainstituut Kreutzwaldi 56, Tartu

Annotatsioon

Briketeerimisprotsessi loetakse suhteliselt energiamahukaks, kuid võrreldes kulutatud energiat kütuse kütteväärtusega, siis jääb see isegi primaarenergiaks ümber arvatult alla kümne protsendi võrreldes kütuse alumise kütteväärtusega. Autorite poolt läbi viidud katsed näitavad, et tegelik energiakulu on veel oluliselt väiksem, sest põhiline kulu tuleneb seadme töömehanismi enda liigutamisest. Briketi moodustumiseks vajalik energia on üliväike. Põllumajandus- ja metsatööstuse jääkidenä tekiv puistematerjal on madala mahumassi ja sellest tulenevate käitlemisprobleemidega, seetõttu on igati põhjendatud sellest survetöötlemise teel ühtlaste omadustega kütuse tootmine. Kahjuks ei allu tooraine briketimasina survele, kuid selle käideldavust saab oluliselt parandada puidu lisamisega segudesse.

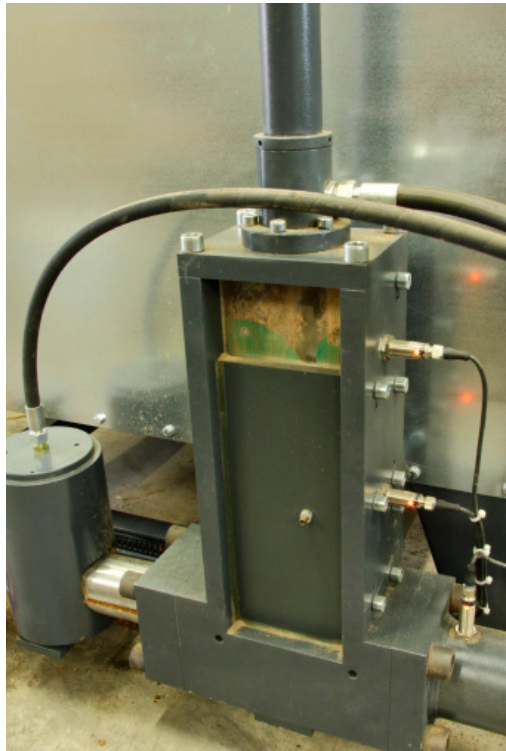
Märksõnad: kütusebrikett, puit, jäätmed, väärindamine.

Sissejuhatus

Lähtudes asjaolust, et meditsiini- ja infotehnoloogia kõrval on Eesti nutikate prioriteetide hulgas ka ressurside väärindamine, tuleks põllumajanduses ja puidutööstuses tekkivaid kütusena vaadeldavaid jääke käsitleda kui toorainet. Kuna Lõuna-Eesti spetsialiseerumisvaldkonnad on puit ja toit, siis vajab ka teravilja- ja puidutööstuse tootmisjääkide kasutamine täielikku tähelepanu.

Metoodika

2014. aasta suvel toimus EMÜ tehnikainstituudis põllumajanduslike brikettide proovi-partiide tootmine. Selle töö põhiline eesmärk oli valmistada tehiskütust edaspidisteks põletuskatseteks automaatse tigusööturiga tahkekütusekatlale LUK-50. Segud teraviljatootmisjääkidest ja saepurust valmistati suhtes 3/1. See tähendab, et briketeeriti saepuru, millele lisati 25% mahus viljajääke. Lisaks rapsi, odra ja kaera tootmisel teraviljapuhastist saadud ülejääkidest tehtud segudele tehti võrdluskatsed haava hakkpuidu ning kasekoorega. Tootmise käigus registreeriti energiaarvestiga pressile Weima C-150 kulutatud elektrienergia. Kasekoorebriketi tootmisel salvestati andmed täiendavalt võrguanalüsaatoriga. Katsetele järgnes tühikäigukatse, mis näitas, et kui toodangut andva briketeerija elektriline võimsus on 4,9 kW ja tühikäigul 4,4 kW, siis erinevus mõõtmistulemustes on ainult 0,5 kW ehk täisvõimsusest 9,8%. Seega võib järeldada, et briketeerimismasina kasutegur kaudsel meetodil hinnatuna on väga madal – alla kümne protsendi. Selline tulemus on tingitud seadme tööga kaasnevast suurest hõõrdumisest.



Joonis 1. Pressimisel kasutatud press Weima C-150 (Foto autor Kaspar Dobrus)
 Figure 1. Used briquet machine Weima C-150 (Photo Kaspar Dobrus)

Tabel 1. Briketeerimisel kogutud andmed energiakulu ja tootlikkuse kohta
Table 1. Data collected during the experiments about energetics and productivity

Briketid	Vahe- kord	Aeg, h	E, kWh	Mass, kg	ρ, kg/m³	E1, kWh/kg	τ, kg/h	P, kW
Kaer	1 + 3	0,45	1,768	28,18	983,62	0,06274	62,62	3,93
Kaer	1 + 3	0,40	1,829	24,94	976,28	0,073336	62,26	4,57
Oder	1 + 3	0,60	2,709	33,92	1031,3	0,079864	56,53	4,52
Oder	1 + 3	0,68	2,741	34,86	1065,6	0,078629	51,01	4,01
Kaer	1 + 4	0,52	2,055	30,7	920,81	0,066938	59,01	3,95
Hake	1	0,64	3,078	26,54	965,4	0,115976	41,43	4,81
Koor	1	0,47	1,983	22,12	1059,3	0,089647	47,04	4,22
Tühijooks								3,55



Joonis 2. Kasekoor ja sellest valmistatud silindriline presstoode (Foto autor Kaspar Dobrus)
Figure 2. Raw material and produkt (Photo Kaspar Dobrus)

Samalaadne katse tehti projekti „Ecohousing“ raames Eesti Maaülikoolis 2013. aastal koostöös Riia Tehnikaülikooli energia- ja keskkonnatehnika osakonnaga, mille kohta on ilmunud ka konverentsimaterjal (Žandeckis jt 2013)

Tavakasutaja, kes lisas Eestis klassikaliselt levinud pliidi restkoldesse eelkirjeldatud briketti, nendib, et kütus ei võtnud esialgu nii hästi tuld külge kui halupuu ja põlemine oli veidi raugem ning tekkinud tuhakogus suurem. Kütus sobib hästi, kui on vaja rahu-likku tuld, näiteks toidu hautamisel.

Teooria

Teoreetilises käsitluses saaks väljendada otseselt briketeerimisele kuluvat energiat jõu ja teepikkuse kaudu. Teatavasti Newtoni teine seadus sätestab, et jõu poolt teekonnal tehtud töö on arvutatav teepikkuse ja jõu korrutisena. Kui lähtuda briketitoomre keskmisest tihedusest 300 kg/m^3 ja valmis toote tihedusest ligikaudu 1000 kg/m^3 , siis saab teisendada 5 cm briketi algmaterjali pikkuseks 15 cm. Teisalt on briketi tootmisel väljuva briketi kiirus ligikaudu 0,01 m/s. Kui seejuures eeldada, et selle väljumise põhjustajaks on töösilindri pidev surve kuni 200 kN $0,001963 \text{ m}^2$ pinnale, saaks hinnanguliselt väita, et tegelikult vajalik võimsus oleks $P = 0,01 * 200 / 0,001963 = 1020 \text{ MW}$.



Joonis 3. Energiakulu mõõtmiseks kasutati tööstuslikku energiaarvestit (Foto autor Kaspar Dobrus)
Figure 3. Measuring energy with industrial energy meter (Photo Kaspar Dobrus)

Kuna aga maksimumsurvet rakendatakse väga lühiajaliselt, siis tegelik kulu on oluliselt väiksem. Survesilindri tööõhu mõõtmised võiksid anda täpsema ettekujutuse päriselt vajaliku energia kohta.

Kokkuvõte

Autorid leiavad, et kütuse väärindamist briketeerimise või muul moel survetöötusega peaks täiendavalt uurima just mitmesuguste põllumajandusjääkide kasutamisel. Selline töötlus annab võimaluse algselt raskesti käideldava toorme laialdasemaks kasutuseks. Artiklis kirjeldatud ümarbrikett on kergesti kasutatav ka tigusööturiga automaatpõletites, kus puistematerjal kipub moodustama võlvi. Brikett on hästi kasutatav ka käsitsiteenindatavates kolletes, kus saab laiema kütusevalikuga juhtida põlemisrežiimi soovitud suunas. Tavakasutaja kogemusel sobib põllumajanduslik brikett näiteks toidu hautamisel rahulikuma kuumuse saavutamiseks.

Kasutatud kirjandus

Raagmaa, G., Lilles, A., Ernits, R. 2014. Tartu ja Lõuna-Eesti nutika spetsialiseerumise strateegia. – Tartu Ülikool. Võrguteavik, kättesaadav: http://www.ec.ut.ee/sites/default/files/ec/lenss_raport.pdf (1.10.2014)

Žandeckis, A., Romagnoli, F., Beloborodko, A., Kirsanovs, V., Menind, A., Hovi, M., Blumberga, D. 2013. Briquetes from mixtures of herbaceous biomass and wood: biofuel investigation and combustion tests. – Proceedings of the The 8th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, Zagreb.

Tänuavaldused

Uurimistöö läbiviimist toetas Keskkonnainvesteeringute Keskus.



THE ENERGY BALANCE OF THE WOODEN BRIQUETTE WITH ADDITIVES

Mart Hovi, Külli Hovi

The process of making briquette is considered to be fairly energy-intensive. Nevertheless, if we compare energy expenditure to the heating value of the fuel, then it will be less than 10 % even when calculated into primary energy. The experiments that were conducted by the authors illustrate that the actual energy expenditure is significantly smaller. The main expenditure comes from moving the device. The energy that is needed for making the briquette is insignificant. As the residual bulk-material from agricultural and forest industry has low bulk density and consequently it has several management problems. However, it is strongly justified to produce fuel with homogeneous properties using pressure processing. Unfortunately the raw material does not obey the pressure from the briquette machine, yet, the management can be substantially improved with adding wood to the mixtures.

ENERGIAHEINA JAOTATUD KORISTUSVIIS. KÜLVISENORMI, REAVAHE LAIUSE JA LÄMMASTIKVÄETISE FOONI MÕJU ENERGIAHEINA SAAGILE

Ants Bender

ants.bender@etki.ee

Annotatsioon

Päideroo kasutamist bioenergia tootmiseks Eestis on seni vähe uuritud. Katsed jäljendada Soomes rakendatavat tehnoloogiat (üheniiteline koristamine varakevadel keltsalt) on praktiliselt ebaõnnestunud. Seda kahel põhjusel: Eestis ei tekigi igal aastal korralikku keltsa ja talve jooksul lamandub 1,5–2,0 m kõrgune taimik meie oludes sedavõrd, et selle koristamine on osutunud võimatuks (Raave jt 2008, 2009). Käesoleval ajal kasutatakse päideroogu Eestis küttematerjalina vähe. Rakendusel on tehnoloogia, mis seisneb ühekordses niitmises juulis, massi kuivatamises põllul heinaks ja selle kasutamises hiljem kütmiseks. Mooduse puudused:

- 1) suvel koristatud päideroo põletusomadused jätavad soovida;
- 2) saagiga viiakse põllult ära arvestatavas koguses taimetoitaineid (eriti K), mida tuleb väetamisega kompenseerida;
- 3) päideroog ei talu vegetatsiooniperioodil madalat niitmist, mistõttu märkimisväärne osa formeerunud maapealsest biomassist (kõrge konts) jääb saagina kasutamata;
- 4) suve teisel poolel kasvatab päideroog ädala, mida on võimatu küttematerjaliks koristada: sügisel on massi niiskusesisaldus kõrge, kevadeks aga on ädala lamandumine sedavõrd tugev, et koristamine on praktiliselt võimatu.

Jõgeval aastatel 2008–2013 läbiviidud uurimistöö eesmärgiks oli välja töötada moodus, mis võimaldaks päideroo küttematerjaliks kasvatamisel eeltoodud puudusi leevendada või hoopis kõrvaldada. Selleks pakub võimaluse saagi jaotatud (kahe osas) koristamine. Juuli II poolel, kui ilmaolud on heina kuivatamiseks Eestis soodsaimad, niidetakse päideroog heinaks 60–65 cm kõrguselt, kontshein jäetakse põllule kasvama kuni järgmise aasta vegetatsiooniperioodi alguseni ja koristatakse see kas keltsalt või kandva keltsa puudumisel hiljem, mil põllupind on tahenenud ning kannab masinaid. Mooduse eelised on järgmised:

1. Põletusaine saagina on kasutatav kogu vegetatsiooniperioodil moodustunud päideroo maapealne biomass: a) varakevadel võib niita nii madalalt, kui kasutatav niiduk ja põllu tase võimaldavad; b) koos kontsheinaga koristatakse ja on võimalik ära kasutada ka suve II poolel moodustunud ädal.

2. Kontshein lamandub vähem (või ei lamandu üldse). Püstine taimik kuivab ja pinnas taheneb kiiremini, tänu millele saabub koristusaeg varem ja pikeneb ajaliselt.
3. Põllult saagiga äraviidavate taimetoitainete kogused vähenevad.
4. Kaks kolmandikku saagina koristatavast massist on paremate põletusomadustega.

Jõgeval läbiviidud katsetes selgitati külvisenormi, reavahe laiuse ja lämmastikväetise fooni mõju päideroo kuivainesaagile ning saagi kvaliteedile, kui rakendati jaotatud koristusviisi. Arvutati katsevariantide saagiga toodetud soojusenergia hulk.

Märksõnad: päideroo jaotatud koristusviis, kuivaine saak, saagi kvaliteet, energeetiline väärtus.

Sissejuhatus koos ülevaatega läbiviidud põldkatsetest

Bioenergia tootmisel on mitmeaastastest heintaimedest Eestis enim perspektiivi päiderool. Liigile on iseloomulik väga hästi välja arenenud juurekava. Teise kasvuaasta lõpuks on päiderool juurte ja võsundite näol enam kui 50% biomassist mullas (Kätterer, Andren 1999). Tugev juurekava tagab teiste heintaimeliikidega võrreldes ilmastikukindluse ja kõrgema ning aastati stabiilsema kuivainesaagi. Eestis on päideroog katsetes andnud kaheniitelisel kasutusel 8–12 t kuivainet hektarilt (Koitjärv 1989, Annuk 1992). Katsed viidi läbi turvas- ja lammimuldadel ning nende eesmärgiks oli söödatootmine. Kasvuperioodil on liik madala niitmise suhtes tundlik (Annuk 1979). Niites madalamalt kui 12–15 cm, väheneb taimiku produktiivne kasutusiga (Annuk, Liiv 1981). Sellel kõrgusel päideroogu heinaks niites jääb oluline saagiosa (konts) põllule.

Jõgeval korraldati aastatel 2008–2013 leostunud põllumullal (K_0) rida põldkatseid, selgitamaks päideroo (sort 'Pedja') reavahe laiuse, külvisenormi ja lämmastikväetise fooni mõju kuivainesaagile ja selle kvaliteedile, pidades silmas võimalust kasutada toodetud massi kütteinena. Rajamise eel sai katseala mineraalväetisi normiga P 19, K 67 kg ha⁻¹. Saaki määrati katsetest kolmel (neljal) aastal. Katsetes tehti niide juuli II poolel 60–65 cm kõrguselt, kuivatati haljasmass kontsul õhukuivaks, koristati ja määrati saak ning selle kvaliteet. Kontshein jäeti kasvama kuni järgmise aasta kevadeni, niideti see aprillis (2013. a lumerohe talve ja väga hilise kevade tõttu erandina 2. mail), määrati saak ja tehti analüüsid kvaliteedi hindamiseks. Katsevariantide kohta leiduvad andmed tabelis 1. Reavahe laiuse ja külvisenormi katses oli lämmastikväetise foon N 140 kg ha⁻¹ antuna kahes annuses: pool kogusest kevadel nädal pärast taimekasvu algust ja teine pool pärast esimest saagikoristust kontsule. Lämmastikväetise kasutamise katses anti lämmastikväetist vastavalt katsevariandile. Artiklis nimetatakse esmakasvu saaki

põhuks (mitte heinaks), sest niitmine toimus taimede hilises arengufaasis, mil seeme oli juba valminud.

Saagiaastate vegetatsiooniperioodid 2010 ja 2011 olid paljude aastate keskmisest kõrgema õhutemperatuuriga ja põuased, 2012. aasta vegetatsiooniperiood oli temperatuurilt paljude aastate keskmisele lähedane, tavalisest sajusema juuni (110 mm) ja augustiga (130 mm). Talved olid katsete läbiviimise ajal Jõgeval lumerohked. Lumikatte paksuseks mõõdeti üle 30 cm, 2010/2011. aasta talvel koguni üle 50 cm.

Katsetulemused

Kolme saagiaasta katsetulemuste põhjal võib väita, et päideroo kasvatamisel (eesmärgiga toota põletusainet) on otstarbekas külvata põld kitsarealiselt (15 cm) (tabel 1). Reavahe suurendamisega 30 või 45 cm-ni kuivainesaak usutavalt küll ei vähenenud, kuid rajamisaasta suuremad kulud umbrohutõrjele ületavad väiksema külvisenormi kasutamise saavutatud rahalise võidu.

Kitsarealiselt rajatud külvisenormi katsest selgus, et taimiku kolmandaks eluaastaks, kui hakati saaki määrama, olid taimikud võrsumise teel peaaegu ühtlustunud ja suuri erinevusi kuivainesaagis variantide vahel ei ilmnenud. Siiski ilmnis kolme aasta kuivaine saakide summas tendents: mida suuremat külvisenormi kasutati, seda kõrgem oli saak, kuid võttes arvesse katseviga, tuleb lugeda külvisenormid 4, 6 ja 8 kg ha⁻¹ võrdseks. Mõningast kuivainesaagi lisa kindlustas külvisenorm 10 kg ha⁻¹, seda põhiliselt suurema kontsheina saagi tõttu esimesel saagi määramisel (veel noorel, külvisenormist enam mõjutatud taimikul).

Päideroog on heintaimeliik, mis nõuab hea saagi formeerimiseks suuri lämmastikukoguseid. Meie katseandmete põhjal on külviaastal ja ka saagiaastal otstarbekas väetada normiga N 140 kg ha⁻¹, antuna kahes jaos. Sellest esimene pool (N 70) kevadel nädal pärast taimekasvu algust ja teine pool juuli lõpus pärast esimese lõikuse koristamist. Suurem lämmastikuannus saagiaasta kevadel võib sademeterohkel aastal kaasa tuua esmakasvu lamandumise, mis raskendab koristust ja viib märgatavate saagi kadudeni. Kevadine lämmastiku jaotatud andmine (N 35 + 35) võrreldes ühekordse andmisega (N 70) usutavat saagilisa ei andnud.

Kirjandusallikaist võib leida päideroo kui põletusaine kütteväärtuse kohta erinevaid andmeid. Need erinevused võivad tuleneda sellest, et andmeid ei esitata sageli mitte kuivaine, vaid mitmesuguse niiskusesisaldusega massi kütteväärtuse kohta. Tšeh-

*Tabel 1. Päideroo põhu ja kevadel koristatud konsheina saagid. KA t ha⁻¹
 Table 1. Yields of straw and delayed harvested stubble hay of reed canarygrass. DM t ha⁻¹*

Variant	Põhk Straw	Konts- hein Stubble hay	Põhk Straw	Konts- hein Stubble hay	Põhk Straw	Konts- hein Stubble hay	Põhk kokku Straw	Konts- hein kokku		Kh osa St hay	KA DMI	
								St hay	total			%
	22.07.10	27.04.11	14.07.11	12.04.12	26.07.12	02.05.13	total	total			total	
				Reavahelaius / Row spacing								
15 cm	3,38	4,93	2,10	4,30	2,39	3,89	7,87	13,12	62,5		20,99	
30 cm	3,86	3,76	1,94	3,13	2,83	3,82	8,63	10,70	55,4		19,33	
45 cm	3,20	3,58	2,55	3,42	2,39	4,56	8,13	11,55	58,7		19,69	
60 cm	3,07	3,20	2,23	3,17	2,05	3,78	7,35	10,15	58,0		17,50	
LSD 0,05	0,32	0,44	0,55	0,71	0,28	0,30	0,49	0,93			2,73	
				Külviseenorm / Seeding rate								
4 kg/ha	3,46	5,02	2,66	4,48	2,21	3,46	8,33	12,96	60,9		21,29	
6 kg/ha	3,88	4,79	2,42	3,95	2,79	3,85	9,10	12,59	58,1		21,69	
8 kg/ha	3,46	5,33	2,68	4,38	2,45	3,89	8,60	13,60	61,3		22,20	
10 kg/ha	3,58	6,01	2,85	4,51	2,35	3,78	8,79	14,30	61,9		23,09	
LSD 0,05	0,49	0,15	0,82	0,57	0,78	0,45	0,38	0,93			1,69	
			Lämmastikväetis / Nitrogen fertilizer									
N35 + N35	2,51	5,49	2,30	4,10	2,05	2,83	6,85	12,42	64,4		19,27	
N35+2xN35	3,11	5,55	2,54	3,74	2,35	2,97	7,99	12,26	60,5		20,25	
N35 + N70	3,17	5,54	2,76	4,04	2,21	3,25	8,15	12,83	61,2		20,98	
N70 + N70	3,58	7,81	2,96	4,16	2,28	3,57	8,82	15,54	63,8		24,36	
LSD 0,05	0,34	0,79	1,36	0,49	0,27	0,33	0,41	1,18			1,19	

hi Vabariigis on määratud varakevadel koristatud päideroo kuivaine kütteväärtuseks 17,80 KJ 1 kg KA kohta, kui aga sama põletusaine sisaldas 20% niiskust, siis ainult 14,59 KJ (Strašil 2012). Ka niiteaeg mõjutab mingil määral kuivaine kütteväärtust. Tšehhi Vabariigis on määratud erineval ajal koristatud päideroo kuivaine kütteväärtust ja leitud, et juulis koristatud massil on see 16,91 ja varakevadel (neil märtsis) koristatud massil 17,19 KJ 1 kg KA kohta (Strašil et al. 2005). Neid kirjandusallikaist leitud kõige tagasihoidlikumaid kütteväärtusi on võetud arvesse meie katsetest koristatud kuivaine-saakide energeetilise väärtuse arvutamisel (tabel 2).

Meie katsetes oli kõige vähem soojusenergiat võimalik saada katsevariandis, mis külvati 60 cm reavahega – kolme kasutusaasta summas 299 GJ ha⁻¹ (ehk ca 100 GJ ha⁻¹ aastas). Kõige rohkem saadi soojusenergiat aga variandis, mis külvati kitsarealisel külvivis normiga 6 kg seemet hektarile ja väetati lämmastikväetisega nii kevadel kui pärast esmakasvu saagi koristamist, mõlemal korral normiga N 70 kg ha⁻¹. Kolme kasutusaasta summas moodustas saagi kuivaine energeetiline väärtus kirjeldatud variandis 416 GJ hektarilt. Aastas oleks selles katsevariandis võinud põhu ja kevadise kontsheina arvelt toota soojusenergiat keskmiselt 138 GJ ha⁻¹.

Tabel 2. Kolme aasta jooksul kogutud päideroo põhu ja kontsheina kuivaine energeetiline koguväärtus

Table 2. Energetic value of dry matter of reed canarygrass straw and stubble hay over a three-year period

Variant	Põhk	Kontshein	KA kokku	Põhu energeetiline väärtus	Kontsh. energeetiline väärtus	Kokku
	Straw	Stubble hay	DM total	En value of straw	En value of St hay	Total
	t ha ⁻¹	t ha ⁻¹	t ha ⁻¹	GJ	GJ	GJ
Reavahe laius / Row spacing						
15 cm	7,87	13,12	20,99	133,1	225,5	358,6
30 cm	8,63	10,70	19,33	145,9	183,9	329,9
45 cm	8,13	11,55	19,69	137,5	198,5	336,0
60 cm	7,35	10,15	17,50	124,3	174,5	298,8
Külvisenorm / Seeding rate						
4 kg/ha	8,33	12,96	21,29	140,9	222,8	363,6
6 kg/ha	9,10	12,59	21,69	153,9	216,4	370,3
8 kg/ha	8,60	13,60	22,20	145,4	233,8	379,2
10 kg/ha	8,79	14,30	23,09	148,6	245,8	394,5
Lämmastikväetis / Nitrogen fertilizer						
N35 + N35	6,85	12,42	19,27	115,8	213,5	329,3

N35+2xN35	7,99	12,26	20,25	135,1	210,7	345,9
N35 + N70	8,15	12,83	20,98	137,8	220,5	358,4
N70 + N70	8,82	15,54	24,36	149,1	267,1	416,3

Katsetes uuriti ka päideroo kuivaine kvaliteeti ja selle muutumise dünaamikat (tabel 3). Kvaliteeti iseloomustavad näitajad valiti nii võimaliku söödatootmise (TP, ADF, NDF) kui soojusenergia tootmise vajadustest lähtudes (lehtede–varte vahekord, K ja toortuha sisaldus). Toorproteiini, happe ja neutraalkiu sisalduse põhjal otsustades on söödana kasutatav päideroo külviaasta taimik. Selle jätmise ületalve põllule ei ole otstarbekas, sest kõrtevaene taimik lamandub ega ole kevadel koristatav.

Juulis, seemnete täisküpsuse faasis koristatud päideroo kuivaine on söödana väheväärtuslik. See on kasutatav põletusainena, kuid suhteliselt kõrge kaaliumi- ja toortuhasisalduse tõttu vajab kasutamisel erimeetmeid. Põletusainena on parimate omadustega päideroo kevadkoristatud saak. Talve jooksul on märgatavalt vähenenud maapealse biomassi kaaliumi- ja toortuhasisaldus. Märgatav muudatus on toimunud ka lehtede ja varte vahekorras viimase kasuks.

Koristatud päideroo põhu niiskusesisaldus oli 2010. aastal 14,5%, 2011. aastal 20,3% ja 2012. aastal 18,2%. Kevadel koristatud kontsheina niiskusesisaldus oli 2011. aastal 14,3%, 2012. aastal 14,4% ja 2013. aastal 15,2%. Viimasel, 2013. aastal püsis Jõgeval lumikate 11. aprillini, s.o paljude aastate keskmisega võrreldes ebaharilikult kaua. Maapind tahenes alles mai alguseks. Kontsheina niitmise toimus sel aastal mitte aprillis (nagu kahel eelmisel aastal), vaid 2. mail, mil vegetatsioon oli juba alanud ja niitmisel sattus kontsheina hulka ka vähesel määral noorte võrsete lehetippe. Kui päideroo põletusaine lubatud niiskusesisalduse ülempiiriks on 20%, vastas kogutud materjal kõigil koristusaegadel sellele nõudele. Niisugune mass ei vaja täiendavat kuivatamist. Teda võib ladustada, kartmata seejuures isekuumenemise ohtu. Soomes makstakse kõrgendatud hinda energiaheina eest, mille niiskusesisaldus on alla 14% (Kontturi, Pahkala 2007). Meie katsetes ei saavutatud ühelgi koristusajal seda taset.

Tabel 3. Päideroo kvaliteedi näitajad
 Table 3. Quality indices of the reed canarygrass

	Koristusaeg	Lehed	Var-red	Umb-rohi	TP %	ADF	NDF	K %	Toor-tuhk
	Harvest time								
		Leaves	Stems	Weeds					Ash
		%	%	%					KA-s, %
1	Haljasmass (2008) sügisel Green mass (2008) autumn	58,7	36,8	4,5	9,83	29,1	48,08	1,430	10,62
2	Põhk 14.07.11 Straw 14.07.11	54,4	38,8	6,9	9,18	34,86	61,74	1,520	5,46
3	Kontshein 18.07.11 Stubble hay 18.07.11	30,0	62,0	8,0	5,85	41,43	64,18	0,948	5,14
4	Kontshein 10.10.11 Stubble hay 10.10.11	41,9	54,4	3,8	7,72	43,82	65,28	0,766	6,36
5	Kontshein 12.04.12 Stubble hay 12.04.12	16,9	83,1					0,181	4,87

Kokkuvõte

Bioenergia tootmisel on mitmeaastastest heintaimedest Eestis nagu naaberriikideski enim perspektiivi päiderool. Jõgeval aastatel 2008–2013 läbiviidud katsete põhjal on otstarbekas kasutada energiaheina tootmisel jaotatud koristusviisi. Juuli II poolel 60–65 cm kõrguselt tehtud niite saak kuivatatakse põllul. Kontshein jäetakse kasvama kuni järgmise kevadeni, mil see koristatakse koos suve II poolel kasvanud ädalaga aprillis kas kelsalt või kelta puudumisel pärast maapinna tahenemist, kuid enne taimekasvu algust. Jaotatud koristusviisi puhul annab päideroog 5–8 t kuivainet hektari kohta, millest ca 40% kogutakse juulis ja 60% kevadel. Aasta jooksul hektarilt toodetud energiaheina energeetiline koguväärtus on 100–140 GJ. Mooduse eelised: a) võimalus kasutada kogu vegetatsiooniperioodil moodustunud maapealne biomass soojusenergia tootmiseks; b) taimetoitaineid viiakse saagiga põllult vähem minema, mis võimaldab väetamiskulude arvelt säästa; c) võrreldes seni tootmises mõnevõrra levinud päideroo heina kasutamisega kütteks, tagab jaotatud koristusviisi ca 2/3 ulatuses paremate põlemisomadustega küttematerjali.

Tootmispõld on otstarbekas rajada kitsarealises külvis (reavahe 15 cm) külvisenormiga 8–10 kg ha⁻¹. Lämmastikväetist tuleks kasutada jaotatult: kevadel taimekasvu alguse järel normiga N 70 kg ha⁻¹ ja pärast saagikoristust juulis normiga N 70 kg ha⁻¹. Kuna juulis toimub koristus taimede hilises arengufaasis, on jaotatud koristusviisi võimalik ühildada päideroo seemnekasvatusega (Bender 2014). Sellisel juhul niidetakse esmakasv kombainiga, pekstakse seeme välja, põhk aga koristatakse energiaheinaks.

Kasutatud kirjandus

- Annuk, K. 1979. Päideroo niitmise sagedusest, kõrgusest ja kolmeniitelise kasutuse niidetevahelise perioodi pikkusest. – Teaduse saavutusi ja eesrindlikke kogemusi põllumajanduses. Tallinn, nr 27, lk 44–48.
- Annuk, K. 1992. Polderniitude rajamine ja intensiivne kasutamine turvasmuldadel. Tallinn (vene keeles).
- Annuk, K., Liiv, J. 1981. Niitmise kõrgusest ja saagist. - Teaduse saavutusi ja eesrindlikke kogemusi põllumajanduses. Tallinn, nr 18, lk 37–41.
- Bender, A. 2014. Kokkuvõtte Jõgeval läbiviidud päideroo (*Phalaris arundinacea* L.) seemnekasvatuse katsete tulemustest. – Agraarteadus, nr 1, lk 3–16.
- Koitjärv, M. 1989. Heintaimede viljelemise intensiivistamine turvasmuldadel. – Eesti Maaviljeluse ja Maaparanduse Teadusliku Uurimise Instituudi teadustööde kogumik LXIV. Intensiivne niiduviljelus. Tallinn, lk 62-70.
- Kätterer, T., Andren, O. 1999. Grown dynamics of reed canarygrass (*Phalaris arundinacea* L.) and its allocation of biomass and nitrogen below ground in a field receiving dayli irrigation and fertilisation. – Nutrient Cycling in Agroecosystems, Vol 54, p 21-29.
- Kontturi, M., Pahkala, K. 2007. Reed canarygrass cultivation for large scale energy production in Finland. – NJF Seminar 405. Production and utilization of crops for energy. Vilnius, Lithuania 25.–26. September 2007, p 104–108.
- Raave, H., Noormets, M., Selge, A., Viiralt, R. 2008. Energiaheina tootmise võimalikkusest Eestis. – Agronoomia 2008. Tartu, lk 174-177.
- Raave, H., Espenberg, E., Laidna, T., Muga, A., Noormets, M., Selge, A., Viiralt, R. 2009. Heintaimede sobivusest ja agrotehnikast energiaheinana. – Agronoomia 2009. Jõgeva, lk 248–253.
- Strašil, Z. 2012. Evaluation of reed canary grass (*Phalaris arundinacea* L.) grown for energy use. – Research in Agricultural Engineering, Vol 58, No 4, p 119–130.
- Strašil, Z., Vana, V., Kaš, M. 2005. The reed canary grass (*Phalaris arundinacea* L.) cultivated for energy utilization. – Research in Agricultural Engineering, Vol 51, No 1, p 7–12.

DIVIDED HARVESTING METHOD OF ENERGY HAY. THE EFFECT OF SEEDING RATE, ROW SPACING AND NITROGEN FERTILIZER ON THE YIELD OF ENERGY HAY

Ants Bender

In the production of bioenergy, in Estonia, like in neighbouring countries, reed canarygrass is the most promising of perennial grasses. The experiments conducted in Jõgeva in 2008–2013 indicated that for the production of energy hay it was useful to apply a divided harvesting method. The cut made at the height of 60–65 cm in the second half of July is dried in the field. Stubble hay is left to grow until the next spring, when it is harvested together with the aftermath of the previous late summer. Such delayed harvest is carried out in April on ground frost, or if there is no frost, after the soil has become dry but before the start of plant growth. In the case of the divided harvesting method reed canarygrass yields 5–8 t of dry matter per hectare, of which about 40% is harvested in July and 60% delayed harvested in spring. The total energy output of energy hay per hectare per year is 100–140 GJ. The advantages of this method are as following: a) it is possible to use the above-ground biomass of the whole vegetation period for energy production; b) less nutrients are removed from the field with yield, thus it is possible to reduce fertilization costs; c) compared to the use of reed canary grass as fuel so far, the divided harvesting method guarantees a fuel with approximately 2/3 better burning properties.

It is expedient to establish the production field with narrow row spacing (15 cm) and with seeding rate of 8–10 kg ha⁻¹. The application of nitrogen fertilizer should be divided: in spring after the start of growth at the rate of N 70 kg ha⁻¹ and after the harvest in July at the rate of N 70 kg ha⁻¹. As in July the harvest takes place in the late growth stage of plants, it is possible to combine the divided harvest method with the seed production of reed canarygrass (Bender 2014). In this case the first growth is cut with a combine harvester, seeds are threshed, but straw is harvested as energy hay.

MIKROVETIKAD TAASTUVENERGIA ALLIKANANA

K. Ritslaid, L. Podkuiko, J. Olt, T. Kikas

Eesti Maaülikooli Tehnikainstituut, 51014 Tartu, Kreutzwaldi 1

Annotatsioon

Antud artiklis antakse ülevaade mikrovetikatest potentsiaalse kütusetoorainena ning biokütuste tootmise tehnoloogiast.

Märksõnad: mikrovetikate kultiveerimine, vetikabiidiisel, vetikabioetanool.

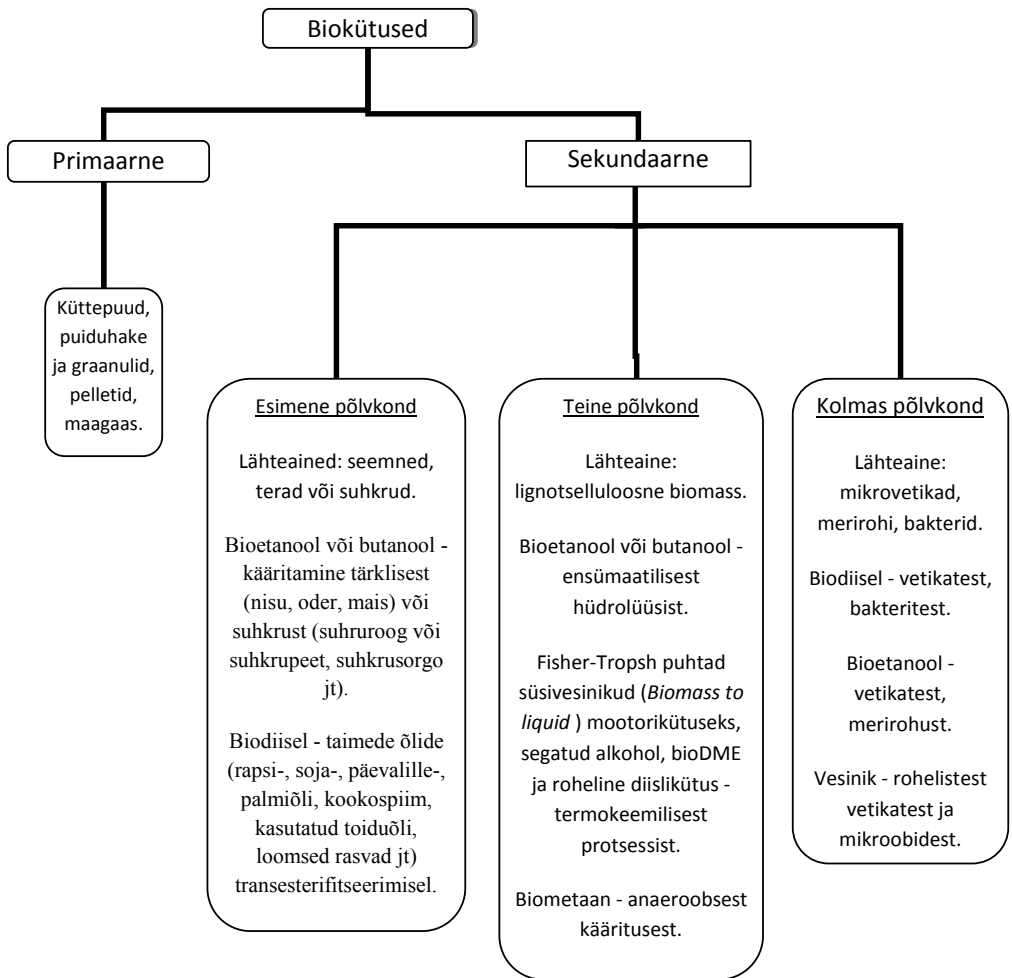
Sissejuhatus

Olemasolevate ressursside limiteerituse ja inimkonna energiavajaduse suurenemise tõttu on kasvanud ülemaailmne huvi taastuvate energiaallikate, sh biokütuste vastu. Arenenud ja kiiresti arenevate riikide eesmärgiks on vähendada sõltuvust naftast, vähendades samas ka süsinikdioksiidi (CO_2) ja metaani (CH_4) heitkoguseid. Mõlemaid eesmärgi saab rahuldada biokütuste kasutuselevõtmisega. See vastab paljude maade maaelu arengu eesmärkidele, sealhulgas ka Euroopa Liidu liikmesriikide eesmärgile. Euroopa Liidu kliima- ja energiapaketi taastuvenergia- alase osa peaesmärk on aastaks 2020 viia taastuvenergia osakaal energiatarbimisest 20%-ni (Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiiv 2009/28/EU 2009).

Biokütused on biomassist toodetavad orgaanilised kütused tahkes, vedelas või gaasilises olekus. Need jagatakse üldisemalt primaarseteks ja sekundaarseteks biokütusteks. Sekundaarsed biokütused jagatakse omakorda tooraine, töötlemistehnoloogiate ja tehnoloogiate arengutasemete järgi kolme põlvkonda (Nigam ja Singh 2011, Demirbas 2009a). Biokütuste klassifikatsioon on esitatud joonisel 1.

Vedelkütuse saamiseks on enim kasutatud nn energiakultuure – reeglina maapinnal kasvavaid õli- ja tärkliserikkaid taimi. Ent energiakultuuride konkureerimine toidupõlluga on sundinud otsima teisi alternatiive. Teise põlvkonna biokütuste puhul kasutatakse kütuste tootmiseks taimede lignotsellulooset biomassi. See tehnoloogia ei konkureeri küll toiduainete tootmisega, ent on hetkel suurtootmiseks rahaliselt kulukas (Brennan ja Owende 2010).

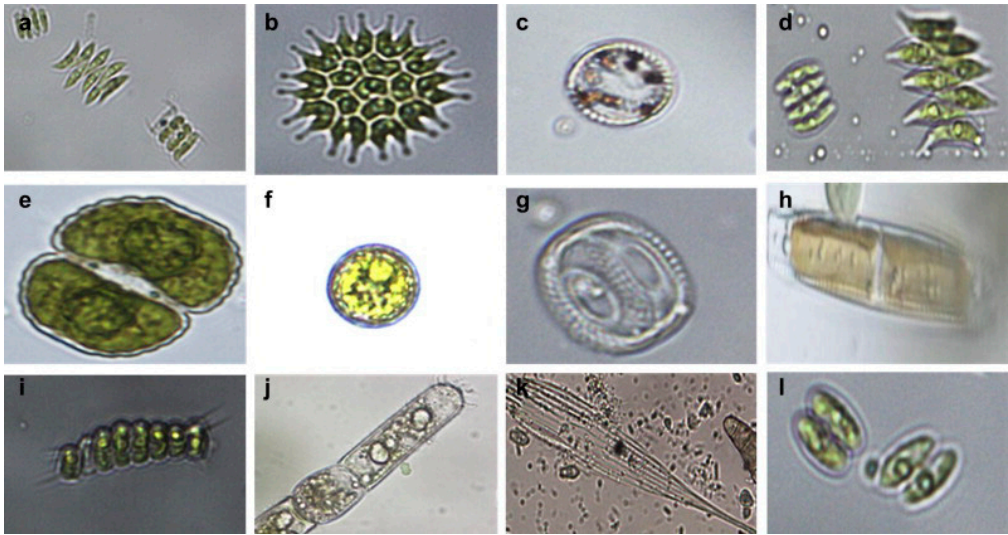
Kolmanda põlvkonna kütused saadakse mikrovetikatest. Antud töö eesmärgiks on kirjanduse varal välja tuua mikrovetikate kasutamise eelised biokütuste toormena ning anda lühike ülevaade biidiisli ja -etanooli tootmisprotsessist ja selleks kasutatavatest tehnoloogiatest.



Joonis 1. Biokütuste klassifitseerimine (Nigam & Singh 2011)
Figure 1. Classification of biofuels (Nigam & Singh 2011)

Mikrovetikad

Fototroopsed mikrovetikad on mikroskoopilised fotosünteesivõimelised organismid, mis toodavad elutegevuseks vajalikku orgaanikat anorgaanilisest ainest päikeseenergia abil (joonis 2). Vetikad võivad esineda üksikute rakkudena või kolooniates ning võivad moodustada hulkrakseid struktuure. Vetikaid leidub nii mage- kui merevees, lisaks mul- las ja muudes niisketes keskkondades maismaal.



Joonis 2. Mikrovetikate mitmekesisus: a) *Scenedesmus quadricauda*, b) *Pedisatrum boryanum*, c) *Cyclotella bodanica*, d) *Scenedesmus dimorphus*, e) *Cosmarium quadrifarium*, f) *Chlorella vulgaris*, g) *Centric diatom*, h) *Pinnate diatom*, i) *Scenedesmus obliquus*, j) *Oedogonium*, k) *Nageliella*, l) *Cosmarium depressum* (Devi jt 2012)

Figure 2. Microalgae diversity: a) *Scenedesmus quadricauda*, b) *Pedisatrum boryanum*, c) *Cyclotella bodanica*, d) *Scenedesmus dimorphus*, e) *Cosmarium quadrifarium*, f) *Chlorella vulgaris*, g) *Centric diatom*, h) *Pinnate diatom*, i) *Scenedesmus obliquus*, j) *Oedogonium*, k) *Nageliella*, l) *Cosmarium depressum* (Devi jt 2012)

1.1. Mikrovetikad biokütuste toorainena

Mikrovetikad võivad olla taastuvate vedelkütuste – biodiisli ja bioetanooli – jätkusuutlikuks toormaterjaliks (Mata jt 2010). Nende kasutamisel biokütuste tootmiseks on mitmeid eeliseid.

- Vetikad suudavad hinnanguliselt 2–10% päikeseenergiast konverteerida biomassiks, maismaataimede fotosünteesi efektiivsus jääb alla 1% (Cheng jt 2013). Seetõttu ületab mikrovetikate energeetiline potentsiaal 50–100 (200) korda õlikultuuride potentsiaali (raps, päevalill). 1 ha päevalille annab 0,8 tonni õli, raps annab 1 tonni, mikrovetikas *Chlorella* sp on aga võimeline tootma üle 79 tonni õli aastas (Demirbas 2009b, Chisti 2007).
- Mikrovetikad kasvavad maapealsetest taimedest 20–30 korda kiiremini, mis võimaldab pidevat saagikoristust (Demirbas 2009b, Chisti 2007).
- Mikrovetikad on mittesöödav biomass, mis ei avalda mõju toidukaupade julgeolekufaktorile (Demirbas 2009b, Chisti 2007).
- Mikrovetikate kultiveerimine ei vaja herbitsiidide ega pestitsiidide kasutamist (Brennan ja Owende 2010, Mata jt 2010, Um ja Kim 2009).

- Tugeva katte ja ligniini puudumine vetikate rakukestas teeb nende ümbertöötluste vedelateks kütusteks lihtsamaks, võrreldes nt teise põlvkonna biokütustega (Demirbas 2009b, Chisti 2007).
- Vetikaid on võimalik kasvatada soolases või heitvees, mis aitab kokku hoida magedat joogivett ning ühtlasi vähendada kultiveerimiskulusid. Lisaväärtusena on mikrovetikad võimalised heitvett oma elutegevuse käigus puhastama. Feng jt (2011) on näidanud, et 1 tonni vetikamassi tootmisel on võimalik käidelda rohkem kui 1400 m³ heitvett.
- Mikrovetikad seovad biomassi tootmiseks süsinikdioksiidi. Seda omadust saab ära kasutada korstnagaaside puhastamisel CO₂-st ja seeläbi süsihappegaasi heitkoguste vähendamisel.
- Vetikad on õlide, proteiini, süsivesinike, aga ka loodusliku gaasi jt energeetiliste produktide allikaks. Näiteks on vetikatest võimalik eraldada farmatseutiliseks otstarbeks karotenoide (eeskätt β-karotenoide), dokosaheksaeenhapet, mis on üheks asendamatuks rasvhappeks, ning tugevat antioksüdanti astaksantiini (Bahadar ja Bilal Khan 2013).

Vetikaid saab omavahel võrrelda proteiini, süsivesikute, rasvade ja nukleiinhapete sisalduse järgi. Olenevalt vetikaliigist võivad rakud sisaldada erineval hulgal biomolekule, kusjuures mõnede liikide massist võib õli moodustada 30–60% (Song jt 2013).

Mikrovetikad energiaallikana

2.1. Biodiiseli mikrovetikatest

Vetikate biomassis sisalduv õli võib oma omadustelt olla sobivaks taastuva biodiisli allikas (Song jt 2013). Vetikatest toodetud biodiislit saab tavalistes diiselmootorites kasutada tavadiisli lisandina, uuemates mootorites saab seda kasutada ka puhtal kujul. Mikrovetikate biodiislile nagu ka kõigile teistele rasvhappemetüülestritele kehtib diiselmootorite jaoks kehtestatud Euroopa Liidu Standard EN 14214, mis määrab selle omadused ning kasutamistingimused (Brennan & Owende 2010). Standard on võetud ka Eesti riigi standardiks (EVS – EN 14214 : 2012). Mikrovetikate biodiisli kompleksne töötlemisskeem hõlmab mikrovetikate kultiveerimist, vetikamassi eraldamist kasvukeskkonnast, lipiidide ekstraheerimist ja lõpuks biodiisli saamist, tavaliselt transesterifitseerimise teel (Sheelen jt 1998).

2.1.1. Mikrovetikate kasvatamine

Rakkude massikultiveerimisel tuleb lähtuda konkreetsete liikide ökoloogilistest nõudmistest. Olulisemateks teguriteks on ühtlase valgustatuse ja toitainetega varustatuse

tagamine. Lisaks on oluline ka valguse ja pimeduse vaheldumine, keskkonna temperatuur, pH jt parameetrid (Richmond 2007).

Biokütuste valmistamisel on oluliseks etapiks sobiva vetikaliigi või -liikide valik. Biomassi saamiseks biokütuste tootmise jaoks tuleb arvesse võtta vetikate spetsiifilist kasvukiirust, biomassi tootmise tõhusust, õli hulka rakkudes ning õli koostist ja omadusi. Toetudes nimetatud kriteeriumidele, leidsid Song jt (2013), et sobivaimad kandidaadid biokütuse tootmiseks on *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus obliquus*, *Phaeodactylum tricoratum* ja *Isochrysis sphaerica*. Kokkuvõtte erinevate mikrovetikaliikide koostisest, kasutusvõimalustest jm on esitatud tabelis 1.

Vetikate masskultiveerimiseks kasutatakse laias laastus kahte tüüpi süsteeme: avatud tiigid/basseinid või kinnised bioreaktorid. Avatud süsteemidest leiavad tööstuslikus mastaabis hetkel kõige laialdasemat kasutamist madalad (kuni 0,4 m) kunstlikud kasakaad-tiigid ja veerenni tüüpi basseinid (*running way / raceway*) mõõtmetes kuni 1000 ruutmeetrit. Avatud süsteemide eeliseks on nende ehitamise ja töõshoidmise suhteline odavus ja lihtsus. Produktseeritav biomass on aga paraku väiksem kui kinniste süsteemide puhul, samuti on avatud süsteemide puhul raskem reguleerida temperatuuri, aurustumist, CO₂ viibeaega vedelkultuuris jt parameetreid (Tredici jt 1994, Arudchelvam ja Nirmalakhandan 2013). Kõige olulisemaks miinuseks avatud süsteemide puhul on aga nende suur saastumisoht tulnukorganismidega, mis limiteerib oluliselt taolistes süsteemides monokultuuridena kasvatatavate vetikaliikide arvu (Borowitzka 1999, Molina jt 2001).

Avatud süsteemide piirangutest aitavad üle saada kinnised fotobioreaktorid, mille eeliseks on suur eripind, parem kontroll kasvutingimuste üle, võimalus kasvatada rohkem erinevaid vetikaliike ning pindalaühiku kohta ka oluliselt suurem biomassi produktsioon (Bahadar ja Bilal Khan 2013). Võrreldes lahtiste süsteemidega, on fotobioreaktorite produktiivsus hinnanguliselt 5 kuni 30 korda kõrgem (Schenk jt 2008). Kinniste fotobioreaktorite puudusteks on nende ehitamise ja töõshoidmise keerukus, suur maksumus ning ebapiisav energeetiline efektiivsus (Arudchelvam ja Nirmalakhandan 2013).

2.1.2. Biomassi eraldamine ja lipiidide ekstraheerimine

Biomassi eraldamiseks veekeskkonnast kasutatakse filtreerimist, tsentrifuugimist, flokulatsiooni või aglomeratsiooni. Konkreetse meetodi valik sõltub rakkude suurusest, kasutatavast liigist ning biomassi hulgast. Märg pastalaadne vetikamass enamasti kivistatakse, ent märjast massist on võimalik ka otse õli ekstraheerida (Bahadar ja Bilal Khan 2013). Lipiidide saamiseks on kasutusel mitmed meetodid, enam levinud on

Tabel 1. Biokütuse ja CO₂ sidumiseks enimkasutatavate liikide, nende karbohidraatide ja õli sisaldus, produktioon ning maksimaalne CO₂ ja temperatuuri talvus
Table 1. List of microalgae used for biofuel production and CO₂ sequestration, their carbohydrate and lipid content (% of dry weight), production yield (mg d/w L-1/day-1) and maximum CO₂ and temperature tolerance.

Liik/tüvi	Karbohidraadid (% kuivkaalust)	Lipiidid (% kuivkaalust)	Biomassi saagikus (mg(kuiv) L-1 päev-1)	Õli tootlikkus (mg L-1 päev-1)	CO₂ max taluvus (%)	Max temp taluvus (°C)	Viide
Botryococcus braunii	2	33*/29-75**			20		Um & Kim 2009, Sydney et al. 2010*/Bahadar & Bilal Khan 2013**
Chlorella vulgaris	12–17	10–22	104,76 */225,0**	6,91 / 7,96	18		Um & Kim 2009, Sydney et al. 2010, Yoo et al. 2010* / Song et al. 2013**
Chlorococcum littorale					70		Kumar et al. 2011
Cyanidium caldarium					100	60	Kumar et al. 2011
Dunaliella tertiolecta	14	11			15		Um & Kim 2009, Sydney et al. 2010
Eudorina spp					20	30	Um & Kim 2009; Sydney et al. 2010
Euglena gracilis		14–18	14–20		45		Um & Kim 2009, Sydney et al. 2010, Kumar et al. 2011
Isochrysis spaerica			255,56	8,69			Song et al. 2013
Monoraphidium minutum					13,6	25	Kumar et al. 2013
Phaedactylum truncatum			256,18	26,75	63		Song et al. 2013, Kumar et al. 2011
Scenedesmus obliquus	10–17	12–14	206,4	6,57			Um & Kim 2009, Sydney et al. 2010, Song et al. 2013
Scenedesmus sp			217,5	20,65	18-80	30	Yoo et al. 2010, Kumar et al. 2011
Selenastrum capricornutum			97,9	6,94			Song et al. 2013
Synechococcus elongatus					60	60	Kumar et al. 2011
Tetraselmis sp					14		Kumar et al. 2011

vedelik-vedelik ekstraktsoon mittepolaarsete orgaaniliste lahustitega, superkriitilises olekus vedelik-ekstraheerimine, mikrolaine- ja ultraheliekstraktsoon (Harun jt 2010, Kim jt 2013). Lisaks arendavad mitmed firmad teisi paljulubavaid ekstraktsoonimeetodeid, sh ensümaatilise hüdrolüüs (AerBio 2012), pulseeriva elektrivälja kasutamine (Diversified Technologies Inc. 2009), amfiifilsete lahustite kasutamine (Aurora Algae 2013), termaalne depolümeerisatsioon (New Oil Resources 2013) ning kõrgsageduslik kiirgusmeetod õli eraldamiseks elusatest rakkudest (Originoil 2013).

2.1.3. Lipiidide transesterifitseerimine

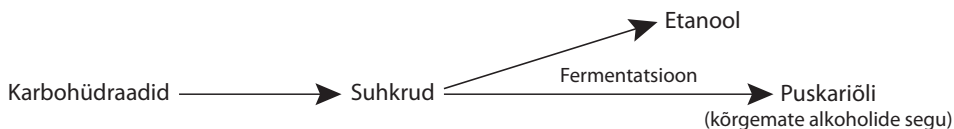
Kuna eraldatud õli pole oma viskoossuse ja põlemisomaduste tõttu diislikütusena otsest kasutatav, tuleb õlist biodiisli saamiseks läbi viia transesterifitseerimine. Transesterifitseerimise reaktsioon põhineb triglütseriidide transformeerumisel rasvhapete alküülestriteks alkoholi, nagu metanool või etanool, ning katalüsaatori, leelise või happe juuresolekul. Kõrvalproduktina tekib seejuures glütserool (Vasudevan ja Briggs 2008). Transesterifitseerimiseks kasutatakse erinevaid meetodeid, näiteks transesterifitseerimine õlide ja rasvade vedeldamise kaudu, superkriitilise metanooli kasutamine (Bahadar ja Bilal Khan 2013), *in situ* transesterifitseerimine (Georgogianni jt 2008, Shuit jt 2010, Haas ja Wagner 2011), ensümaatilise transesterifitseerimine (Kim jt 2007).

Kuna vetikaõli võib sisaldada võrreldes taimeõlidega rohkem polüküllastamata rasvhappeid, on nende oksüdatsiooniline stabiilsus madal. Vetikaõli küllastatakse vesinikuga katalüütilise hüdrogeenimise teel, kui rasvhapped sisaldavad nelja või enamat kaksiksidet. See on sisuliselt sama tehnoloogia, mida kasutatakse taimeõlidest margariinide valmistamiseks (Chisti 2007).

2.2. Bioetanool vetikatest

Pärast õli eraldamist jääb vetikamassi arvestataval hulgal süsivesikuid, mida on võimalik fermenteerida bioetanooliks. Vetikate jääkmassi töödeldakse tärklisist lõhustavate ensüümidega, amülaasidega, et hüdrolüüsida tärklisist lihtsuhkruteks, mida saab etanooliks fermenteerida (Oilgae 2013). Suhkrute fermenteerimisel saadud bioetanool eraldatakse, kasutades tavapäraselt destillatsioonitehnoloogiat. Karbohüdraatidest bioetanooli tööstusliku tootmise skeem on toodud joonisel 3.

Vetikapõhisele bioetanoolilisandile kehtib sama standard, mis tavalisele etanoolikütusele. Modifitseeritud mootoritega sõidukites on lubatud kasutada etanoolkütust E85 (85 mahuprotsenti bioetanooli ja 15% autobensiini) ning selle kasutamine on määratud standardiga EVS – EN 15938 : 2010.



Joonis 3. Etanooli tootmisprotsessi üldistatud skeem (Ullmann 1990b)

Figure 3. General diagram of ethanol production (Ullmann 1990b)

2.3. Biogaas mikrovetikatest

Biogaasi saamine vetikatest on bioetanooli tootmise kõrval üheks perspektiivikamaks biokütuste saamise võimaluseks. Biogaasi on võimalik saada jääkbiomassist, mis tekib vetikatest diisli ja/või etanooli tootmisel. Seda toodetakse metanogeensete bakterite abil anaeroobsetes tingimustes. Biogaas sisaldab 55–70% metaani ja 30–40% CO₂. Biogaasi saab kasutada näiteks kütuselemendi (*fuel cell*) kütusena. Biogaasistamisest allesjääv orgaanika on kõrge fosfori- ja lämmastikusisaldusega, mistõttu on võimalik selle kasutamine väetisena.

Kokkuvõte

Mikrovetikate biomassist on võimalik toota biodiislit ning bioetanooli, lisaks uuritakse biogaasi saamise võimalusi. Biodiisli ja -etanooli tootmine tööstuslikult on hetkel raskendatud: lahtistes tiikides või basseinides on võimalik kasvatada vaid üksikuid liike, samas kui kinniste fotobioreaktorite ehitamine tööstuslikult on kallid. Kulude vähendamiseks oleks mõistlik ühendada mitmeid tehnoloogiaid ning võtta eesmärgiks jääkidevaba tootmine. Näiteks saaks masskultiveerimisel kasutada toitainete allikana heitvett ning ühendada protsess süsinikdioksiidi sidumisega; vetikamassist saaks toota biodiislit ning -etanooli, jääkmassi saaks ära kasutada biogaasi tootmiseks või muudel eesmärkidel. Selline tsükliline tootmine vajab edasist uurimist ning plaanimist, individuaalseid tehnoloogiaid on samuti tarvis täiustada ja optimeerida, et muuta tootmisprotsess võimalikult tõhusaks.

Kasutatud kirjandus

AirBio 2012. <http://www.aer-bio.com/>.

Arudchelvam, Y., Nirmalakhandan, M. 2013. Energetic optimization of microalgal cultivation in photobioreactors for biodiesel production. – *Renewable Energy* 56, 77–84.

Aurora Algae 2013. <http://www.aurorainc.com/>.

Bahadar, A. & Bilal Khan, M. 2013. Progress in energy from microalgae: A review. – *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 128–148.

Borowitzka, M. A. 1999. Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters. – *Journal of Biotechnology* 70, 313–321.

- Brennan, L., Owende, P. 2010. Biofuels from microalga. A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and coproducts. – *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 557–577.
- Cheng, J., Yu, T., Li, T., Zhou, J., Cen, K. 2013. Using wet microalgae for direct biodiesel production via microwave irradiation. – *Bioresource Technology*, 131, 531–535.
- Chisti, Y. 2007. Biodiesel from microalgae. – *Biotechnol. Adv.*, 25, 294–306.
- Demirbas A. 2009a. Political, economic and environmental impacts of biofuels: a review. – *Appl. Energy* 86:S; 108–117.
- Demirbas, A. 2009b. *Biohydrogen: For Future Engine Fuel Demands. In Chapter 3. – Biofuels, p. 61–84. Springer Verlag.*
- Devi, M. P., Subhash, G. V., Mohan, S. V. 2012. Heterotrophic cultivation of mixed microalgae for lipid accumulation and wastewater treatment during sequential growth and starvation phases: Effect of nutrient supplementation. – *Renewable Energy*, 43, 276–283.
- Diversified Technologies Inc. 2009. <http://www.divtecs.com/>.
- Eesti Energia keskkonnaaruanne 2009/2010. https://www.energia.ee/c/document_library/get_file?uuid=bb250184-08c8-43f0-8eca-f429fca63656&groupId=10187.
- Euroopa Parlamendi direktiivi 2003/30/EC. Biokütuste ja muude taastuvkütuste kasutamise edendamise transpordisektoris) artikli 2 lõike 2 alusel. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=DD:13:31:32003L0030:ET:PDF>.
- EL KOMISJONI TEATIS 2012. Euroopa Liidu Teataja. Suunised, mis käsitlevad teatavaid riigiabimeetmeid kasvuhoonegaaside saastekvootidega kauplemise süsteemis pärast 2012. aastat. <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:C:2012:158:0004:002%202:ET:PDF>.
- EVS–EN 228:2012. Mootorikütused. Pliivaba mootoribensiin. Nõuded ja katsemeetodid.
- EVS–EN 14214: 2012. Vedelad naftasaadused. Rasvhapete metüülestrid (FAME) diiselmootoritele või kütteseadmetele. Nõuded ja katsemeetodid.
- EVS–EN 15938:2010. Automotive fuels – Ethanol blending component and ethanol (E85) fuel - Determination of electrical conductivity.
- EUROOPA PARLAMENDI JA NÕUKOGU DIREKTIIV 2009/28/EÜ 23. aprill 2009 taastuvatest energiaallikatest toodetud energia kasutamise edendamise kohta. <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:et:PDF>.
- Falkowski, P. G. 1994. The role of phytoplankton photosynthesis in global biogeochemical cycles. – *Photosynthesis Research*, 39(3), 235–258.

- Feng, Y., Li, C., Zhang, D. 2011. Lipid production of *Chlorella vulgaris* cultured in artificial wastewater medium. – *Bioresource Technology* 102, 101-105.
- Georgogianni, K. G.; Kontominas, M. G., Pomonis, P., J., Avlonitis, D., Gergis, V. 2008. Conventional and in situ transesterification of sunflower seed oil for the production of biodiesel. – *Fuel Process. Technol.*, 89, 503–509.
- Harun, R., Singh M., Forde, G. M., Danquah, M. K. 2010. Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products. – *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 1037–1047.
- Kim, S. J., Jung, S. M., Park, Y. S., Park, K. 2007. Lipase catalyzed transesterification of soybean oil using ethyl acetate, an alternative acyl acceptor. – *Biotechnol. Bioproc. Eng.* 12(4), 441–445.
- Kim, Y.-H., Park, S., Kim, M. H., Choi, Y.-K., Yang, Y.-H., Kim, H. J, Kim, H., Kim, H.-S., Song, K.-G., Lee, S. H. 2013. Ultrasound-assisted extraction of lipids from *Chlorella vulgaris* using [Bmim][MeSO₄]. – *Biomass and Bioenergy*, 56, 99–103.
- Kumar, K., Dasgupta, C. N., Nayak, B., Lindblad, P., Das, D. 2011. Development of suitable photobioreactors for CO₂ sequestration addressing global warming using green algae and cyanobacteria. – *Bioresource Technology*, 102, 4945–4953.
- Maeda K., Owada M., Kimura N., Karube I. 1995. CO₂ fixation from the flue gas on coal-fired thermal power plant by microalgae - *Energy Conversion Management*, 36, 717–720.
- Mata, T. M., Martins, A. A., Caetano, N. S. 2010. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. – *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 217–232.
- Molina, E., Fernandez, Acien, F. G., Chisti, Y. 2001. Tubular photobioreactor design for algal cultures. – *Journal of Biotechnology* 92, 113–131.
- New Oil Resources 2013. <http://newoilresources.com>.
- Nigam, P. S., Singh, A., 2011. Production of liquid biofuels from renewable Resources. - *Progress in Energy and Combustion Science*, 37(1), 52–68.
- Oilgae 2013. Ethanol from algae. <http://www.oilgae.com/algae/pro/eth/eth.html>.
- Ono, E., Cuello, J. L. 2009. Mini Review: Selection of Optimal Microalgae Species for CO₂ Sequestration. Departemen of Agricultural and Biosystem Engineering, USA.
- OriginOil 2013. <http://www.originoil.com>.
- Richmond, A. *Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology*. Blackwell Publishing, Blackwell Science Ltd, 2007.
- Sheelen, J., Camobreco, V., Duffield, J., Grabovski, M., Shapouri, H. 1998. Life-cycle inventory of biodiesel and petroleum diesel for use in an urban bus. Report: NREL/SR-580-24089. <http://www.ott.doe.gov/biofuels/lifecycle.pdf.html>.

- Schenk, P. M., Thomas-Hall, S. R., Stephens E., Marx, U., Mussgnug, J. H., Posten C., Kruse, O., Hankamer, B. 2008. Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production – *BioEnergy Research*, 1, 20–43.
- Shuit, S. H., Lee, K. T., Kamaruddin, A. H., Yusup, S. 2010. Reactive extraction and in situ esterification of *Jathropha curcas*. *Fuel*, 89, 527–530.
- Song, M., Pei, H., Hu, W., Ma, G. 2013. Evaluation of the potential of 10 microalgal strains for biodiesel production. – *Bioresource Technology*, 141, 245–251.
- Sudhakar, K., Suresh, S., Premalatha, M. 2011. An overview of CO₂ mitigation using algae cultivation technology. – *International Journal of Chemical Research* 3(3), 110–117.
- Tredici M., Biagiolini, S., Chini Zittel, G., Montaini E., Favilli F., Mannelli, D., Matarassi R. 1994. Fully-controllable, high surface-to-volume ratio photobioreactors for the production of specialty chemicals from oxygenic phototrophs. – *Proc. 6th European Congress on Biotechnology*, Elsevier Science, 1011–1016.
- Ullmann's Encyclopedia Of Industrial Chemistry*. 1990b, A9, 589.
- Um, B.-H., Kim, Y.-S. 2009. Review: A chance for Korea to advance algal biodiesel technology. – *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 15, 1–7.
- Vasudevan, P. & Briggs, M. 2008. Biodiesel production-current state of the art and challenges. – *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 35, 421–430.
- Yoo, C., Jun, S.-Y., Lee, J.-Y., Ahn, C.-Y., Oh, H.-M. 2010. Selection of microalgae for lipid production under high levels carbon dioxide. – *Bioresource Tehcnology*, 101, S71–S74.

MICROALGAE AS A SOURCE OF RENEWABLE ENERGY

K. Ritslaid, L. Podkuiko, J. Olt, T. Kikas

Microalgal biomass can be used to produce sustainable biofuels – biodiesel, bioethanol and biogas. The production of these are however constrained on an industrial scale because of technical and economic limitations. In order to reduce production costs, several technologies such as flue gas and wastewater usage for cultivation should be incorporated to achieve a wasteless production. Such a cyclic approach need careful planning, research and optimization.

TOITELAHUSESSE SUITSUGAASI SEKVESTEERIMISEST TINGITUD PH-MUUTUSE PÕLEVKIVITUHAGA KORRIGEERIMISE MÕJU MIKROVETIKATE KASVULE

L. Podkuiko, K. Ritslaid, J. Olt, T. Kikas

Eesti Maaülikooli Tehnikainstituut, 51014 Tartu, Kreutzwaldi 1

Annotatsioon

Antud artiklis käsitletakse lühidalt mikrovetikate kasutamise võimalikkust suitsugaasi puhastamiseks süsinikdioksiidist, eesmärgiga vähendada selle heitmete hulka atmosfääris. Põlevkivienergeetikast pärinev suitsugaas on suhteliselt kõrge väävlisisaldusega, mis vette seotuna põhjustab vee pH langemist. Artiklis kajastatakse lühidalt katsete tulemusi, milles pH langust korrigeeriti põlevkivituha leoveega, et hinnata tekkinud neutraalse lahuse sobivust vetikate kasvukeskkonnaks. Läbiviidud katsed on esimeseks etapiks, et selgitada välja vetikate kasutamise võimalikkus põlevkivienergeetikas tekki-va suitsugaasi CO₂ sidumiseks.

Märksõnad: mikrovetikad, suitsugaas, põlevkivituhk, CO₂ bioloogiline sidumine.

Sissejuhatus

Süsinikdioksiidi sattumist atmosfääri peetakse üheks peamiseks globaalset kliimasoojenemist ning ookeanide hapestumist põhjustavaks teguriks. CO₂ kontsentratsioon atmosfääris on alates industriaalaja algusest 19. sajandil peamiselt antropogeensete heitmete tagajärjel kasvanud umbes 280 ppm-lt 396 ppm-ni käesoleval aastal (Dlugokencky ja Tans 2014). Enamik süsinikdioksiidi emissioonidest pärineb elektritootmisest, transportidist ja tööstusest. Seetõttu on atmosfäärisüsinikuga seotud globaalprobleemide leevendamiseks vajalik nii fossiilsete kütuste kasutamise vähendamine ja asendamine keskkonnasõbralike alternatiivkütustega kui ka fossiilsete kütuste põletamisest pärineva süsihappegaasi fikseerimine ning seeläbi emissioonide vähendamine.

Süsinikdioksiidi fikseerimiseks eksisteerib mitmeid füüsikalisi ja keemilisi meetodeid, nagu keemiline absorptsioon, sügavjahutamine jt, ent paljud neist meetodeist on suure energiatarbimise, mahuka või keeruka aparatuuri ja raskelt utiliseeritavate produktide tõttu majanduslikult mitteotstarbekad (Zhao jt 2014, Kumar jt 2011). Alternatiiviks on bioloogiline fikseerimine maismaataimede või mikrovetikate poolt, mille puhul seotakse CO₂ fotosünteesi käigus orgaanilise aine koosseisu. Mikrovetikad on põhiliselt vesikeskkonnas elavad ainuraksed organismid, mis võrreldes taimedega omavad suuremat fotosünteesi efektiivsust ning kiiremat kasvu (Kumar jt 2014, Chiu jt 2011). Samuti ei vaja vetikad kasvamiseks viljakat pinnast ning nende biomassi on võrdlemisi lihtne

töödelda erinevateks produktideks, sh kütuseks (biodiisel, bioetanool, biogaas) (Chisti 2007). Eksperimentaalselt on näidatud, et 1 g vetikabiomassi tootmisel seotakse ligikaudu 1,8 g CO₂, mis tähendab, et 100 t biomassi tootmiseks tarbiksivad vetikad 180 t CO₂ (Sudhakar et al. 2011).

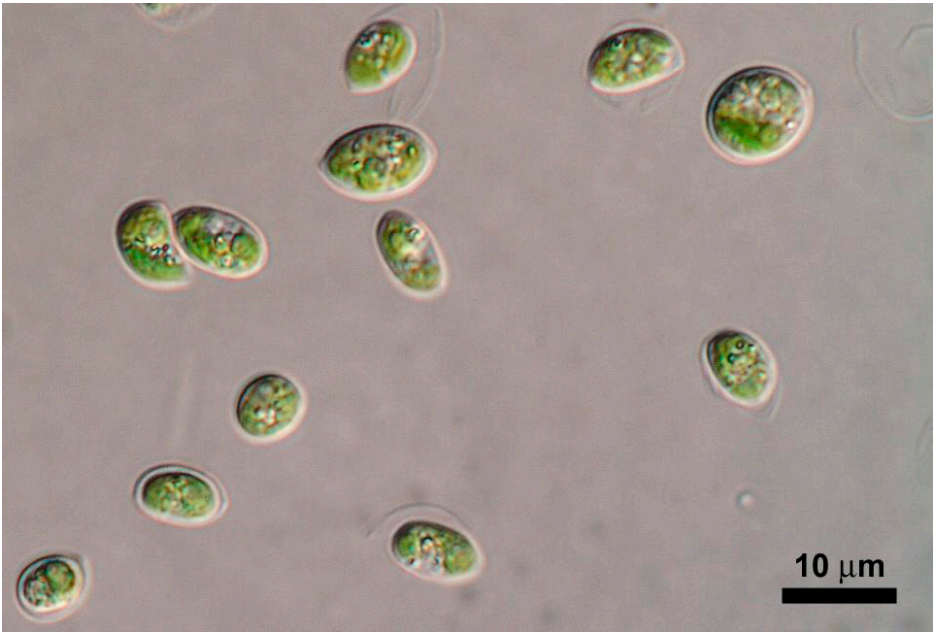
Eestis on põhiliseks süsinikdioksiidi emiteerijaks põlevkivienergeetika ja -tööstus. Põlevkivil töötavate Narva elektrijaamade CO₂ heide oli 2010. aastal 9,1 megatonni (Eesti Energia keskkonnanaruanne 2009/2010). Kasutades seda süsinikdioksiidi mikrovetikate kasvatamiseks, oleks teoreetiliselt võimalik toota kuni 50 000 tonni vetikabiomassi. Eestis ja ka mujal oleks võimalik CO₂ fikseerimiseks ja biokütuste tootmiseks vajaliku tehnoloogia kasutuselevõtmise algetappide jaoks saada rahalised vahendid näiteks CO₂ kvootide reguleerimisest (EL Komisjoni teatis 2012).

Mikrovetikate kasutamine suitsugaasi puhastamiseks

Energiasektorist pärineva suitsugaasi koostises on sõltuvalt kütuse iseloomust ja põletamistehnoloogiast 3-25% CO₂, tüüpiliselt 10-12% (Chiu jt 2011, Ronda jt 2014). Lisaks sisaldab suitsugaas mitmeid lisandgaase, nagu NO_x ja SO_x, H₂S, CO jt, raskmetalle, halogeene ning tahkeid osakesi (tahma) (Van Den Hende jt 2012). Mitmed vetikaliigid, nt vetikad perekonnast *Anacystis*, *Botryococcus*, *Chlamydomonas*, *Chlorella*, *Emiliania*, *Monoraphidium*, *Scenedesmus*, *Synechococcus*, *Tetraselmis*, *Nannochloropsis* jt on võimelised kasvama kõrge, ~15% CO₂ kontsentratsiooni juures (Radmann jt 2011). On kirjeldatud ka väga kõrge CO₂ kontsentratsiooni juures kasvavaid liike, nt *Chlorella sp* on võimeline kasvama kuni 40% CO₂ juures, *Scenedesmus sp* 80% (joonis 1) ja *Cyanidium caldarium* koguni 100% CO₂ kontsentratsiooni juures (Ono ja Cuello 2003). Mikrovetikad kasutavad vees lahustunud CO₂ orgaanilise aine assimileerimisel peamiselt süsinikuallikana, mis võimaldaks suitsugaasis sisalduva süsihappegaasi sidumisel biomassi atmosfääri paiskamise asemel süsinikdioksiidi taaskasutada.

Suitsugaasi kasutamisel on mõned kitsaskohad. Lisaks süsinikule mõjutab mikrofüütide kasvu ja produktiivsust rida tegureid, nagu toitainete kontsentratsioon, valgustus, kultiveerimistingimused (kas kasvatatakse lahtistes basseinides või kinnistes fotobioreaktories), kasvukeskkonna pH, temperatuur jt.

Suitsugaas omab reeglina kõrget temperatuuri, ligi 120^o (Kumar jt 2011), mis on enamiku vetikate jaoks liialt kõrge. Samuti väheneb temperatuuri tõustes CO₂ lahustuvus vees. Seetõttu on vajalik suitsugaasi eelnev jahutamine (nt juhtides läbi veekoloni või seades sisse soojusvahetussüsteemi).



Joonis 1. *Scenedesmus obliquus* (Culture Collection of Autotrophic Organisms 2014)
 Figure 1. *Scenedesmus obliquus* (Culture Collection of Autotrophic Organisms 2014)

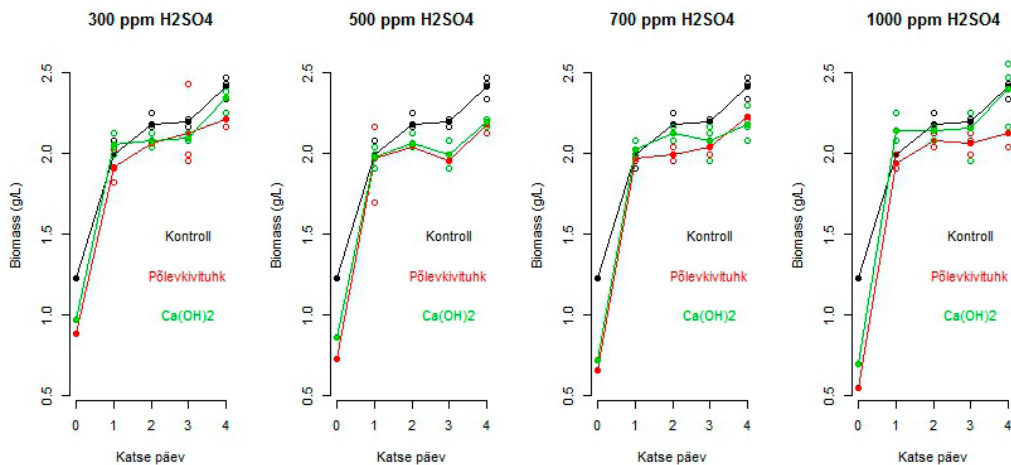
Suitsugaasis sisaldub lisaks kõrgele süsinikdioksiidi hulgale NO_x - ja SO_x -ühendeid, mis põhjustavad vetikate kasvukeskkonna pH langust ning mõjutavad CO_2 - HCO_3^- - tasakaalu toitelahuses (Ronda jt 2014). CO_2 ja HCO_3^- on põhilised vetikate poolt omastatavad süsinikuvormid. Ehkki mõnede vetikaliikide jaoks on SO_2 otseselt toksiline, mõjutades CO_2 fikseerimist fotosünteesis ning blokeerides mõnede ainete membraantransporti (Van Den Hende jt 2012), peetakse SO_x -ühendite peamiseks inhibeerivaks toimeks siiski pH alanemist (Zhao ja Su 2014). Nimetatud ühendite inhibeeriva toime vähendamiseks ja pH hoidmiseks 6–7 ringis on kasutatud CaCO_3 ja NaOH lisamist (Kumar jt 2014).

Põlevkivi põletamisel tekkiv suitsugaas sisaldab ligikaudu 12–14% CO_2 ning ~550 ppm SO_2 (isiklik kommunikatsioon). Põlemisjäätina tekkiv põlevkivituhk on tugevalt aluseline ning kokkupuutes veega tõstab selle pH-d 12–13-ni (Prikk 2004). Selline vesi sobiks suitsugaasi põhjustatud pH languse odavaks neutraliseerimiseks. Põlevkivi sisaldab mitmeid mineraale ning keemilisi elemente, nagu Ca, Fe, K, Mg jt (Häsänen jt 1997), mis on vajalikud toitained vetikate kasvuks. Teiselt poolt sisaldab põlevkivituhk raskmetalle ning polüaromaatseid süsivesinikke, mis võivad oluliselt inhibeerida vetikate kasvu ja produktiivsust.

Meie uurimisrühma poolt läbiviidud laboratoorsete katsete põhjal, mille puhul alandati vetikate toitekeskkonna pH-d väävelhappega ning neutraliseeriti kas kaltsiumhüdrosiidiga ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) või põlevkivituhaga leoveega, võib siiski oletada, et põlevkivituhk ei oma olulist inhibeerivat mõju vetikate kasvule (joonis 2). Tulemustest nähtub, et biomassi juurdekasv päeva kohta järgib põlevkivituhaga proovi puhul samalaadset tõusu kui kontrolli puhul, milleks on töötlemata vetikasööde. Samuti võib väita, et pH-d korrigeerides ei oma lisatava väävli kontsentratsioon olulist mõju biomassi produktsioonile, mis lubab eeldada meetodi rakendamise võimalikkust ka väga kõrge väävlisisaldusega suitsugaasi puhul. Katsetes kasutatud vetikaliik *Scenedesmus obliquus* talub kõrget CO_2 kontsentratsiooni, mistõttu omab see liik suurt potentsiaali suitsugaasi puhastamises süsinikdioksiidist.

Kuna põlevkivituhk on põlevkivienergeetika jäätmena lihtsasti kättesaadav ressurss, omab selle kasutamine eelist muude pH korrigeerimiseks kasutatavate ühendite (CaCO_3 , NaOH , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ jt) ees, kuna sel on madal maksumus. Lisaks aitaks põlevkivituhaga kasutamine vähendada selle jäätme aluselisust väikesel skaalal.

Mikrofüütide biomassi kasvatamine, kasutades selleks põlevkivienergeetikast pärinevat suitsugaasi, teeniks kahte eesmärki: vetikate biomassist saadav biokütus aitaks vähen-



Joonis 2. Katsed mikrovetikaga *Scenedesmus obliquus*, mille puhul lisati vetikate kasvukeskkonda erinevas kontsentratsioonis väävelhappet, jälgendamaks suitsugaasi väävelühenditest põhjustatud pH langust, ning neutraliseeriti kas põlevkivituhaga ($\text{pH} \sim 12,1$) või kaltsiumhüdrosiidiga ($\text{pH} \sim 12,3$)

Figure 2. Experiment results of growing *S. obliquus* in media, to which different concentrations of sulphuric acid was added to imitate the pH decrease caused by sulphur compounds present in flue gas, and neutralized with oil shale ash ($\text{pH} \sim 12,1$) or calcium hydroxide ($\text{pH} \sim 12,3$)

dada fossiilsete kütuste kasutamist ning suitsugaasi puhastamine CO₂-st aitaks vähendada selle kasvuhoonegaasi emissioonidega seotud globaalprobleeme. Suitsugaasi ning põlevkivituhha kasutamine pH neutraliseerimiseks aitaks vähendada vetikate masskultiveerimise kulusid, mis omakorda muudaks vetikamassist toodetud biokütuse hinna konkurentsivõimeliseks. Kultiveerimiskulude minimaliseerimiseks tuleks rakendada teisigi biotehnoloogilisi võtteid, nagu heitvee kasutamine mikrovetikate toitelahusena. Heitvesi sisaldab suures koguses fosforit ja lämmastikku, mis on vetikate toitumises põhilised toitained. Lisaväärtusena tõhustaks see heitvee bioloogilist puhastust nimetatud ainetest, viies ühtlasi alla ka kulutused veepuhastusele. Peamiseks küsimuseks ja uurimissuunaks on selle kontseptsiooni reaalne rakendamine, mis nõuab aga antud tehnoloogiate ühendamist, protsessi mõistmist ja tõhustamist, majanduslikku ja energeetilist optimeerimist jne. Kuid eesmärgi saavutamisel omaks antud projekt suurt tähtsust Eesti energeetikas.

Kokkuvõte

Põlevkivienergeetika on kõige suurem süsinikdioksiidi emiteerija Eestis. Emissioonide ning fossiilsete kütuste osakaalu vähendamiseks on võimalik rakendada süsihappegaasi bioloogilist fikseerimist mikrovetikate abil, kuna saadud vetikate biomassist on võimalik toota biokütuseid. Põlevkivi põletamisel eralduv suitsugaas sisaldab lämmastik- ja väävelühendeid, mis põhjustavad veekeskkonnas pH alanemist ja muudavad seega keskkonna vetikate kasvuks ebasobilikuks. Katseliselt on aga näidatud, et seda saab vältida, kasutades pH korrigeerimiseks põlevkivituhka. Suitsugaasi kasutamise kombineerimine heitvee kasutamisega aitaks muuta mikrovetikate biomassist toodetavate biokütuste hinna konkurentsivõimeliseks, täites ka ülalnimetatud eemärke. Seetõttu on mikrovetikate kasutamine antud eesmärkide saavutamiseks suurt potentsiaali omav uurimisvaldkond.

Kasutatud kirjandus

- Chisti, Y. 2007. Biodiesel from microalgae. – *Biotechnol. Adv.*, 25, 294–306.
- Chiu, S.-Y., Kao, C.-Y., Huang, T.-H., Lin, C.-J., Ong, S.-C., Chen, C.-D., Chang, J.-S., Lin, C.-S. 2011. Microalgal biomass production and on-site bioremediation of carbon dioxide, nitrogen oxide and sulphur dioxide from flue gas using *Chlorella* sp. cultures. – *Bioresource Technology*, 102, 9135–9142.
- Culture Collection of Autotrophic Organisms. <http://ccala.butbn.cas.cz/en/scenedesmus-obliquus-turpin-kuetzing> (24.09.2014).
- Ed Dlugokencky and Pieter Tans, NOAA/ESRL. www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/, (23.09.2014).

- Eesti Energia keskkonnaaruanne 2009/2010. https://www.energia.ee/c/document_library/get_file?uuid=bb250184-08c8-43f0-8eca-f429fca63656&groupId=10187.
- EL KOMISJONI TEATIS. 2012. Euroopa Liidu Teataja. Suunised, mis käsitlevad teatavaid riigiabimeetmeid kasvuhoonegaaside saastekvootidega kauplemise süsteemis pärast 2012. aastat. <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:C:2012:158:0004:002%20:ET:PDF>.
- Häsänen, E., Aunela-Tapola, L., Kinnunen, V., Larjava, K., Mehtonen, A., Salmikangas, T., Leskelä, J., Loosaar, J. 1997. Emission factors and annual emissions of bulk and trace elements from oil shale fueled power plants. – *The Science of the Total Environment*, 198, 1–12.
- Kumar, K., Dasgupta, C. N., Nayak, B., Lindblad, P., Das, D. 2011. Development of suitable photobioreactors for CO₂ sequestration addressing global warming using green algae and cyanobacteria. – *Bioresource Technology*, 102, 4945–4953.
- Kumar, K., Banerjee, D., Das, D. 2014. Carbon dioxide sequestration from industrial flue gas by *Chlorella sorokiniana*. – *Bioresource Technology*, 152, 225–233.
- Ono, E., Cuello, J. L. 2003. Selection of optimal microalgal species for CO₂ sequestration.
- Prikk, A. Põlevkivituhk – teke, mõju keskkonnale ja kasutamine. Aruanne, Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn 2004.
- Randmann, E. M., Camerini, F. V., Santos, T. D., Costa, J. A. V. 2011. Isolation and application of SO_x and NO_x resistant microalgae in biofixation of CO₂ from thermoelectricity plants. – *Energy conversion and Management*, 52, 3132–3136.
- Ronda, R. S., Kethineni, C., Parupudi, L. C. P., Thunuguntla, V. B. S. C., Vemula, S., Settaluri, V. S., Allu, P. R., Grande, S. K., Sharma, S., Kandala, C. V. 2014. A growth inhibitory model with SO_x influenced effective growth rate for estimation of algal biomass concentration under flue gas atmosphere. – *Bioresource Technology*, 152, 283–291.
- Sudhakar, K., Suresh, S., Premalatha, M. 2011. An overview of CO₂ mitigation using algae cultivation technology. – *International Journal of Chemical Research*, 3(3), 110–117.
- Van Den Hende, S., Vervaeren, H., Boon, N. 2012. Flue gas compounds and microalgae: (Bio-) chemical interactions leading to biotechnological opportunities. – *Biotechnology Advances*, 30, 1405–1424.
- Zhao, B., Su, Y. 2014. Process effect of microalgal-carbon dioxide fixation and biomass production: A review. – *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 121–132.

**THE EFFECTS OF USING OIL SHALE ASH FOR BALANCING
CHANGES IN PH RESULTING FROM FLUE GAS SEQUESTRATION ON
MICROALGAL GROWTH**

L. Podkuiko, K. Ritslaid, J. Olt, T. Kikas

In Estonia the oil shale industry is the largest polluter of the atmosphere with CO₂. In order to abate emissions as well as reduce the usage of fossil fuels, biofixation of CO₂ via microalgae can be applied. The biomass produced in the process can be used to produce biofuels. The flue gas from the oil shale combustion contains nitrogen and sulphur compounds, which cause a drop in pH, making it unsuitable for algal growth. However, alkaline oil shale ash can be used to neutralize the pH. Oil shale ash is an abundant waste-product of the oil industry and its usage for pH correction is an additional alternative for utilizing this waste. The application of flue gas as a CO₂ source for cultivating algae and using oil shale ash has the potential to lower the cost of biofuels derived from the harvested biomass. Further cost reductions could be achieved by combining the latter methods with wastewater usage, as it is rich in N and P, which are important nutrients for algal nutrition. Therefore further studies should be conducted on the biotechnological application of microalgae in Estonia.

MIKROVETIKA *CHLORELLA VULGARIS BEYERINCK* KASVATAMINE CO₂ BIOLOOGILISE SIDUMISE EESMÄRGIL

K. Ritslaid¹, L. Podkuiko¹, H. Heitur², J. Olt¹

¹Eesti Maaülikooli Tehnikainstituut, 51014 Tartu, Kreutzwaldi 1

²Eesti Maaülikooli Metsandus- ja Maehitusinstituut, 51014 Tartu, Kreutzwaldi 5

Annotatsioon

Antud artiklis kirjeldatakse mikrovetika *Chlorella vulgaris Beyerinck* kasvatamist laboratoorsetes tingimustes fotobioreaktoris Lambda Minifor, eesmärgiks oli uurida CO₂ sidumise võimalust bioloogilisel teel.

Märksõnad: mikrovetikas, CO₂ bioloogiline sidumine, suitsugaas.

Sissejuhatus

Euroopa Liidu kliimapoliitika üks eesmärkidest on olnud vähendada kasvuhuonegaaside emissioone. Uue kliima- ja energiapaketi valguses võib väita, et CO₂ vähendamine on endiselt aktuaalne teema, mis mõjutab suuresti energeetika sektorit, aga ka teadust laiemalt. Alates 2009. a on mitmetes maades pooltööstuslikus mastaabis uuritud CO₂ utiliseerimist mikrovetikate abil (Kada 2001, Doucha et al. 2005, Трифонов 2009, Godos 2013). Selle on tinginud asjaolu, et mikrovetikad kasvavad 6–10 korda kiiremini kui enamik maa peal kasvavaid taimi, mistõttu on ka nendepoolne biomassi seotav CO₂ kogus palju kõrgem (Mata 2010, Brennan ja Owende 2010). Eestile iseloomulik põlevkivienergeetika on põhiline kohalik CO₂ emiteerija. Narva elektrijaamade CO₂ heide oli 2011. aastal 11,0 mln tonni, aga 2012. aastal juba 13,4 mln tonni (Eesti Energia aruanne 2013). Kuigi lähiajal kavatakse põlevkivielekttri tootmine asendada põlevkiviõli tootmisega, millega vähendatakse suuresti CO₂ emissioone, jääb põlevkivisektor siiski Eesti mastaabis suurimaks saastajaks. Teine küllalt suur CO₂ heide toimub nii teravilja, kartuli kui ka muu lignotselluloosse materjali bioloogilisel kääritamisel bioetanooliks (RFA 2014). Moe ja Rakvere piiritusetehastes emiteeritav CO₂ oleks hea allikas selle bioloogiliseks sidumiseks mikrovetikate kasvatamisel. Bioloogiliseks CO₂ sidumiseks on vaja valida sobivaid mikrovetikaliike, millel on lisaks CO₂ sidumise võimele ka vajalik biomassi tootlikkus (Miyairi 1995, Ono ja Cuello 2003, Pulz ja Gross 2004, Chisti 2007).

Vetikatest üldiselt ja *Chlorella vulgaris*est

Vetikad on maakeral vanimad elusorganismid, kelle elutegevuse tulemusena tekkis atmosfääri O₂. Vetikad moodustavad evolutsiooniliselt eraldiseisvaid prokarüootseid (proklorofüüte ja tsüanobaktereid) ja eukarüootseid fotosünteesilisi organisme. Vetikaid

leidub looduses kõikjal: nii mage- kui ka merevees, mullas, maismaa niisketes kohtades, isegi kuumaveeallikates ja arktistel lumeväljadel (Graham ja Wilcox 2000).

Toitumistüübilt jagunevad vetikad auto-, hetero- ja miksotroofideks. Fotoautotroofilised vetikad toodavad eluks vajalikke orgaanilisi aineid, kasutades päikeseenergiat (Flexas et al. 2008). Kui vetika raku kasvamiseks vajalik süsinik pärineb süsinikdioksiidist, siis on tegemist autotroofse vetikaga. Kui vajalik süsinik pärineb orgaanilisest ainest, siis on tegemist heterotroofse vetikaga (Beardall et al. 1998).

Vetikad on üldiselt fotoautotroofse toitumisega, mille puhul vetika põhipigmentis olev klorofüll teostab fotosünteesi, eraldades O₂ (Harwood ja Guschina 2009).

Vetikaid jagatakse morfoloogia ja suuruse järgi mikro- ja makrovetikateks. Makrovetikate mõõtmed on mõnest sentimeetrist 80 meetrini. Neil võivad olla taimedega sarnaselt tüved, lehed, juured. Mikrovetikaid mõõdetakse mikromeetrites ja neil puuduvad taimedele omased organid. (Heitur 2010)

Värvuse järgi aga jagatakse vetikad kolme hõimkonda: rohe-, pruun- ja punavetikad. Mikrovetikas *Chlorella vulgaris* on üherakuline rohevetikas, mille mõõtmed ulatuvad 1–2 µm kuni 10 µm (Yang ja Gao 2003). *Chlorella vulgarise* kuivaine sisaldab kuni 50% proteiini, 3% klorofüllit. Klorofüllit sisalduse tõttu omab ta tõhusat fotosünteesimise võimet. Sisaldades proteiini kõrval veel mitmeid vitamiine ja mineraale ning küllastamata rasvhappeid, omab ta samas kõrget toiteväärtust. *Chlorella vulgarise* üks emarakk jaguneb 12–16 tunniga neljaks, kaheksaks, vahel ka kuueteistkümneks tütar- rakuks. Oma kiire kasvu tõttu sobib ta ka CO₂ sidumiseks atmosfäärist.

Mikrovetikate CO₂ taluvus

CO₂ bioloogiliseks sidumiseks on vaja valida sobivaid mikrovetikaliike. Tabelis 1 on esitatud valik mikrovetikaliike, mis taluvad kõrgemaid CO₂ kontsentratsioone (Kikkiniides et al. 1993, Kilowatts 2007). On teada, et tööstuslike suitsugaasi- allikate CO₂ kontsentratsioonid on vahemikus 15–20 mahuprotsenti (Kada 2001, Crofcheck et al. 2012).

Tabel 1. Erinevate mikrovetikatüvede CO₂ taluvus (Ono ja Cuello 2003, Podkuiko et al. 2014)
 Table 1. CO₂ immunity of different microalgae species (Ono ja Cuello 2003, Podkuiko et al. 2014)

Liik/tüvi	Maksimaalne teadaolev CO ₂ sidumise võime, mahuprotsent õhus
<i>Cyanidium caldarium</i>	100
<i>Scenedesmus sp.</i>	80
<i>Chlorococcum littorale</i>	60
<i>Synechococcus elongatus</i>	60
<i>Euglena gracilis</i>	45
<i>Chlorella sp.</i>	40
<i>Eudorina spp.</i>	20
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	15
<i>Nannochloris sp.</i>	15
<i>Chlamydomonas sp.</i>	15
<i>Tetraselmis sp.</i>	14

Tabelis 1 esitatud andmete põhjal selgub, et on olemas mitmed liigid, mis taluvad kõrgeid CO₂ kontsentratsioone. Samal ajal seatakse eesmärgiks ka maksimaalse biomassi saamine, millest toota biodiislit, bioetanooli ja biogaasi. Hirata et al. (1996) on esitanud andmeid, et *Chlorella sp.* UK001 kasvab edukalt alla 10% CO₂ tingimustes. Hanagata et al. (1992) leidsid, et *Chlorella sp.* on võimeline kasvama kuni 40% CO₂ tingimustes. Veel on leitud *Chlorella sp.* T-1 liigi liini uurides, et nad suutsid kasvada 100% CO₂ tingimustes, kuigi maksimaalne kasvukiirus jäi 10% juurde (Maeda et al. 2005).

Fotoautotroofne mikrovetikate kasvatamine vajab CO₂ allikat, sest süsinikdioksiidiga varustamine aitab kontrollida kasvukeskkonna pH-d (Brown 1996). Keemilised analüüsid on näidanud, et vetika biomass koosneb 40–50% süsinikust, mis viitab sellele, et 1 kg biomassi saamiseks on vaja ligikaudu 1,5–2,0 kg CO₂ (Sobczuk 2000). Varasematele uuringutele toetudes saab öelda, et mikrovetikate süsinikdioksiidiga varustamine on üks keerulisemaid küsimusi, mis kasvatamisel lahendada tuleb (Beneman et al. 1987, Oswald 1988, Tapie ja Bernard 1988).

Suitsugaaside bioloogiline sidumine mikrovetikate abil

On teada, et vähene CO₂ sisaldus piirab mikrovetikate fotosünteesi intensiivsust ja

biomassi kasvu. CO₂ puudujääk on olulisema tähtsusega kui mineraalsete toitainete vähesus. Mikrovetikad sünteesivad veest ja süsihappegaasist 94% kuivainest, ülejäänud 6% saavad mikrovetikad toitelahuses olevatest mineraalidest (De-Bashan et al. 2008). CO₂ puudujääki on võimalik katta üksnes kunstlikke allikaid kasutades. Vastavalt Molina et al. (2003) uurimusele võib veeldatud CO₂ osa ulatuda kuni 41% tooraine kogukuludest mikrovetikate kasvatamisel. Seetõttu on üheks alternatiivseks CO₂ allikaks kasutatud suitsugaase, mis moodustuvad mitmesuguste kütuste põletamisel. Põletamisprotsessi lisaväärtuseks on see, et suitsugaasid sisaldavad peale süsihappegaasi veel kuni 142 erinevat ühendit, nagu H₂O, O₂, N₂, lämmastikoksiide (NO_x), vääveloksiide (SO_x), põlemata süsivesinikke (C_xH_x), süsinikmonooksiidi (CO), raskemetalle, halogeenhappeid ja tahkeid osiseid (Simoneit et al. 2001). Tööstuslikke suitsugaase töödeldakse hetkel nii, et nendes sisalduvad veel mitteolulistes kontsentratsioonides ühendid, millest osa võivad mikrovetikatele mürgised olla, nt SO₂ (Lee et al. 2000), SO_x (Bake et al. 1983). Osad aga on mikrovetikate poolt omastatavad, nt NO (Nagase et al. 2001), N₂ – lämmastiku allikas tsüanobakteritele (Grahm, Wilox 2000), SO_x – väävli allikas, kui on oksüdeeritud sulfaadiks (Becker 2008).

Tööstuslike suitsugaaside, eelkõige fossiilsete kütuste põletamisel tekkivate soojus- elektri- ja amade suitsugaaside kogumist ja seejärel mikrovetikate abil CO₂ bioloogilise sidumise võimaluste uurimist on teostatud näiteks Watanabe et al. (1992), Hanagata et al. (1992) ning Yue ja Cheni (2005) töödes. Yue ja Cheni uuringutes eemaldati suitsugaasidest CO₂ ja *Chlorella* magevee mikrovetikaid kasvatati toitekeskkonnas seitsme päeva kaupa. Katse tulemused näitasid, et kui mikrovetikatele anda 10 mahuprotsenti CO₂ õhus, siis oli nende kasvukiirus 200% kõrgem kui ümbritsevas õhus kasvatades. Kõrgematel kontsentratsioonidel hakkasid mikrovetika kasvukiirused aeglaselt langeda, aga jäid kõrgemaks kui ümbritseva õhuga kasvatades.

Tööstuslikult põletatakse kütuseid põhiliselt kahte tüüpi ahjudes, mis on suitsugaasi allikateks (Trifonov 2009). Esimest tüüpi ahjudes, mis on kõige laiaulatuslikumalt kasutatud, on põlemisrežiimide temperatuurid 700–750 °C. Spetsiaalsed kõrgtemperatuurilised ahjud, mille põlemisrežiimid on 1250–1280 °C, on prügi intensiivseks põletamiseks või eriti ohtlike jäätmete põletamiseks (Trifonov 2009). Praegu kasutatakse Eesti katlamajades esimest tüüpi ahjudes kütusena peamiselt maagaasi, prügilagaasi, (hakke) puitu, vanaõlisid, kergest ja rasket kütteõli, põlevkivikütteõli, erinevaid loodusliku päritoluga biomasse (nt põhku) ja turvast.

Suitsus olevate toksiliste gaaside kontsentratsioon sõltub oluliselt põletatavast kütusest. On leitud, et kui suitsugaasi õhuga lahjendada, võib toksiliste komponentide kontsent-

ratsioon ikkagi märkimisväärselt ületada lubatud kontsentratsiooni piiri. Kui suitsugaasi ei puhastata, siis gaasijuhtimissüsteemis moodustuv kondensaat viib väävelhappe ja lämmastikhappe moodustumiseni, mis nende sattumisel fotobioreaktorisse põhjustab mikrovetikate hukkumist. Suitsugaasi on võimalik kasutada, kui ta on täielikult mürgistest lisanditest puhastatud. Seejuures teeb suitsugaas läbi järgmise etapiviisilise puhastuse:

- suitsugaaside jahutamine,
- suitsugaaside puhastamine tahketest mittelahustuvatest tahmaosakestest,
- CO oksüdeerimine CO₂-ks ja NO oksüdeerimine NO₂-ks,
- mikrovetikate elutegevuseks vajaliku toitelahuse valmistamine toimub happeliste oksiidide lahustumisega vees ja tekkinud hapete neutraliseerimisel sooladeks,
- CO₂ eraldamine,
- CO₂ kuivatamine ja puhastamine,
- CO₂ veeldamine ja tema kogumine spetsiaalsesse reservuaari. (Negoro 1991, Brown 1992, Laws 1991, Woodward 1992)

Põlemisprotsessis tekkivat soojust saab osaliselt kasutada fotobioreaktori soojendamiseks. Protsessi saab viia automaatjuhtimissüsteemi alla. Automaatjuhtimissüsteem kontrollib ja hoiab valgustuse taset, temperatuuri, kasvukeskkonna pH-d, CO₂ ja O₂ sisaldust toitelahuses. Tööstusliku tehnoloogia CO₂ saamiseks ja vetikate kasvatamiseks saab muuta aastaringseks. Kui CO₂ antakse reservuaarist, on doseerimine täpsem. Kui suitsugaasi, mis on kuivatatud ja puhastatud, antakse otse bioreaktorisse, siis gaasi doseerimise täpsus väheneb oluliselt, sest gaasis on maksimaalselt 11–12% CO₂, aga võib olla ka 4–5% (Trifonov 2009). Järsud CO₂ kontsentratsiooni kõikumised võivad mikrovetikatel stressi tekitada, mis omakorda võib fotosünteesi pidurdada või selle täielikult peatada (Condie ja Sloan 1998, Falkowski ja Raven 2007, Giordano et al. 2005, Inoue 2007). Kui anda vetikatele lisaks küllaldaselt mineraalseid toiteaineid, siis nende biomassi kasv võib võrreldes õhuga kasvatades suurened kuni 80% ja biomassi kahekordistamise aeg lüheneda 1,5–2 korda. On saadud 50 g kuiva mikrovetika biomassi ööpäevas ümberarvestatult 1 m² fotobioreaktori pinnale, mis on mitu korda kõrgem tavalisest mikrovetikate kasvatamisest.

Seega saab CO₂ kasutamist mikrovetikate kasvatamisel edukalt kaasata fotosünteesi protsessi efektiivsel juhtimisel. Fotosünteesi protsessis eraldub suures koguses hapnikku. Harkovi teadlaste uuringutes kunstlikus automaatse kontrolliga kinnises CO₂ bioloogilises süsteemis töötati välja režiimid, mille puhul eraldasid mikrovetikad kuni 2 ml O₂ 1 µg biomassi kohta (Trifonov 2009). Eralduvat O₂ on võimalik suunata ahjukütuste põletamiseks õhule lisaks. Ülejäänud osa suunatakse atmosfääri, taastamaks selle hap-

nikusisaldust.

Mikrovetikate kasvutingimused

Mikrovetikate kasvatamisel on olulised järgmised tingimused: valgus, vesikeskkonna pH, toitainete sisaldus ja temperatuur. Lisaks eespool käsitletud CO₂ mõjule vetikate kasvule saab valida erinevaid kasvutingimusi ja süsteeme (avatud tiik, bioreaktor jm), millega on võimalik oluliselt eksperimendi tulemusi mõjutada.

Valgus

Chlorella vulgarise kasvatamisel on maksimaalse kiiruse ja biomassi saavutamiseks optimaalne valgustugevus 10 000 – 15 000 lx. Kasvukiirus aga tõuseb valgustugevuse kasvuga tasemeni, kus saavutatakse valguse küllastumine, mis sõltub temperatuurist, toitainete olemasolust ja on *Chlorella vulgarise* puhul suhteliselt kõrge (Khoeyi et al. 2011). Sorokin ja Krauss (1958) on näidanud, et *Chlorella vulgarise* maksimaalne biomassi saagis eksponentsiaalsel kasvamisel saadi fluorestsentslampidega valgustamisel 18–20 μmol footonit/m²s, mis on 50% küllastusvalguse väärtusest.

Temperatuur

Uuringud on näidanud, et *Chlorella vulgarisel* on kõige suurem kasvukiirus 25 °C juures ja ta on võimeline kasvama 40 °C-ni, aga mitte kogu aeg sellise kiirusega nagu 25 °C juures (Sayed 2000).

pH

Kuigi *Chlorella vulgaris* kasvab laias pH vahemikus, on teda otstarbekas kasvatada 6,0 juures (Arensberg et al. 1995, Illman et al. 2000, Aishvarya et al. 2012), sest siis on tema kasvukiirus kõige suurem. Seega tuleb sobivaima pH saavutamiseks hoida süsihappegaasi lisamine kontrolli all, sest CO₂ üleliigne sisaldus üheskoos kõrge temperatuuriga muudavad kasvukeskkonna happeliseks. Stabiilse pH hoidmiseks tuleb vältida rakkude kõrget kontsentratsiooni. Seda on võimalik saavutada kasvukeskkonna intensiivse segamisega, kasutades reaktori pinna/mahu kõrget suhet, et hõlbustada CO₂ massi ülekannet, või alandades algrakkude tihedust (Gacheva ja Pilarski 2008).

Kasvukeskkonna toitained

Vetikate kasvatamisel omab tähtsust makro- ja mikrotoitainetega rikastatud keskkond, mille koostis mõjutab katsetulemusi (Chelf et al. 1993). Vajalik on optimaalne toitainete sisaldus, mis tagab CO₂ fikseerimise ja mikrovetika rakkude kiire kasvu (Healey 1973). Samas on toitainete üledoseerimine ressursside raiskamine ja tõstab mikrovetikate kasvatamise või uurimise maksumust. Liigne toitainete sisaldus, näiteks CO₂ liig süsiniku

allikana, põhjustab aga proteiini ja pigmentide sisalduse vähenemist (Gordillo et al. 1998) ja mikroelementide Cu ja Zn liig vetikate mürgistumist (Campanella et al. 2001).

Chlorella vulgarise kasvatamiseks on kasutatud mitmeid mageveel põhinevaid toitelahuseid. Lämmastikku lisatakse keskkonda sageli kaalium-, naatrium- või kaltsiumnitraadina. Fosfor võib olla monokaaliumfosfaadina, dikaaliumfosfaadina või dinaatriumfosfaadina, mis funktsioneerivad ka puhvrina kasvukeskkonna pH neutraalsena hoidmisel. Raud ja magneesium omavad olulist rolli fotosünteesis, sest nende piisav hulk soodustab otseselt CO₂ sidumist ja biomassi tootmist. Rauda võib lisada raudsulfaadina, raudetüleendiamiintetra soolana või raudammooniumtsitraadina. Magneesium lisatakse peamiselt sulfaadina, kaltsium kaltsiumkloriidina. *Chlorella vulgarise* rakud sisaldavad tsinki, vaske, mangaani, mis on seotud rakkude jagunemisega (Healey 1973). Seetõttu antakse mangaan(II)kloriid, vask(II)sulfaat ja tsinksulfaat toitelahuses mikroelementidena. Üks tuntumaid toitelahuseid *Chlorella vulgarise* kasvatamisel on Boldi toitelahus, kus on esindatud 14 mineraali (Andresen 2005).

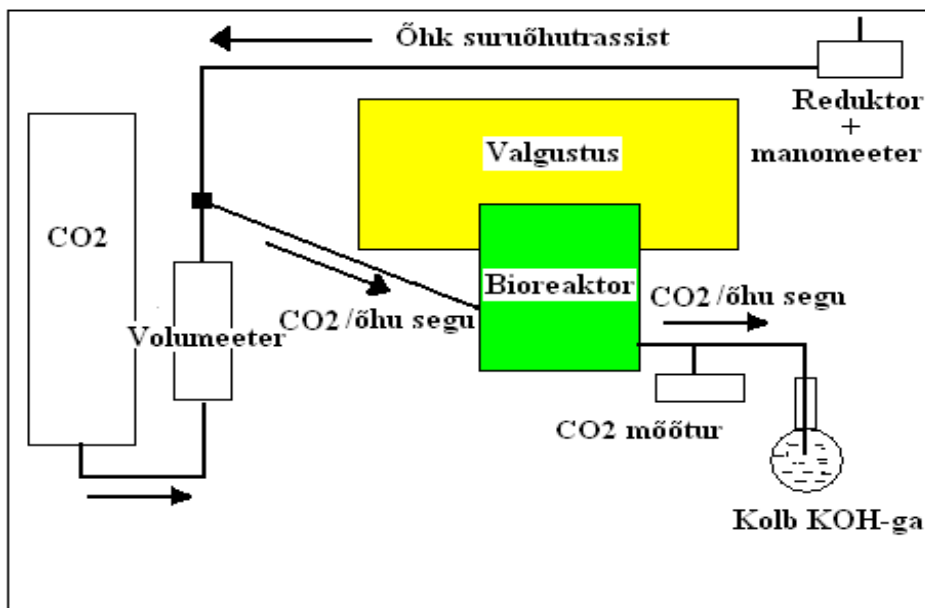
Mikrovetikate laboratoorne kasvatamine

Laboratoorseks kasvatamiseks osteti Tšehhi Vabariigist (Karli Ülikoolist Prahast) mikrovetikas *Chlorella vulgaris Beyerinck* (Culture Collection 2014). Mikrovetikas oli steriilselt suletud klaasampullis tarrendunud agaril. Mikrovetikate *Chlorella vulgaris Beyerinck* kasvatamiseks kasutati komplektset fermentor-bioreaktorit, mis koosneb pH elektroodist, temperatuuriandurist, O₂ andurist (Lambda 2014). Bioreaktor on seitsmekaelaline 1,7-liitrise mahuga autoklaavimist võimaldav klaasist anum. Selle erinevatesse kaeltesse saab paigutada andureid, mis võimaldavad vetikate kasvatamisel määrata kindlaks O₂/gaasisegu sissejuhtimise kiiruse, kontrollida reaktoris toitekeskkonna pH-d, temperatuuri, lahustunud O₂ kontsentratsiooni. Lisaks on bioreaktori kaelas olemas spetsiaalne tihend ülerõhu tekkimise vältimiseks.

Ekspriimendi teostamiseks kasutati veel järgnevaid seadmeid: Vaisala Carbocapi CO₂ andur Gm70, digitaalne kaal Radwag WLC 6/A2, mikroskoop Nikon Eclipse E200MV, Thermo Scientifici spektrofotomeeter Spectronic 200, valgustid Osram 18/860 Lumilix daylight, vertikaalne autoklaav Panasonic MLS-3020U, Ki Key Instrumentsi volumeeeter, CO₂ mõõtur jt.

Joonisel 1 on ülevaatlik skeem mikrovetikate kasvatamisest. Bioreaktorist juhiti läbi tehnikainstituudi suruõhutrassist tulevat õhku, mida alandati 1–1,5 baari ja lisati esimeses kahes katses gaasiballoonist juurde Gourmet CO₂ kontsentratsioonide vahemikus

0,06–14 mahuprotsenti õhus. Gourmet CO₂ osteti Elme Messeri firmast (Elme Messer 2014). Eksperimente alustati tehnikainstituudi suruõhutrasist tuleva õhu läbijuhitamisega, milles sisaldus ligikaudu 0,06 mahuprotsenti CO₂. Seejärel tõsteti järgnevas katsetes CO₂ kontsentratsioone õhus 0,35–14 mahuprotsenti, mida mõõdeti volumetriga. Steriilsete tingimuste tagamiseks oli enne gaasisegu juhtimist bioreaktorisse paigaldatud mikrofilter pooride läbimõõduga 0,22 µm.



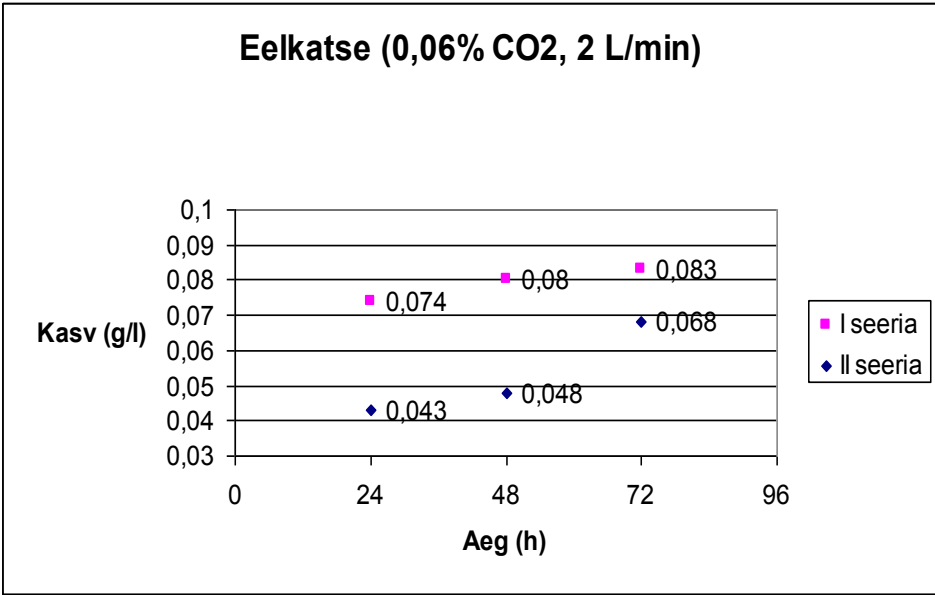
Joonis 1. Mikrovetikate kasvatamise skeem (Heitur 2014)
Figure 1. Microalgae cultivation scheme (Heitur 2014)

Mikrovetika *Chlorella vulgaris* Beyerinck kasvulahusena kasutati Boldi põhilahust, mis sisaldas 1 liitris lahuses 7,5 g K₂HPO₄; 17,5 g KH₂PO₄; 7,5 g Mg SO₄×7H₂O; 25 g NaNO₃; 2,5 g CaCl₂×2H₂O; 2,5 g NaCl; 20 g EDTA tetraanaatriumi soola; 1,992 g CuSO₄×7H₂O; 4,568 g H₃BO₃; 1,412 g ZnSO₄×7H₂O; 0,232 g MnCl₂×2 H₂O; 0,252 g CuSO₄×5H₂O; 0,08 g Co(NO₃)₂×6 H₂O; 0,192 g Na₂MoO₄×2H₂O. (Andersen 2005)

Ekspirimendi tulemused

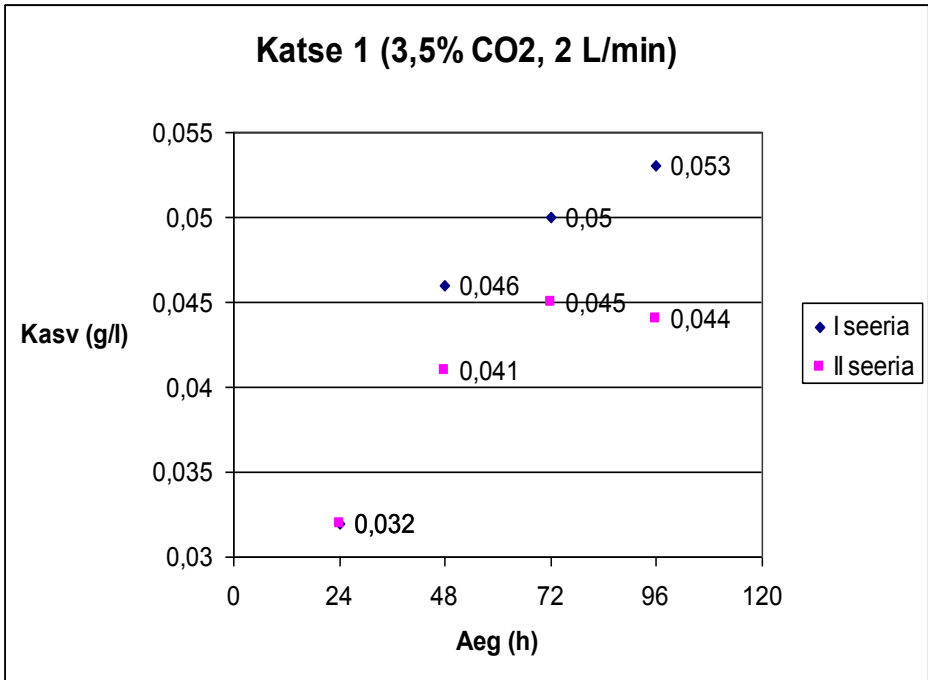
Ekspirimendi alustati eelkatsega: mikrovetikaid kasvatati bioreaktorist läbi juhtides ainult õhku (CO₂ 0,06%, 2 L/min). Katse näitas, et vajalik on vetikamassi algkontsentratsioonid ligilähedased hoida, sest ainult siis on võimalik katsetulemusi kasvukiiruse poolest võrrelda.

Joonisel 2 on esitatud mikrovetikate juurdekasvu eelkatse tulemused. Jooniselt on näha, et alles 72 h möödumisel olid mõlema katseseeria juurdekasvud võrreldavates suurus-tes. Eelkatse parimad juurdekasvu tulemused olid 24 h möödumisel 0,074 g/l, 48 h möödumisel 0,080 g/L ja 72 h möödumisel 0,083 g/L. Järgnevatel eksperimentides võeti mikrovetikate algkontsentratsiooniks ligikaudu 0,04 g/L.



Joonis 2. Mikrovetikate juurdekasvu eelkatse tulemused (Heitur 2014)
 Figure 2. Results of the microalgae growth in the preliminary test (Heitur 2014)

Joonisel 3 on esitatud mikrovetikate *Chlorella vulgaris* Beyerinck kasvatamise tulemu-
 sed kahe katseseeria järel, kui bioreaktorisse juhiti 3,5% CO₂ ja õhu segu läbivoolu-
 kiirusel 2 L/min. Jooniselt selgub, et pärast 24 h on mõlema katseseeria juurdekasvud
 võrdsed, mis näitab, et katsete algtingimused on olnud võrdsed. Pärast 48 h möödumist
 on juurdekasvud suurusjärgude poolest küll sarnased, aga siiski erinevad. See on selgi-
 tatav katseseeriade pH-de erinevustega. Teises katseseerias olid pH väärtused madala-
 mad, võrreldes esimese katseseeriaga, mis näitab, et mikrovetikad ei ole suutnud CO₂
 siduda, mis põhjustab ka madalama vetikate produktiivsuse. Madalama produktiivsuse
 põhjuseks võib olla glükoolüüs, mis tähendab, et mikrovetikad on hakanud oma suhk-
 ruid lagundama. Teise katseseeria puhul on seega mikrovetikad pärast 72 h möödumist
 stressi langenud. Esimese katse mõlema seeria parimad juurdekasvu tulemused olid 24
 h möödumisel 0,036 g/l, 48 h möödumisel 0,046 g/L, 72 h möödudes 0,05 g/L ja 96 h
 puhul 0,053 g/L.

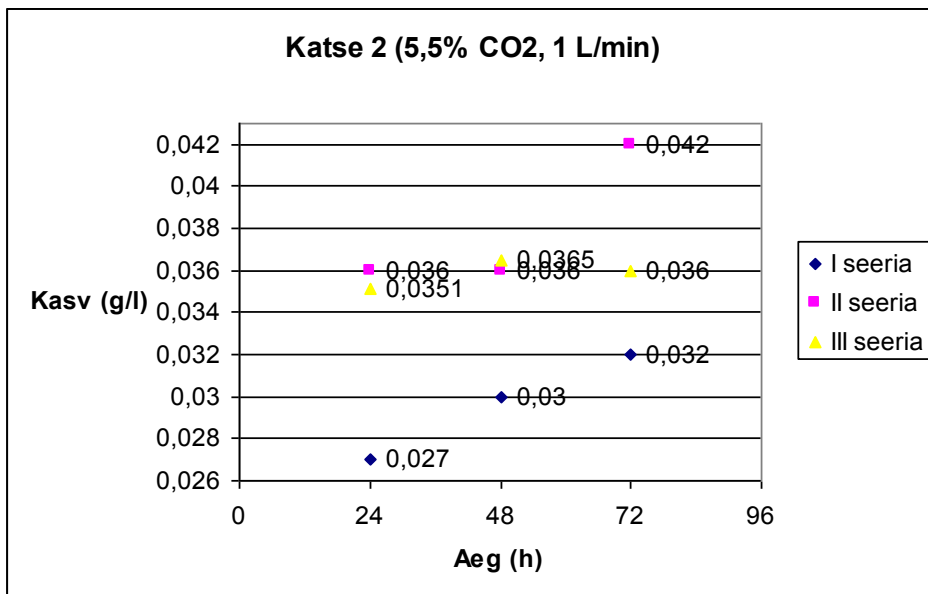


Joonis 3. Esimese katse juurdekasvu tulemused (Heitur 2014)
 Figure 3. Results of the microalgae growth in experiment 1 (Heitur 2014)

Teise katse kolm kasvuseeriat teostati 5,5% CO₂ ja õhu läbivoolukiirusel 1 L/min. 72-tunniste katseseeriade tulemused on esitatud joonisel 4. Jooniselt on näha, et esimese ja teise katseseeria juurdekasvud on võrreldavad, kuigi mikrovetikate algkontsentratsioonid on olnud erinevad.

Joonisel 4 on näha, et esimese seeria juurdekasvud on võrreldes teise ja kolmanda seeria tulemustega madalamad. Üheks põhjuseks võib olla pisut madalam mikrovetikate algkontsentratsioon vetikamassis katse alustamisel. Mikrovetikad võisid olla ka siin stressis. Selle võis põhjustada CO₂ kontsentratsiooni kõikumine, mille tekitas tehniline rike süsteemis, sest et kahel korral (48 h ja 72 h) mõõdeti sissejuhitavas õhus CO₂ osakaal 0,5% kõrgemana, kui esialgselt sätestatud. Seevastu on teine ja kolmas katseseeria väga ühtlaste tulemustega nii mikrovetikate juurdekasvu kui kogutud andmete võrdlusele. Teise katse parimad juurdekasvu tulemused olid 24 h möödumisel 0,036 g/l, 48 h möödumisel 0,0365 g/l ja 72 h möödumisel 0,036 g/l.

Kolmanda katse eesmärgiks oli välja selgitada, kas mikrovetikas *Chlorella vulgaris* Beyerinck on võimeline siduma suuremas koguses ka tehnilist CO₂ (Elme Messer 2014).



Joonis 4. Teise katse *Chlorella vulgaris* Beyernicki juurdekasvu tulemused (Heitur 2014)
 Figure 4. Results of the microalgae growth in experiment 2 (Heitur 2014)

Kirjandusandmetele tuginedes (Yun et al. 1996) võib öelda, et *Chlorella vulgaris* talub kõrgeid kontsentratsioone pärast aklimatiseerumist. Vältimaks mikrovetikate stressi tekkimist, otsustati katse jagada viide etappi. Esimeses etapis kasvatati mikrovetikaid bioreaktoris ainult õhku läbi juhtides, st 0,06% CO₂ juuresolekul 96 tundi. Saavutati mikrovetikate kasv 0,068 g/L kuni 0,342 g/L.

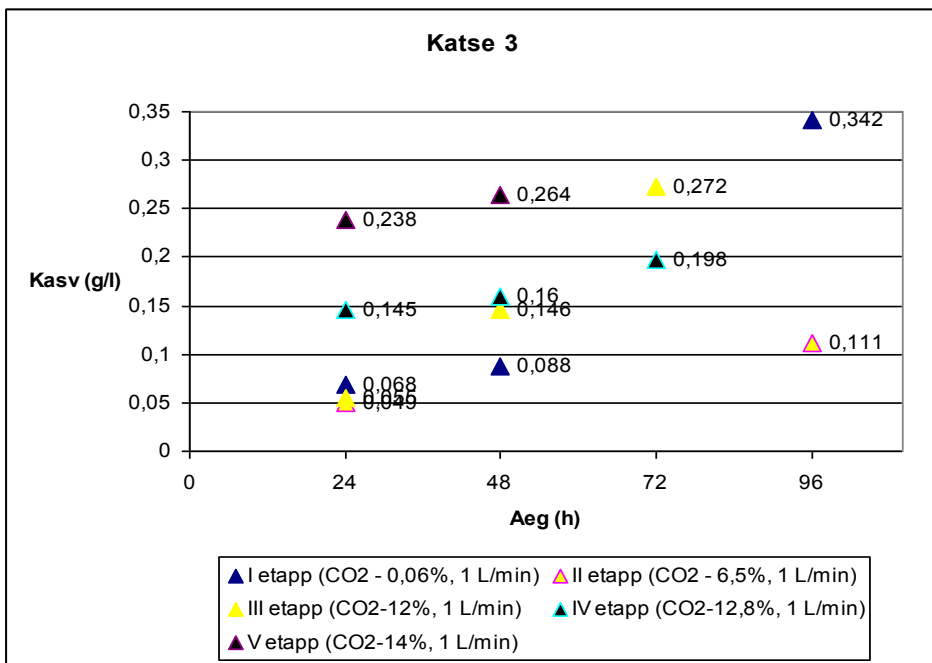
Teises etapis tõsteti CO₂ kontsentratsioon 6,5%-le. Selleks ajaks oli vetikamass kasvulahuses kasvanud ja kasvukeskkond värvunud nii tumeroheliseks, et rakud hakkasid üksteist varjutama. 1,5 L lahusest eemaldati 1 L lahust ja 0,5 L lahusele lisati juurde 1 L värskelt valmistatud autoklaavitud ja jahutatud Boldi toitelahust. Teise etapi pikkus oli 48 h ja selle aja jooksul saavutati juurdekasvud 0,049 g/l kuni 0,111 g/l.

Kolmandas etapis tõsteti CO₂ kontsentratsioon 12%-ni õhus ja katse kestis 96 h. Vetikamassi juurdekasvud oli eelmise etapiga võrreldes suurenenud keskmiselt kaks korda. Ka selles etapis saavutati parim juurdekasv 72 h möödudes – selleks oli 0,272 g/l.

Neljanda etapi alguses eemaldati bioreaktorist kasvulahus koos vetikatega nii, et bioreaktorisse jäi taas 500 ml lahust, ja lisati 1 L värskelt valmistatud toitelahust, nagu eelpool on kirjeldatud. CO₂ kontsentratsioon oli 12,8% ja juba 24 h möödumisel saavuti

juurdekasv, mis eelmisel etapil saavutati 48 tunniga. Stressi ei olnud märgata. Juurdekasvud olid 0,145 g/l kuni 0,198 g/l.

Viimases etapis viidi CO₂ kontsentratsioon 14%-ni õhus ja katse kestis kaks päeva. Selistel tingimustel saavutati kõige suuremad juurdekasvud. Kolmanda katse juurdekasvu tulemused on esitatud joonisel 5.



Joonis 5. Kolmanda katse juurdekasvu tulemused (Heitur 2014)
 Figure 5. Results of the microalgae growth in experiment 3 (Heitur 2014)

Kuna katse otseseks eesmärgiks ei olnud biomassi kasvatamine, vaid võimalikult kõrge CO₂ sidumine, siis on märkimisväärne, et kõige suurem juurdekasv saavutati katse esimeses etapis, kus juurdekasvuks mõõdeti 0,342 g/l. Tegemist oli ka pikemalt väldanud katsega. Kolmanda katse parimad juurdekasvu tulemused olid 24 h möödumisel 0,238 g/L (14% CO₂), 48 h möödumisel 0,264 g/L (14% CO₂) ja 72 h möödumisel 0,272 g/L (12% CO₂).

Kui võrrelda kolmanda katse II etapi tulemusi teise katse tulemustega, kus CO₂ kontsentratsioonid olid võrreldavates suurustes (5,5% ja 6,5%), siis ilmneb, et teise katse puhul saavutati 72 h jooksul samaväärne tulemus kui kolmanda katse puhul 24 tunniga.

See tõendab, et eelkasvatatud ja aklimatiseeritud mikrovetikas on parema CO₂ omastamis- ja kasvuvõimega.

Tegelikkuses on jooniselt hästi näha, et *Chlorella vulgaris* Beyerinck näitas nii IV kui ka V etapis, kus CO₂ kontsentratsioonid olid kõige suuremad, väga head juurdekasvu ning stressi tunnuseid ei olnud märgata. Parimaks juurdekasvuks saavutati III etapis 0,272 g/L ja V etapis 0,264 g/L.

Katsetulemustest selgus, et kiireim CO₂ sidumine ja vastavalt ka kiireim vetikamassi kasvamine saavutati juhul, kui esmalt kasvatati vetikarakke, juhtides õhku 3–5 päeva läbi bioreaktori, ja seejärel aklimatiseeriti eelnevalt madalamate CO₂ kontsentratsioonidega. CO₂ ja õhu läbivoolukiirus oli seejuures 1 L/min.

Kokkuvõte

Käesolevas artiklis esitati tulemused mikrovetika *Chlorella vulgaris* Beyerinck fotoautotroofse kasvatamise kohta laboritingimustes (steriilsetes tingimustes) Lambda Minifori bioreaktoris ja otsiti vastust küsimusele, kas *Chlorella vulgaris* Beyerincki oleks võimalik kasutada energiasektoris tekkiva CO₂ sidumiseks.

Teostati mitmeseerialisi katseid. Kasvatati mikrovetikaid, juhtides õhu ja CO₂ segu sisse kahel erineval kiirusel: 1 L/min ja 2 L/min. CO₂ sisaldused õhus olid vahemikus 0,06–14%. Esimese kahe katse seeriates kasutati süsiniku allikana toidusüsihappegaasi Gourmet C. Kolmandas, pikas katses kasutati tehnilist süsihappegaasi (CO₂ 99,5%). Mikrovetikate parimad kasvukiirused ja suurem CO₂ siduvus saavutati kolmandas, pikas katses, kui *Chlorella vulgaris* Beyerincki rakke kasvatati alguses ainult õhku reaktori läbi juhtides, st kontsentratsioonil 0,06% CO₂ õhus, ja seejärel aklimatiseeriti eelnevalt madalamate CO₂ sisaldustega. CO₂ ja õhu läbivoolukiirused olid 1 L/min. Katse lõpus kasvatati mikrovetikaid CO₂ kontsentratsioonil 14% õhus. See tähendab, et *Chlorella vulgaris* Beyerinck suudab CO₂ siduda ka energiasektoris tekkivatest suitsugaasidest, mis sisaldavad kuni 14% CO₂.

Kuna Eesti põlevkivienergeetika sektoris võib suitsugaasides sisalduv CO₂ küündida kuni 30%-ni, siis vajalik oleks mikrovetikaid kasvatada ehk bioloogiliselt siduda CO₂ ka kõrgemate kontsentratsioonide juures. Katsete läbiviimisel peaks tõstma valgustatuse 2,5 klx 15 klx-ni ja kasutama valgustusrežiimi 16 : 8 (16 h valgustamist, 8 h pimedust).

Tänuavaldused

Uurimistöö läbiviimist toetas Keskkonnainvesteeringute Keskus, kes rahastab Eesti Maaülikooli Tehnikainstituudi projekti „Mikrovetikate kasvatamine energiasektoris tekkiva CO₂ sidumiseks“ (projekt nr 4910).



Kasutatud kirjandus

- Aishvarya, V., Pradhan, N., Nayak, R. R., Sukla, L. B., Mishara, B. K. 2012. Enhanced inorganic carbon uptake by *Chlorella* sp. IMMTCC-2 under autotrophic conditions for lipid production and CO₂ sequestration. – *Journal. Appl. Phycol.*, 24, 1455–1463.
- Andersen, R. A. 2005. *Algal Culturing Techniques*. Elsevier Academic Press, Burlington.
- Arensberg, P., Hemmingsen, V. H. and Nyholm, N. 1995. A miniscale algal toxicity test. – *Chemosphere*, 30, 2103–2115.
- Bake, M. D., Mayfield, C. I., Inniss, W. E. 1983. Toxicity of pH, heavy metals and bisulfite to a fresh-water green alga. – *Chemosphere*, 2, 35–44.
- Beardall, J., Beer, S. and Raven, J. A. 1998. Biodiversity of Marine Plants in an Era of Climate Change: Some Predictions Based on Physiological Performance. – *Botanica Marina*, 41(1–6), 113–124.
- Becker, E. W. 2008. *Microalgae: biotechnology and microbiology*. – Cambridge studies in microbiology 10. Cambridge: Cambridge University Press. 293 pp.
- Beer, S. and Koch, E. 1996. Photosynthesis of Marine Microalgae and Seagrasses in Globally Changing CO₂ Environments. – *Marine Ecology Progress Series*, 141, 199–204.
- Beneman, J. R., Tillet, D. M. and Weissman, J. C. 1987. Trends in Biotechnology. – *Microalgae Biotechnology*, 5(2), 47–53.
- Brennan, L., Owende, P. 2010. Biofuels from microalgae: A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and coproducts. – *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 557–577.
- Brown, L. M. 1992. Biological Capture of CO₂ from Flue Gas: extended abstract presented at the Eighth Annual Coal Preparation, Utilization, and Environmental Control Contractors Conference. Pittsburgh: PA.
- Brown, L. M. 1996. Uptake of Carbon Dioxide from Flue Gas by Microalgae. – *Energy Conversion and Management*, 37(6–8), 1363–1367.
- Campanella, L., Cubadda, F., Sammartino, M., Saoncella, A. 2001. An algal biosensor for the monitoring of water toxicity in estuarine environments. – *Water Res.*, 35, 69–76.

- Chelf, P., Brown, L. M. and Wyman, C. E. 1993. Aquatic Biomass Resources and Carbon Dioxide. – *Biomass and Bioenergy*, 4(3), 175–183.
- Chisti, Y. 2007. Biodiesel from Microalgae. – *Biotechnology Advances*, 25(3), 2007,
- Condie, K. C. and Sloan, R. E. 1998. *Origin and Evolution of Earth: Principles of Historical Geology*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 498 p.
- Crofcheck, C., Shea, E. X., Shea, A., Montross, M., Andrews, R. 2012. Influence of media composition on the growth rate of *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus acutus* utilizes for CO₂ mitigation. – *J. Biochem. Tech.*, 4(2), 589–594.
- Culture collection of algae and protozoa. 2014. [http://www.ccap.ac.uk/imaging/include/image.php?img=/srv/CCAP_images/WEB_ccapst-rains/211_75/2008-11-27_1622/Image_000046.png&mode=org&logo=33&tlcol=%23FFFF00&tltext=CCAP+211/75+-+Chlorella+vulgaris] (26.05.2014).
- De-Bashan, L. E., Trejo, A., Huss, V., Hernandez, J. P., Bashan, Y. 2008. *Chlorella sorokiniana* UTEX 2805, a heat and intense, sunlight-tolerant microalga with potential for removing ammonium from wastewater. – *Bioresource Technology*, 99, 4980–4989.
- Doucha, J., Straka, F., Livansky, K. 2005. Utilization of flue gas for cultivation of microalgae (*Chlorella* sp.) in an outdoor open thin-layer photobioreactor. – *Journal of Applied Phycology*, 17, 403–412.
- Eesti Energia aastaaruanne 2013. https://www.energia.ee/-/doc/10187/pdf/concern/annual_report_2013_est.pdf.
- Elme Messer Gaas AS 2014. <http://www.elmemesser.ee/assets/media/201127/8c76034cb4c52094395afb46043b706a.pdf>.
- Falkowski, P. G. & Raven, J. A. 2007. *Aquatic Photosynthesis*, 2nd Ed. Princeton University Press, ISBN 978-0691115511, Princeton, NJ.
- Flexas, J., Ribas-Carbó, M., Diaz-Espejo, A., Galmés, J. and Medrano, H. 2008. Mesophyll Conductance to CO₂: Current Knowledge and Future Prospects. – *Plant, Cell and Environment*, 31(5), 602–621.
- Gacheva, G., Pilarski, P. 2008. The resistance of a new strain *Chlorella* sp. R-06/2, Isolated from an extreme habitat to environmental stress factors. – *Gen. Appl., Plant Physiology*, Special Issue, 34(3–4), 347–360.
- Giordano, M., Beardall, J. & Raven, J. A. 2005. CO₂ Concentrating Mechanisms in Algae: Mechanisms, Environmental Modulation and Evolution. – *Annual review of plant biology*, 56, 99–131.
- Godos, I., Mendoza, J. L., F. G. Acién, Molina, Banks, C. J., Heaven, S., Rogalla, F. 2013. Evaluation of carbon dioxide mass transfer in raceway reactors for microalgaculture using flue gases. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech>.

- Gordillo, F. J. L., Jiménez, C., Figueroa, F. L., Niell, F. X. 1998. Effects of increased atmospheric CO₂ and N supply on photosynthesis, growth and cell composition of the cyanobacterium *Spirulina platensis* (Arthrospira). – *J. Appl. Phycol.*, 10, 461–469.
- Graham, L. E. and Wilcox, L. W. 2000. *Algae*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Hanagata, N., Takeuchi, T. and Fukuju, Y. 1992. Tolerance of Microalgae to High CO₂ and High Temperature. – *Phytochemistry*, 31(10), 3345–3348.
- Harwood, J. L. and Guschina, I. A. 2009. The versatility of algae and their lipid metabolism. – *Biochemie*, 91(6), 679–684.
- Healey, F. P. 1973. Inorganic nutrient uptake and deficiency in algae. – *Critical Reviews in Microbiology*, 3, 69–113.
- Heitur, H. 2010. Mikrovetikate kasvatamine biodiisli tootmise tooraineks. Otepää.
- Heitur, H. 2014. Mikrovetikate *Chlorella vulgaris* Beyerinck kasvatamine CO₂ sidumise eesmärgil. Tartu.
- Hirata, S., Hayashitani, M., Taya, M., Tone, S. 1996. Carbon Dioxide Fixation in Batch Culture of *Chlorella* sp. Using a Photobioreactor with a Sunlight-Collection Device. – *Journal of fermentation and bioengineering*, 81(5), 470–472.
- Inoue, I. 2007. *The Natural History of Algae: Second Edition: Perspective of Three Billion years Evolution of Algae*. Earth and Environment. Tokai University Press: Japan.
- Illman, A. M., Scragg, A. H., Shales, S. W. 2000. Increase in *Chlorella* strains calorific values when grown in low nitrogen medium. – *Enzyme and Microbial Technology*, 27, 631–635.
- Kada, K. L. 2001. *Microalgae Production from Power Plant Flue Gas: Environmental Implications on a Life Cycle Basis*. National Renewable Energy Laboratory publications, NREL/TP-510-29417, Golden, CO.
- Khoeyi, X. A., Seyfabadi, J., Ramezanzpour, Z. 2011. Effect of light intensity and photoperiod on biomass and fatty acid composition of the microalgae *Chlorella vulgaris*. Springer Science.
- Kikkinides, E. S., Yang, R. T., Cho, S. H. 1993. Concentration and recovery of carbon dioxide from flue gas by pressure swing adsorption. – *Industrial Engineering Chemistry Research*, 32(11), 2714–2720.
- Kilowatts, D. 2007. *America's Most Polluting Power Plants*. Environmental, Integrity Project, National Renewable Energy Laboratory Publications, Washington DC.
- Lambda Laboratory Instruments. 2014. <http://www.lambda-instruments.com> (07.07.2014).
- Laws, E. A. and Berning, J. L. 1991b. A study of the energetics and economics of mic-

- roalgal mass culture with the marine chlorophyte *Tetraselmis suecica*: Implications for use of power plant stack gases. – *Biotechnol. Bioeng.*, 37, 936–947.
- Lee, J., Jin-Suk, I., Chul-Seung, S., Soon-Chul, P., Seung-Wook, K. 2000. Effects of NO and SO₂ on growth of highly-CO₂-tolerant microalgae. – *Microbiol.*, 10, 338–343.
- Maeda, M., Johnson, K. R., Wheelock, M. J. 2005. Cadherin switching: essential for Behavioural but not morphological changes during an epithelium-to-mesenchyme transition. – *J. Cell Sci.*, 118, 873–887.
- Mata, T. M., Martins, A. A., Caetano, N. S. 2010. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. – *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 217–232.
- Miyairi, S. 1995. CO₂ Assimilation in a Thermophilic Cyano-bacterium. – *Energy Conversion and Management*, 36(6–9), 763–766.
- Molina Grima, G. E., Belarbi, E. H., Acien Fernandez, F. G., Medina, R. A., Chisti, Y. 2003. Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics. – *Biotechnol. Adv.*, 20, 491–515.
- Nagase, H., Yoshihara, K., Eguchi, K., Okamoto, Y., Murasaki, S., et al. 2001. Uptake pathway and continuous removal of nitric oxide from flue gas using microalgae. – *Biochem. Eng. J.*, 7, 241–246.
- Negoro, M., Shioji, N., Miyamoto, K., Miura, Y. 1991. Growth of microalgae in high CO₂ gas and effects of SO_x and NO_x. Takasago and Development Center, 28/29, 877–886.
- Ono, E. and Cuello, J. L. 2003. Selection of Optimal Microalgae. Annual Conference on Carbon Sequestration, Alexandria, pp. 1–7.
- Oswald, J. A. 1988. Large-Scale Algal Culture Systems: Engineering Aspects. – *Microalgal biotechnology*. Cambridge: Cambridge University Press, 357–395.
- Podkuiko, L., Ritslaid, K., Kikas, T., Olt, J. 2014. Review of promising strategies for zero-waste production of the third generation biofuels. – *Agronomy Research*, 12(2), 373–390.
- Pulz, O. and W. Gross, W. 2004. Valuable Products from Biotechnology of Microalgae. – *Applied Microbiology and Biotechnology*, 65(3), 635–648.
- Ethanol Facts: Energy Security. <http://www.ethanolrfa.org> (24.08.2014).
- Richmond, A. 2004. *Microalgal culture biotechnology and applied physiology*, 4, Blackwell Science Ltd.
- Sayed, O. H. 2000. Growth, photosynthesis and circadian patterns in *Chlorella vulgaris* (Chlorophyta) in response to growth temperature. – *Cryptogamie Algol.* 21, 283–290.

- Simoneit, B. R. T, Rogge, W. F., Lang, Q., Jaffe, R. 2001. Molecular characterisation of smoke from campfire burning of pine wood (*Pinus elliotti*). – *Chemosphere*, 2, 107–122.
- Sobczuk, T. M., Camacho, F. G., Rubio, F. C., Fernandez, F. G. A., Grima, E. M. 2000. Carbon Dioxide Uptake Efficiency by Outdoor Microalgal Cultures in Tubular Air-lift Photobioreactors. – *Biotechnology and Bioengineering*, 67(4), 465–475.
- Sorokin, C. and Krauss, R. W. 1958. The effects of light intensity on the growth rates of green algae. – *Plant Physiology*, 33, 109–113.
- Tapie, J. P. and Bernard, A. 1988. Microalgae Production Technical and Economic Evaluations. – *Biotechnology and Bioengineering*, 32(7), 873–885.
- Трифонов В.Ю. Использование дымовых газов образующихся в процессе термической переработки твердых бытовых отходов для выращивания микроводоросли *Spirulina Platensis*. Экологический Вестник России, 11, 2009. <http://www.prombiotechnology.com.ua/images/gases.pdf> (22.05.2014).
- Watanabe, Y. Gould, E., Cameron, H., Daniels, D., McEwen, B. 1992a. Phenytoin prevents stress- and corticosterone-induced atrophy of CA3 pyramidal neurons. – *Hippocampus*, 2, 431–435.
- Woodward, C. A., Macinnis, J. M., Lewis, S. N., Greenbaum, E. 1992. Chemical Interaction of Flue Gas Components with the Growth of *Cyanidium caldarium*. – *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 34–35(1), 819–826.
- Yang, Y. and Gao, K. 2003. Effects of CO₂ Concentrations on the Freshwater Microalgae, *Chlamydomonas Reinhardtii*, *Chlorella Pyrenoidosa* and *Scenedesmus Obliquus* (Chlorophyta) – *Journal of Applied Phycology*, Vol. 15, No. 5, 379–389.
- Yue, L. and Chen, W. 2005. Isolation and Determination of Cultural Characteristics of a New Highly CO₂ Tolerant Fresh Water Microalgae. – *Energy Conversion and Management*, 46(11–12), 1868–1876.
- Yun, Y. S., Park, J. M., Yang, J. W. 1996. Enhancement of CO₂ tolerance of *Chlorella vulgaris* by gradual increase of CO₂ concentration. – *Biotechnology Techniques*, 10, 713–716.

CULTIVATION OF MICROALGAE *CHLORELLA VULGARIS BEYERINCK* OF THE CO₂ CAPTURE

Kaie Ritslaid, Lara Podkuiko, Heiko Heitur, Jüri Olt

The aim of the study was to examine microalgae *Chlorella vulgaris Beyerinck* potential to capture CO₂ and algae biomass autotrophic production in the photobioreactor. The work aims to find out whether *Chlorella vulgaris Beyerinck* is suitable species of microalgae to capture CO₂ from the energy sector. During the study, the CO₂ capture factors and algae biomass growth data was collected, and statistical analysis were performed.

I found that the best rates for the CO₂ capture and the algae biomass growth rates were performed, when microalgae was pre-cultivated under the low limits of the CO₂ concentrations. Experimental results showed that *Chlorella vulgaris Beyerinck* can be used for the CO₂ capture in the energy sector.

TASAPINNALISE 2,5 M² PÄIKESEPANEELI TÖÖ TULEMUSED AJAVAHEMIKUS SEPTEMBER 2013 KUNI SEPTEMBER 2014

Veli Palge¹, Margus Arak², Erkki Jõgi³

¹Eesti Maaülikool, veli.palge@emu.ee;

²Eesti Maaülikool, margus.arak@emu.ee;

³Eesti Maaülikool, erkki.jogi@emu.ee

Annotatsioon

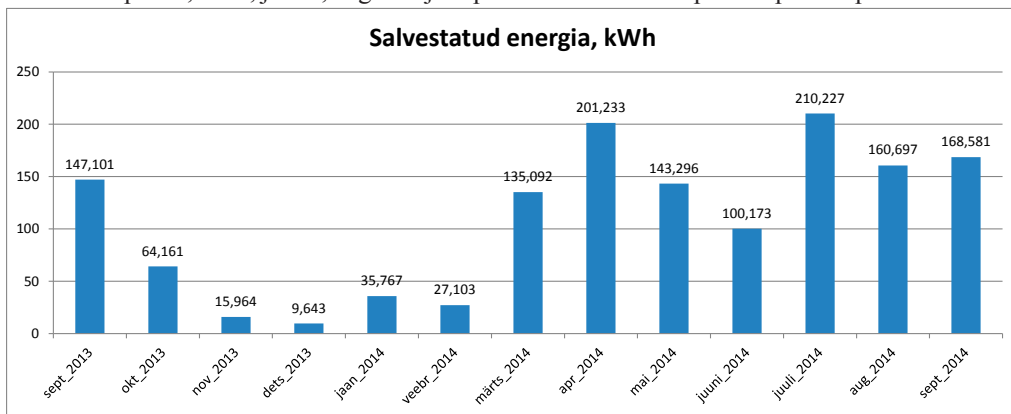
Käesolevas artiklis kirjeldatakse Eesti Maaülikooli Tehnikainstituudi katusel asuva tasapinnalise päikesepaneeli töö tulemusi perioodil 2013. aasta sügis kuni 2014. aasta suvi. Kirjeldatud on ka paneeli kasutamisel esinenud probleeme. Esitatu alusel saab teha järeldusi päikesepaneeli töö paremaks korraldamiseks.

Märksõnad: taastuvad energiaallikad, päikesepaneel, päikeseenergia akumulierimine.

Energia salvestumine

Kui lähtuda kuude kaupa esitatud andmete kokkuvõttest (joonis 1), siis vaadeldaval ajavahemikul oli kaks eriti päikesepaistelisi kuud – aprill, juuli – ja üks keskmisest pilvisem kuu – juuni. Vaadeldaval perioodil salvestati energiat akupaaki kokku 1271 kW·h.

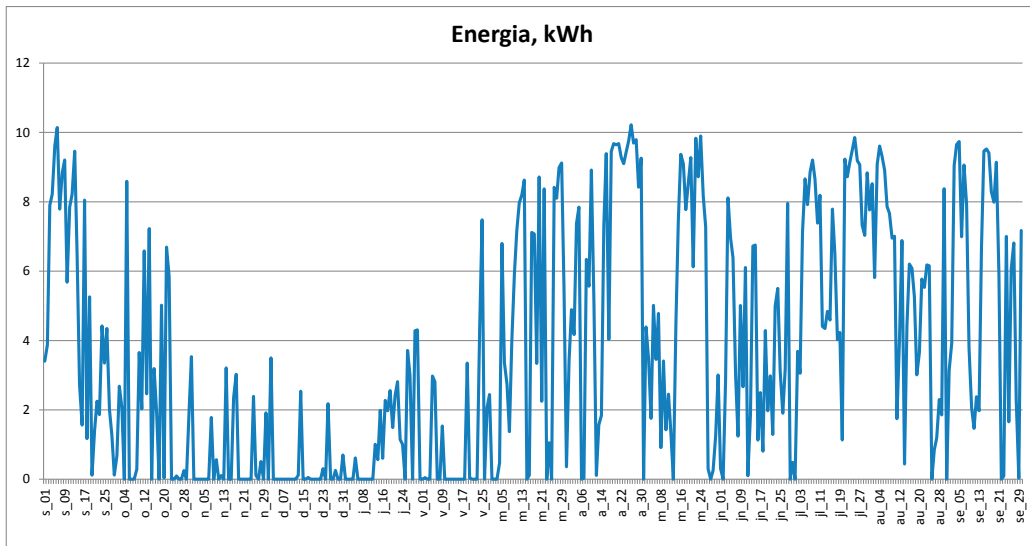
Paremini saab aga olukorda hinnata graafikult, kus energia salvestus on esitatud päevakaupa (joonis 2). Sellelt graafikult nähtub meie regioonile iseloomulik päikesepaiste juhuslikkus. Vaadeldava ajavahemiku jooksul on esinenud kestvamad päikeselised perioodid aprillis, mais, juulis, augustis ja septembris. Halvemad päevad päikesepaneelide



Joonis 1. Tehnikainstituudi katusel olevas 2,5 m² päikesepaneelis neeldunud energia salvestus akupaaki 1. sept 2013 kuni 30. sept 2014 kuude lõikes

Figure 1. Accumulation of solar energy, per month, at the solar panel located on the roof of the Technical Institute, Estonian University of Life Sciences, in the time period from 1 September 2013 to 30 September 2014

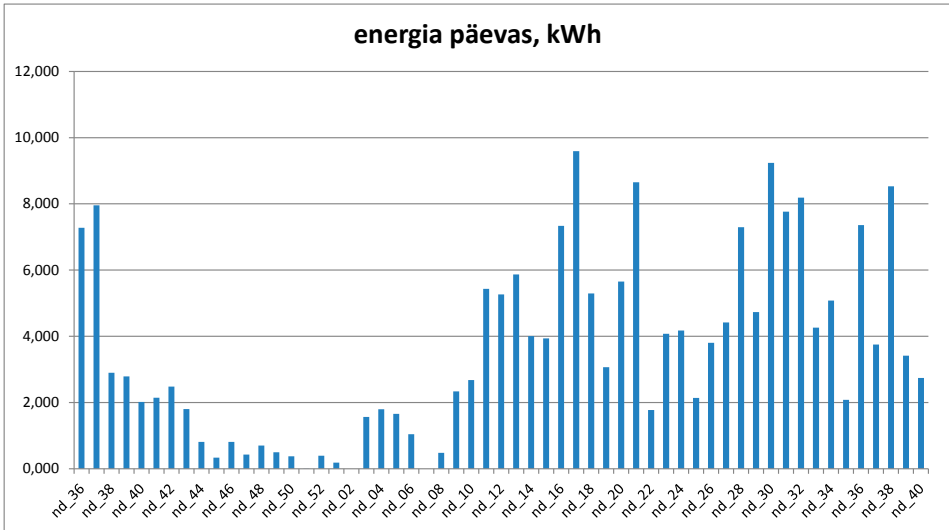
kasutajatele olid mai alguses ja juunis. Kuna energia kogutakse akupaaki sooja vee näol ning tarbimine ja salvestamine võivad olla ajaliselt nihkes, siis ehk kirjeldab seda mingil määral joonis 3, millel on näha päevade keskmised salvestunud energiad nädala kestel. Need numbrid saadi, kui liideti nädala kestel salvestatud energia ning see summa jagati nädalapäevade arvuga.



Joonis 2. Tehnikainstituudi katusel olevas 2,5 m² päikesepaneelis neeldunud energia salvestus akupaaki 1. sept 2013 kuni 30. sept 2014, arvestatuna päevade kaupa

Figure 2. Accumulation of solar energy, per day, at the solar panel located on the roof of the Technical Institute of Estonian University of Life Sciences in the time period from 1 September 2013 to 30 September 2014

Viimasest graafikust on näha, et ainult ligikaudu pooltel nädalatel aastas salvestub energiat akupaaki üle 4 kW·h päevas, mis tõstab vee temperatuuri 16 kraadi võrra päevas ehk viie päevaga 80 kraadi. Kui siseneva vee temperatuur on 8 °C, siis soojuskadude puudumisel tõuseks vee temperatuur 88 °C-ni. 88 °C pole otstarbekas, sest kõrgemal veetemperatuuril on soojuskaod suuremad ja suur osa salvestunud energiast soojendaks akupaagi mitte kõige parema soojusisolatsiooni tõttu paaki ümbritsevat õhku. Tarbevees elavate mikroorganismide elutegevuse pärssimiseks piisab eeskirjade kohaselt temperatuurist, mille juures orgaaniline aine laguneb. Enamasti loetakse niisuguseks temperatuuriks 52 °C. Sellise temperatuurini tõuseb 200 liitrit 8 °C algtemperatuuriga vett 11 kW·h salvestumisel. See toimub keskmiselt kolme päevaga, kui päevas salvestub 4 kW·h, kusjuures pole arvestatud soojuskadusid. Kuna kõrgema temperatuuriga keha kaotab alati ümbritsevasse keskkonda energiat, saab kadusid vähendada soojusisolatsiooni tõhustamisega, kus soojuskaod vähenevad pöördvõrdeliselt soojusisolatsiooni



Joonis 3. Tehnikainstituudi katusel olevas 2,5 m² päikesepaneelis neeldunud keskmine päevane energiasalvestus akupaaki 1. sept 2013 kuni 30. sept 2014, arvestatuna nädalate kaupa
 Figure 3. Accumulation of solar energy, per week, at the solar panel located on the roof of the Technical Institute of Estonian University of Life Sciences in the time period from 1 September 2013 to 30 September 2014

soojustakistusega. Soojusisolatsiooni lisamisel tuleb vaid arvestada, et isolatsiooniga ei tohi katta reguleerimisseadmistikku, mille elektroonika töötemperatuur võib sel puhul tõusta avariilise väärtuseni. Kui 200-liitrise akupaagi vee soojendamiseks oleks ühe 2,5 m² paneeli asemel kasutatud kahte, siis esitatud andmetest lähtuvalt oleks vee temperatuur paagis 3 päeva energiasalvestuse tulemusena tõusnud üle 52 °C tervelt 39 nädalal. Vajalikust vähem salvestus energiat 2013. aasta viimasel 9 nädalal ja 2014. aasta esimesel kahel ning 6. ja 7. nädalal.

Keskkonnamõjud

Soojuskadude määra mõjutab ka soojuskandja torustiku soojusisolatsioon. Seoses torustiku keerulise ruumilise paiknemisega, mis seisneb arvukates painetes, oli torustikule keeruline kaitsekesta paigaldada. Kaitse puudumise tõttu tekkis probleem: torustiku isolatsiooni hakkasid kahjustama linnud (joonis 4).

Kahjustusi ei olnud mitte ainult musta värvusega soojuskandja isolatsioonil, vaid ka valge isoleerlindiga juba parandatud kohtadel (joonis 5). Ilmselt meelitasid linnud kohale soojenenud isolatsioonil asuvad putukad, nagu näha joonisel 5. Eriti suur huvi oli lindudel soojusisolatsiooni vastu, mille ülemise kaitstva katte all asus soojustusvill (joonis 6).



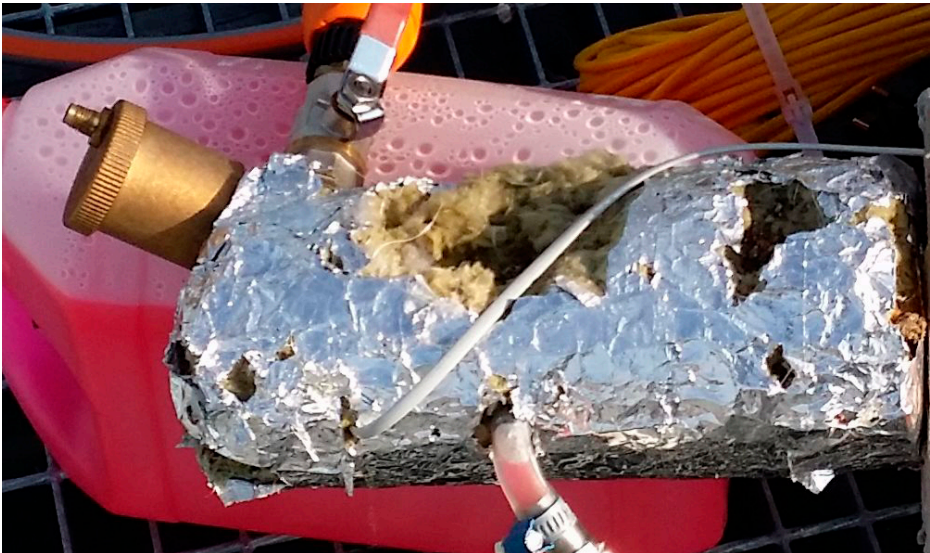
Joonis 4. Lindude poolt kahjustatud soojuskandja toru isolatsioon
Figure 4. The insulation of the heat carrier pipe has been damaged by birds



Joonis 5. Lindude poolt kahjustatud juba eelnevalt parandatud soojuskandja toru isolatsioon
Figure 5. The insulation of the heat carrier pipe which was previously repaired has been damaged by birds

Arvatavasti kasutavad linnud seda villa pesamaterjalina. Huvitav on märkida, et punast värvi isoleerlindiga kaetud aladel lindude kahjustusi ei esinenud.

Vähema mõjuga soojusprotsessidele, kuid seda mõjuvam väljanägemisele oli lindude poolt tekitatud sõnnik (joonis 7). Sellise olukorra vältimiseks oleks mõttekas paigaldada paneeli ülemisse serva elemendid, mis takistavad linde sinna laskumise eest.



Joonis 6. Lindude poolt tekitatud kahjustus fooliumkatele
Figure 6. Damage of the aluminium foil caused by birds



Joonis 7. Lindude poolt „kai-
nistatud“ päikesepaneel
Figure 7. Birds have 'deco-
rated' the solar panel

Kokkuvõte

Artiklis on esitatud Eesti Maaülikooli Tehnikainstituudi katusele paigaldatud 2,5 m² tasapinnalise päikesekollektori töötulemuste kokkuvõte ajavahemiku 01. sept 2013 kuni 01. sept 2014 kohta. Kokku salvestus energiat vaatlusalusel perioodil 1271 kW·h. Ajavahemikul 01. okt 2013 kuni 30. sept salvestus akupaaki 1124 kW·h ja seda on 2,5% vähem kui 1153,42 kW·h, mis salvestus eelmisel vaatlusperioodil 4 päeva lühemal ajavahemikul. Kui lugeda mõõtmistäpsuseks 2,5%, siis saab järeldada, et kahel võrreldud aastal salvestus akupaaki praktiliselt võrdne kogus energiat. Artikli põhjal saab teha järgmised järeldused.

Akupaagile oleks kasulik lisada täiendavat soojusisolatsiooni. See võimaldaks koguda akupaaki mitme päeva energia väiksemate soojuskadudega. Täiendava soojusisolatsiooniga ei tohi katta elektroonilist reguleerimisseadmestikku.

Kaod akupaagist sõltuvad selles sisalduva vee temperatuurist. On otstarbekas kasutada madalama temperatuuriga vett – ei ole mõistlik vee tarbimist piirata eesmärgil, et akupaagis temperatuur kõrgemale tõuseks.

Väliskeskkonnas on vaja soojuskandja torud lindude eest tugeva kattega kaitsta. See kate peab olema vastupidav ka päikese ultraviolettkiirguse toimele. Soojuskadusid vähendaks ka soojuskandja torude täiendav soojusisolatsioon.

Päikesepaneelid on ilma abinõusid kasutusele võtmata kaitsetud lindude sõnniku eest. Kuid vihm suudab sõnniku jäljetult eemaldada ning määrdunud paneelide energia neelamise võime oluliselt ei vähene.

Kui kasutada ühe paneeli asemel kahte, siis oleks tagatud tarbimiskõlbliku temperatuuriga soe vesi 75% päevadest aastas. Novembris ja detsembris oleks vee küllaldane soojenemine haruldane.

**OPERATION OF THE SOLAR PANEL LOCATED ON THE ROOF OF THE
ESTONIAN UNIVERSITY OF LIFE SCIENCES FROM 01. SEPT. 2013 TO 30.
SEPT. 2014**

Veli Palge, Margus Arak, Erkki Jõgi

In this paper, we present data that summarizes the operation of the solar panel located on the roof of the Estonian University of Life Sciences in the time period between 1 September 2013 to 30 September 2014. The total amount of energy saved over the period is 1271 kWh. But during the period 1 Oct 2013 to 30 Sept 2014, 1124 kWh was stored in the tank, and this is 2,5% less than the 1153,42 kWh saved during the previous period. If we take the measurement accuracy to be 2,5%, then the amounts saved over the two periods can be regarded equal. From the cases presented in this article, we can draw the following conclusions.

It would be beneficial to add more insulation on the surface of the storage tank. This would allow to save energy at smaller losses of thermal energy. Extra thermal insulation should not cover the electronic control unit.

Losses from the storage tank depend on the temperature of the water contained therein. It would be wise to use water at lower temperatures, or, in other words, it does not make sense to limit use of water with the purpose of raising its temperature.

The external heat carrier pipes must be protected against birds with strong coating. This coating must be resistant to solar ultraviolet radiation. Heat losses from the heat carrier can be reduced by an additional thermal insulation of pipes.

Solar panels are vulnerable to the manure of birds. However, rain can remove manure without leaving any traces. The energy-dissipating capacity is not significantly reduced for panels covered with manure.

If two panels were used instead of a single one, hot water at a temperature suitable for consumption would be ensured for 75% days per year. It would be rare to have hot water in November and December.

ENERGIA LÕPPTARBIMISEST TULENEVAD CO₂ HEITKOGUSED TARTU LINNA NÄITEL

Jaanus Uiga^{1,2}, Erkki Jõgi¹, Alo Allik¹, Andres Annuk¹, Martin Kikas²

¹Eesti Maaülikooli tehnikainstituut, Fr. R. Kreutzwaldi 56, Tartu 51014

²Tartu Regiooni Energiaagentuur, Riia 181a, Tartu 51014

jaanus.uiga@emu.ee

Annotatsioon

Energia kasutamist riigis kui tervikus saavad mõjutada kohalikul tasandil kehtestatud eesmärgid. Nende saavutamiseks rakendatavate meetmete tulemuslikkust peab mõõtma. Mõõdikute ning nende jälgimissüsteemi (-struktuuri) olemasolu on tähtis, sest eesmärgid seatakse sageli pikaajalistele protsessidele ning tegevustele, mille tulemusi on raske ette näha. Asjakohaste ning mõõdetavate indikaatorite olemasolu võimaldab jälgida eesmärkide täitmist ning rakendatud meetmete mõju. Seeläbi saab tuvastada valitud suundumuste kitsaskohti ning võimalikke kõrvalekaldeid prognoositust. Sealjuures on tarbimisandmete tuvastamine ning õigele kujule viimine omavalitsustele, kus energeetikaharidusega töötajad sageli puuduvad, üks keerulisemaid ülesandeid. Olukorra muudab keerulisemaks asjaolu, et energiavaldkonna statistikat avaldatakse põhiosas vaid riigi kui terviku kohta. Käesolevas artiklis kirjeldatakse regulaarselt kogutavaid energiatarbimise andmeid kohalikes omavalitsustes ning nende kasutamise võimalusi energiavaldkonna planeeringute koostamisel ning eesmärkide seadmisel.

Märksõnad: CO₂, energia lõpptarbimine, energiaplaneerimine, energiamajandus, kohalik omavalitsus, Tartu linn.

Sissejuhatus

EL-i esimese kliima- ja energiameetmete paketiga, mis võeti vastu 2009. aastal, sätestati, et Euroopa Liidu liikmesriikides tuleb rakendada meetmeid, vähendamaks kasvuhoonegaaside (KHG) heitkoguseid, suurendamaks taastuvenergia osakaalu energia lõpptarbimises ning parendamaks energiatõhusust. 2012. aastaks oli 20%-lisest eesmärgist KHG-heitme vähendamisest saavutatud 18%, sealjuures oli taastuvenergia osakaal energia summaarsest lõpptarbimisest suurenenud 13%-ni (2020 sihttase vähemalt 20%) (Euroopa Komisjon 2014).

Kuigi eespool kirjeldatust saab järeldada, et nn 20-20-20 eesmärkide täitmine on ootuspärasel graafikus, ei saa nimetatud asjaolu võtta kui põhjendust vähendada energiasäästu- ning taastuvenergia-alaseid tegevusi. Energiavaldkonnast tuleneva kliimamõju vähendamine on üks EL-i põhisuundumusi ka pärast 2020. aastat. Euroopa Komisjoni teatise „Energia tegevuskava aastani 2050“ kohaselt peaks EL muuhulgas tervikuna

vähendada CO₂ heidet energiatootmisest 2050. aastaks 80...95% võrreldes 1990. aasta tasemega. Järjest ambitsioonikamate eesmärkide saavutamine eeldab liikmesriikidelt (sh Eestilt) senisest mahukat planeerimist ning suuremat panust ja pühendumist eesmärkide täitmisesse.

Kui riiklikul tasandil on Eestis seatud mitmeid eesmärke seoses taastuvenergia osakaalu, energia lõpptarbimise ning KHG-heitmetega, siis kohalikul tasandil, kus energia lõpptarbijad paiknevad, energiavaldkonna planeeringutega seniajani suuremahuliselt tegeletud ei ole. Riiklikud arengukavad keskenduvad riigi kui terviku edendamisele ning seetõttu ei saa nendes suuremahuliselt arvestada piirkondade eripäradega. Riiklikud eesmärgid ning rakenduskavad ei ole täidetavad ilma kohalike omavalitsuste panuseta ning seeläbi kohaliku tasandi tegevustel märkimisväärne roll energiavaldkonna suundumuste täitmisel.

Energiamajandus ning CO₂ heitkogused

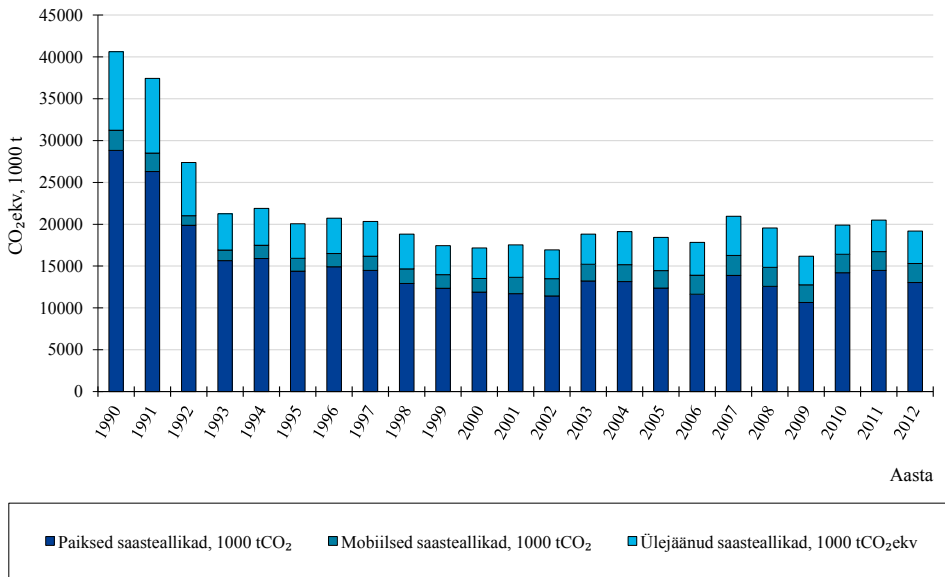
Mitmesuguste EL-i direktiivides ning strateegiadokumentides sätestatu põhjal võib järeldada, et Euroopa Liit on võtnud selge suundumuse vähese CO₂ heitmega majanduse suunas, mille raames edendatakse ja soodustatakse ka tulevikus nii taastuvenergiaallikate laialdasemat kasutuselevõttu kui ka hoonete energiatõhususe suurendamise alaseid tegevusi. Sealjuures on tähtis eesmärkide täitmiseks rakendatavate tegevuste tulemuslikkuse mõõtmine. Üheks levinuimaks sellelaadseks mõõdikuks on Euroopa Liidus CO₂ ning teiste kasvuhoonegaaside heitkogused.

Eesti seadusandluse järgi on kasvuhoonegaasideks süsinikdioksiid (CO₂), metaan (CH₄), diämmastikoksiid (N₂O), fluorosüivesinikud (HFC-d), perfluorosüivesinikud (PFC-d) ja väävelheksafluoriid (SF₆) (Riigikogu, 2014). Kasvuhoonegaaside heitkoguseid väljendatakse süsinikdioksiidi ekvivalentidena.

Süsinikdioksiidi ekvivalent (CO₂ekv) on üks tonn CO₂ või muud kasvuhoonegaasi, mis on globaalse soojenemise potentsiaali kasutades teisendatud süsinikdioksiidi koguseks. Globaalse soojenemise potentsiaal väljendab omakorda heitgaasi kliimamõju, mis näitab, mitu korda mingi kasvuhoonegaasi üks molekul on soojuste tagasipeegeldamisvõime poolest efektiivsem kui süsinikdioksiidi molekul. KHG emissioonide vähendamise alaste eesmärkide seadmise ning tegevuste rakendamise peaeesmärgiks on inimtegevustest põhjustatud kliimamuutuste pidurdamine (Espenberg jt 2013).

Eestis paisati 2012. aastal õhku 19,19 mln t kasvuhoonegaase (CO₂ ekvivalentina). Sealjuures moodustasid CO₂ heitkogused 89% kõigist kasvuhoonegaaside heitkogus-

test. Süsihappegaasi heitkogused paiksetest (katelseadmed jms) ning mobiilsetest (sõidukid) saasteallikatest moodustasid kõigist heitkogustest 79,7% (joonis 1).



Joonis 1. Kasvuhoonegaaside heitkogused Eestis 1990...2012 (Keskkonnaministeerium 2014)
Figure 1. Greenhouse Gas Emissions in Estonia 1990...2012 (Keskkonnaministeerium 2014)

Kuivõrd paiksetest ning mobiilsetest saasteallikatest tulenevad KHG heitkogused on otseselt seotud muundatud või primaarenergiaga, võib väita, et enamik Eesti kasvuhoonegaaside heitkogustest tuleneb energia tarbimisest ja tootmisest ning seeläbi võib KHG emissioone käsitleda kui Eesti energiamajanduse ressursisäästlikkuse ja keskkonnasõbralikkuse põhilist indikaatorit.

Perioodil 1990...2012 on Eesti KHG heitkogused kahanenud ~47,2%. Selle peamiseks põhjuseks oli Nõukogude Liidu lagunemise järgselt Eestis lõppenud suurtootmise vähenemine (Keskkonnaministeerium 2014). Sellegipoolest on kasvuhoonegaaside heitkoguste vähendamise seonduvad tegevused Eesti prioriteetideks ka järgnevatel aastatel. Keskkonnaministeeriumi prognooside kohaselt vähenevad aastaks 2020 praeguste meetmete jätkumisel KHG heitkogused 2010. aastaga võrreldes 14...17%. Sealjuures on soojuste ja elektri tootmisest tulenevate emissioonide vähenemiseks prognoositud 44...45% (Keskkonnaministeerium 2013).

„Eesti pikaajalise energiamajanduse arengukava aastani 2030“ (ENMAK 2030) alusüritingute tulemustest nähtub, et aastaks 2030 on võimalik vähendada süsihappegaasi hei-

det energeetikasektorist mitmesuguste stsenaariumite kombinatsioonide realiseerumise korral 4,6...11,7 mln t/a (Eesti Arengufond 2014). Seega on Eestil väga suur potentsiaal fossiilkütuste kasutamisest tuleneva keskkonnamõju vähendamiseks. Seda potentsiaali saab ära kasutada vaid keskvalitsuse, erasektori ning kohalike omavalitsuste tegevuste koosmõjus.

Kasutatavad andmed

Kohalike omavalitsuste jaoks Eestis koostatud energiaplaneerimise juhendmaterjalid („Energeetika planeerimise käsiraamat kohalikele omavalitsustele“ ning „Energiasäästtu tehnilised soovitusel kohalikele omavalitsustele“) pärinevad selle sajandi eelmise kümnendi keskpaigast ning seega ei ole neis kajastatud kõik uuemad energiavaldkonna suundumused, võimalikud meetmed ja mõõdikud tegevuste tulemuslikkuse hindamiseks ning meetodika andmete kogumiseks.

Üks kaasaegsemaid KOV-idele suunatud energiaplaneerimise käsiraamatuid, „How to Develop a Sustainable Energy Action Plan (SEAP) – Guidebook“ on välja antud linnapeade pakti raames. Nimetatud juhendmaterjal on koostatud toetamiseks ning soodustamiseks jõupingutusi säästva energiapoliitika printsiipide rakendamiseks kohalikul tasandil (European Commission 2010).

Energia lõpptarbimisest tulenevate CO₂ heitkoguste leidmiseks ning analüüsimiseks tuleb:

1. Välja selgitada:
 - a) regulaarselt kogutavad energia kasutamise andmed või lähteandmed energia tarbimismahtude hindamiseks ning
 - b) süsihappegaasi eriheitetegurid.
2. Viia tarbimisandmed vajalikku (võrreldavasse) formaati.

Tuleb arvestada, et kohaliku omavalitsuse territooriumil tekkivate CO₂ heitkoguste hindamisel on otstarbekas kasutada regulaarselt kogutavaid tarbimisandmeid, võimaldamaks arvutuste hilisemat kordamist ning tulemuste võrdlemist. Seetõttu on käesoleva artikli käsitlusest (tabel 1) jäänud näiteks välja maagaasi- või kaugküttevõrguga ühendamata eratarbijad. Kui tulevikus hakatakse kodumajapidamistes kasutatavate kütuste koguste kohta regulaarselt andmeid koguma (või küsitluste põhjal hindama), on võimalik ka neid süsinikdioksiidi heitkoguste hindamisel kasutada.

Tabel 1. Regulaarselt kogutavate energiatarbimisandmetega sektorid ning tarbijategrupid
 Table 1. Energy data that can be obtained on regular basis

Valdkond	Tarbija	Tarbimisandmete võimalikud allikad
Kütused transpordisektoris	Sõiduautod	Uuringu „Autopargi läbisõit Eestis“ tulemused
	Ühistransport	Kohaliku omavalitsuse valduses olevad andmed
	Transpordivahendid KOV-i omanduses	
Kütused soojuste tootmisel	Kodutarbija	AS Gaasivõrgud
	Tööstustarbija	Keskkonnaagentuur, AS Gaasivõrgud
	Kommertsettevõtted	
Kaugküttesoojuste kasutamine	Elamusektor	Soojustevõtja, kohaliku omavalitsuse valduses olevad andmed
	Eelarvelised asutused	
	Asutused	
Elektri kasutamine	Kodutarbija	Elektrilevi AS
	Äritarbija	

Kohaliku tasandi energiavaldkonna planeeringute koostamisel on kitsaskohaks andmete kättesaadavus. Eesti riikliku statistika haldaja ning koostaja, Statistikaameti, poolt avaldatavad energiavaldkonna andmed esitatakse üldjuhul riigi kui terviku kohta. Kohaliku omavalitsuse tasandi andmetest on olemas andmed Tartu ja Tallinna kütuste kasutamise ning elektri ja kaugküttesoojuste tarbimise kohta (Statistikaamet 2014). Sealjuures tuleb märkida, et nimetatud andmed on ettevõtete juriidilise aadressi põhised, mistõttu ei ole tagatud, et kogu kajastatud kütuste kasutamine toimus just selle omavalitsuse territooriumil. Energia ning kütuste kasutamise kohta ülejäänud Eesti omavalitsusüksustes regulaarselt statistikat ei koostata.

Arvutusmetoodika

Süsihappegaasi heitkoguste arvutamisel saab lähtuda kasutatud kütuse kogusest, kütuse kütteväärtusest ning kütuse süsihappegaasi eriheitest. Selleks saab kasutada CO₂ heitkoguste arvutamise põhivalemit (IPCC, 2006)

$$M_{CO_2} = 10^{-3} \cdot B \cdot Q'_a \cdot q_{CO_2} \quad (1)$$

- kus M_{CO_2} on kütuse põlemisel välisõhku eralduv süsihappegaas tCO₂;
- B – kasutatud kütuse kogus: tahked kütused t, gaasilised 1000 m³;
- Q'_a – kütuse alumine kütteväärtus; tahked kütused GJ/t, gaasilised GJ/(1000 m³);
- q_{CO_2} – kasutatud kütuse süsihappegaasi eriheide tCO₂/TJ.

Eelnimetatud valemi kasutamise muudab keerulisemaks asjaolu, et kohaliku omavalitsuse territooriumil kasutatakse lisaks kütustele ka muundatud energiat (elekter, kaugküttesoojus). Eelnimetatud energiakoguste kasutamise süsihappegaasi heitkoguste arvutamiseks on vaja teada energia tootmisel kasutatavate kütuste koguseid. Kuivõrd soojus liigub kõrgema temperatuuriga keskkonnast madalama temperatuuriga keskkonda ning soojusvool muutub temperatuuride vahe suurenedes intensiivsemaks, muutub ka hoonete soojusvajadus kütteks seoses välisõhu temperatuuri muutumisega. Seega on otstarbekas reaalse aasta soojuse tarbimine viia üle võrreldavale baasaastale (normaalaasta tarbimisele).

Mootorikütuste kasutusmahtude kohta omavalitsuste territooriumil andmed puuduvad ning seetõttu tuleb mahtude tuvastamiseks kasutada läbitud hinnangulisi sõidukikilomeetreid ning sõidukite indikatiivseid kütusekulusid.

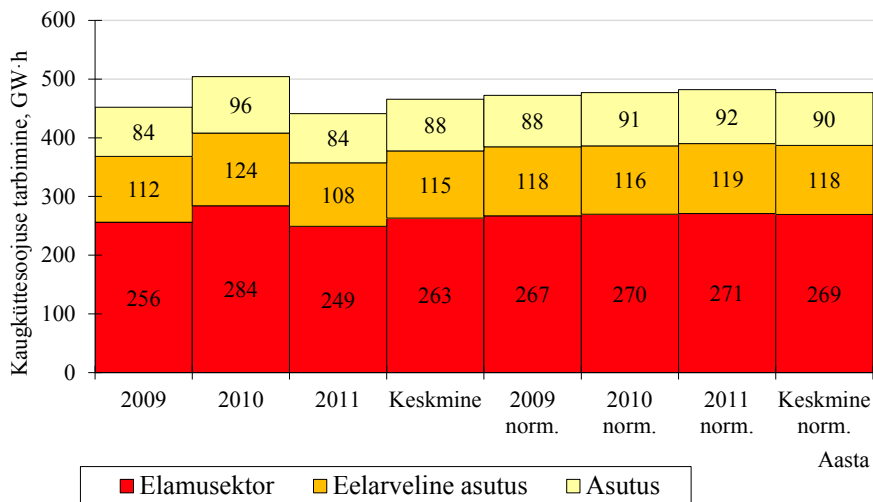
Täpsem info süsihappegaasi heitkoguste arvutamise põhivalemi kasutamise eripäradest kohaliku tasandi energiaandmete kasutamisel on leitav uuringust „Energia lõpptarbimisest tulenevad CO₂ heitkogused Tartu linna näitel“ (Uiga 2014).

Tulemused ja arutelu

Eespool kirjeldatud meetodikat rakendati Tartu linna näitel, mille jaoks tulenevalt andmete kättesaadavusest valiti analüüsitavaateks aastateks 2009...2011. Meetodika alusel kogutud andmed ning arvutustulemused moodustasid kümneid arvutustabeleid. Kõiki neid siinjuures ruumipuudusel ei kirjeldata ning tuuakse esile vaid põhitulemused. Seetõttu on kogutud andmed koondatud ühtsesse andmetabelisse (tabel 2), mille alusel saab hinnata energia kasutamise ning süsihappegaasi heitkoguste struktuuri Tartu linnas aastatel 2009...2011.

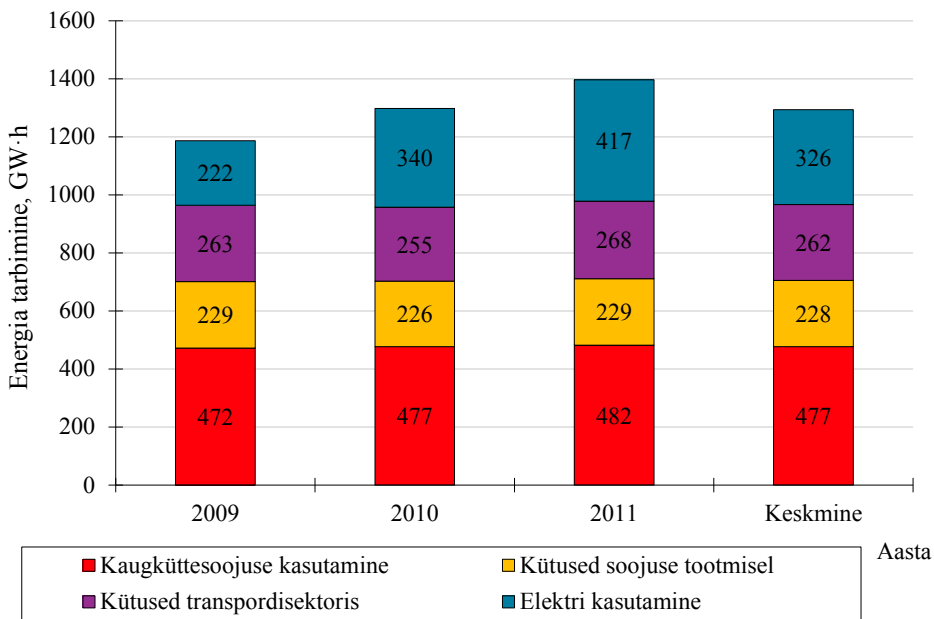
Tartus tegutses ajavahemikul 2009...2011 kaks kaugkütte-ettevõtet: Fortum Tartu AS ning Eraküte AS. 2013. aasta lõpust on kõigi Tartu kaugküttevõrkude omanik valdusettevõtte Fortum Tartu AS. Summaarsed kaugkütte tarbimismahud jäid aastatel 2009...2011 vahemikku 441..504 GWh/a (joonis 2). Kraadpäevadega taandamise järgselt muutusid tarbimismahud märkimisväärselt ühtlasemaks (472...482 GWh/a).

Andmetabelist (tabel 2) nähtub, et Tartus kasutati aastatel 2009...2011 energiat 1,18...1,40 TWh/a ulatuses. Sealjuures moodustas soojuse kasutamine (kütused + kaugküttesoojus) 51...59% summaarsest energia lõpptarbimisest. Transpordikütuste kasutamine jäi vahemikku 19...22% ning elektri tarbimine 19...30% summaarsest energia lõpptarbimisest.



Joonis 2. Tegelik ning taandatud kaugküttesoojuse kasutamine Tartu linna kaugküttevõrkudes 2009...2011 (Fortum Tartu AS 2013; Eraküte AS 2013)
 Figure 2. Actual and normalized District Heating usage in Tartu 2009...2011 (Fortum Tartu AS 2013; Eraküte AS 2013)

Energiatarbimise struktuuri Tartu linnas 2009...2011 saab näha jooniselt 3.



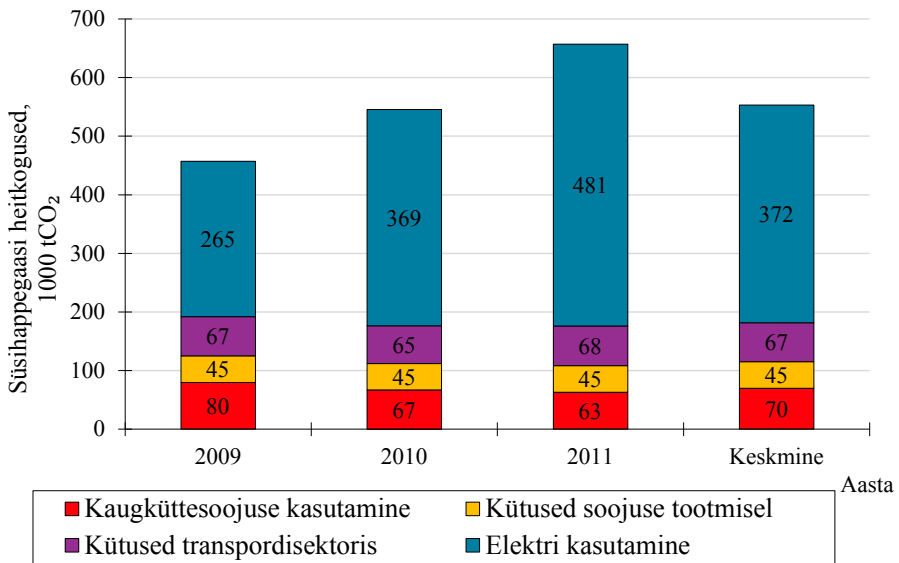
Joonis 3. Energia lõpptarbimine Tartu linnas 2009...2011
 Figure 3. Final Energy Consumption in Tartu 2009...2011

Tabel 2. Energia lõpptarbimine Tartu linnas 2009...2011
Table 2. Final Energy Consumption in Tartu 2009...2011

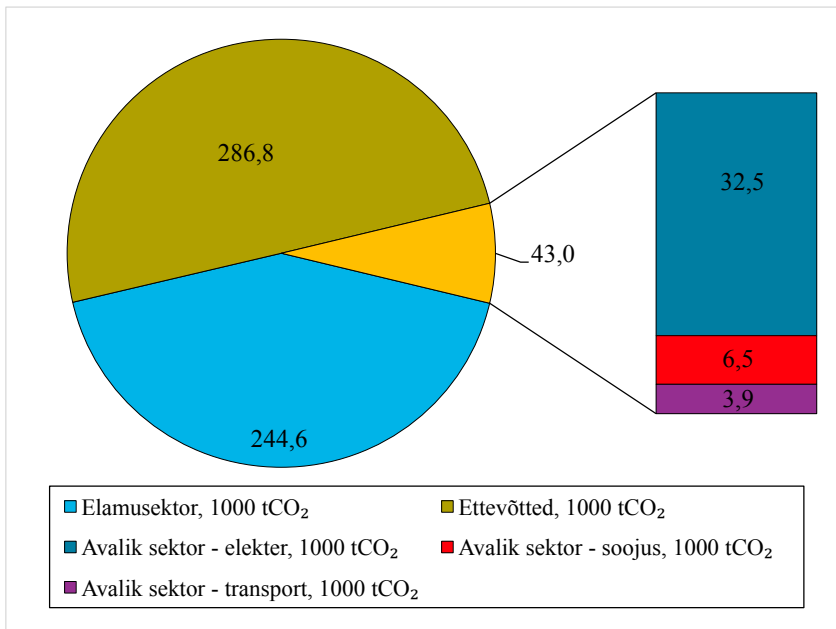
Valdkond	Tarbija	2009		2010		2011		Keskmine	
		Tarbimine, GWh	CO ₂ , 1000 t	Tarbimine, GWh	CO ₂ , 1000 t	Tarbimine, GWh	CO ₂ , 1000 t	Tarbimine, GWh	CO ₂ , 1000 t
Kütused transpordisektoris	Sõiduautod	248,4	62,9	240,3	60,8	252,1	63,9	246,9	62,5
	Ühis-transport	14,8	4,0	14,8	4,0	15,2	3,9	15,0	4,0
	Transpordivahendid KOV-i omanduses	0,17	0,04	0,15	0,04	0,15	0,04	0,15	0,04
Kütused soojuse tootmisel	Kodutarbijad	115,6	22,9	111,0	22,0	114,1	22,6	113,5	22,5
	Tööstustarbija	58,1	11,5	62,6	12,4	59,8	11,8	60,2	11,9
	Komerts-ettevõtted	55,3	10,9	52,1	10,3	55,4	11,0	54,3	10,7
Kaugküttesoojuse kasutamine	Elamu-sektor	267,1	36,8	269,7	37,0	270,9	30,7	269,2	34,9
	Eelarvelised asutused	117,6	16,9	116,5	14,7	119,0	12,3	117,7	14,6
	Asutused	87,6	12,2	90,7	12,1	92,1	10,1	90,1	11,5
Elektri kasutamine	Kodutarbijad	97,6	116,4	112,9	122,7	116,9	134,6	109,1	124,6
	Äritarbija	124,6	148,6	226,7	246,3	300,6	346,0	217,3	247,0
Kokku		1186,9	443,2	1297,6	542,4	1396,3	647,0	1293,6	544,2

Kui kaugküttesoojuse ning kütuste kasutamine soojuse tootmiseks moodustas 51...59% energia lõpptarbimisest Tartu linnas, siis 58...73% süsihappegaasi heitkogustest Tartu linna territooriumil tuleneb elektritarbimisest (joonis 4).

Eelnevalt kirjeldatud olukord on põhjustatud asjaolust, et enamik soojuseenergiat toodeti süsinikuneutraalsena käsitletavat kütust – biomassi – kasutades, kuid valdav osa Eestis kasutatavast elektrist toodeti põlevkivi kasutades.



Joonis 4. Energia lõpptarbimisest tulenenud CO₂ heitkogused Tartu linnas 2009...2011
 Figure 4. CO₂ emissions resulting from Final Energy Consumption in Tartu City 2009...2011



Joonis 5. CO₂ heitkoguste jagunemine tarbijagruppide vahel Tartu linnas 2010. aastal
 Figure 5. CO₂ emissions from different consumer types in 2010 in Tartu

Jooniselt 5 nähtub, et energia kasutamisest Tartu linna haldushoonetes, tänavavalgustuses, linnavalitsuse sõiduautes ning linnasiseses ühistranspordis tekkis 7,5% 2010. aasta CO₂ heitkogustest. Seda 7,5%-list osa heitkogusest saab Tartu linn otseselt mõjutada (nt taastuvelektri kasutamise kriteerium elektrihangetes), ülejäänud CO₂ heitkoguseid saab Tartu linn mõjutada läbi tõhusa planeerimis- ja teavitustegevuse ning koostöös suurettevõtetega.

Kokkuvõte

Eestis on väga suur potentsiaal fossiilkütuste kasutamisest tuleneva keskkonnamõju vähendamiseks. Seda potentsiaali saab ära kasutada vaid keskkvalitsuse, erasektori ning kohalike omavalitsuste tegevuste koosmõjus. Kohalikul tasandil seatud eesmärgid ja rakendatavad meetmed mõjutavad suures mahus riigis kui tervikus toimuvat energia kasutamist. Eesmärkide täitmiseks rakendatavate meetmete tulemuslikkust tuleb mõõta. Mõõdikute ning nende jälgimissüsteemi (-struktuuri) olemasolu on tähtis, sest eesmärgid seatakse sageli pikaajalistele protsessidele ning tegevustele, mille tulemusi on raske ette näha. Asjakohaste ning mõõdetavate indikaatorite olemasolu võimaldab eesmärkide täitmist ning rakendatud meetmete mõju jälgida. Seeläbi saab välja selgitada valitud suundumuste kitsaskohti ning võimalikke kõrvalekaldeid prognoositust.

Üheks levinuimaks energiavaldkonna mõõdikuks on Euroopa Liidus CO₂ ning teiste kasvuhoonegaaside heitkogused, mida saab arvutada lähtudes kasutatud kütuse kogusest, kütteväärtusest ning süsihappegaasi eriheitest.

Kohaliku tasandi energiavaldkonna planeeringute koostamisel on kitsaskohaks andmete kättesaadavus ning kättesaadavate andmete analüüsimine ja töötlemine. Kohalike omavalitsuste territooriumitel toimuva energiatarbimise kohta koguvad regulaarselt kõige täpsemaid andmeid Keskkonnaagentuur, maagaasi ja elektri jaotusvõrkude ettevõtted ning kaugkütteeetevõtted. Kütteks tarvitava soojuste kasutusmahtude puhul on otstarbekas rakendada kraadpäevadega taandamist, elimineerimaks erinevate aastate temperatuurikõikumiste mõju. Transpordikütuste kasutamise hindamisel on otstarbekas kasutada sõidukite poolt läbitavaid hinnangulisi vahemaid aastase perioodi jooksul.

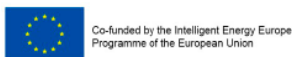
Rakendades tarbimisandmete kogumise ning energia tarbimisest tulenevate süsihappegaasi heitkoguste tuvastamise meetodikat Tartu linna energiakasutuse hindamiseks ajavahemikul 2009...2011, leiti, et nimetatud ajavahemikul tarbiti Tartus 1,2...1,4 TWh/a energiat, mille tulemusena tekkis 443 000...647 000 tonni CO₂/a. Suurim süsihappegaasi emissioon tulenes elektri kasutamisest (58...73% koguemissioonist), kuigi elekter

moodustas vaid 19...30% summaarsest energiakasutusest. See on tingitud asjaolust, et Eestis toodetakse elektrit põhiliselt põlevkivist. Aastaks 2020 on prognoositud, et elektritootmise CO₂ emissioon väheneb veelgi enam seoses efektiivsemate tehnoloogiate kasutuselevõetuga ning taastuvkütuste kasutamise suurenemisega. Seeläbi väheneb ka elektritarbimise osatähtsus kohaliku omavalitsuse territooriumil toimuvast energia kasutamisest tuleneva süsihappegaasi emissiooni põhjustamisel.

Tänuavaldused

Käesolev artikkel on valminud Intelligent Energy Europe (IEE) kaasrahastusega projekti „Meshartility“ raames. Artiklis kirjeldatud üldpõhimõtteid rakendati kuue Lõuna-Eesti omavalitsuse CO₂ heitkoguste lähteinventuuride koostamisel, millest saab lähemalt lugeda uuringust „Energia lõpptarbimisest tulenevad CO₂ heitkogused Tartu linna näitel“ (Uiga, 2014).

Autorid tänavad Keskkonnaagentuuri, Eesti Gaas AS-i, Elektrilevi AS-i, AS-i Fortum Tartu, AS-i Eraküte, MTÜ-d Tartu Regiooni Energiaagentuur ning Jõgeva, Tartu, Valga, Võru linnade ning Rõuge ja Vastseliina valdade töötajaid tõhusa koostöö eest tarbimisandmete väljastamisel.



Kasutatud kirjandus

- Eesti Arengufond. 2014. ENMAK 2030+ ajakava ja tegevused. Kättesaadav: http://www.energiatalgud.ee/index.php?title=ENMAK:Ajakava_ja_tegevused (31.08.2014)
- Espenberg, S., Kuhi-Thalfeldt, R., Lahtvee, V., Jüssi, M., Moora, H., Laht, J., Mander, Ü., Salm, J., Parts, K. 2013. Eesti võimalused liikumaks konkurentsivõimelise madala süsinikuga majanduse suunas aastaks 2050. Kättesaadav: http://www.energiatalgud.ee/img_auth.php/7/76/Eesti_CO2_2050.pdf (02.05.2014).
- Euroopa Komisjon. 2014. Kliima- ja energiapoliitika raamistik ajavahemikuks 2020–2030. –Euroopa Liidu Teataja. 22.01.2014, COM/2014/15 final, 1–20.
- European Commission. 2010. How to Develop a Sustainable Energy Action Plan (SEAP) – Guidebook. – Luxembourg: Publications Office of the European Union, 120 lk.
- IPCC – International Panel on Climate Change. 2006. – IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2. Energy. Kättesaadav: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html> (02.05.2014).
- Keskkonnaministeerium. 2013. Policies and Measures and Greenhouse Gas Projections. Report pursuant to Article 3(2) of Decision 280/2004/EC. Estonia. Kät-

- tesaadav: http://www.energiatalgud.ee/index.php?title=Pilt:Keskkonnaministeerium._Policies_and_Measures_and_GHG_Projections.pdf (31.08.2014).
- Keskkonnaministeerium. 2014. Greenhouse Gas Emissions in Estonia 1990–2012. National Inventory report. Draft. Kättesaadav: http://www.energiatalgud.ee/img_auth.php/4/45/Keskkonnaministeerium._Greenhouse_Gas_Emissions_in_Estonia_1990-2012.pdf (01.05.2014).
- Riigikogu. 2014. Välisõhu kaitse seadus. – Riigi Teataja. RT I, 23.12.2013, 72. Kättesaadav: <https://www.riigiteataja.ee/akt/123122013072?leiaKehtiv> (02.05.2014).
- Statistikaamet. 2014. KE07: Kütuste tarbimine kütuse liigi ja maakonna järgi. Kättesaadav: <http://pub.stat.ee/> (19.04.2014).
- Uiga, J. 2014. Energia lõpptarbimisest tulenevad CO₂ heitkogused Tartu linna näitel. – Tartu, Eesti Maaülikool, 77 lk.

CO₂ EMISSIONS RESULTING FROM FINAL ENERGY CONSUMPTION – A CASE STUDY OF SIX LOCAL MUNICIPALITIES OF SOUTHERN-ESTONIA

Jaanus Uiga, Erkki Jõgi, Alo Allik, Andres Annuk, Martin Kikas

National goals and targets cannot be attained without actions in the local level, where the end-users of energy are located. Therefore the actions and measures implemented in the Local Municipalities of Estonia have a significant impact in reaching the set targets in energy efficiency and GHG reductions.

In the current article the methodology for assessing the final energy consumption and the resulting CO₂ emissions in Estonian local municipalities was compiled and analysed. It was identified that due to lack of nationally gathered statistics on the local level, other databases have to be utilized in order to get reliable data that is available on regular intervals. These sources include The Estonian Environmental Agency, local district heating providers and the distribution network owners of natural gas and electricity. Data on transport fuels usage can be obtained by using vehicle kilometres analysis.

The methodology was used for identifying the final energy consumption and the resulting CO₂ emissions in Tartu City for the years 2009...2011. During that period, the energy consumption in the territory of the city was 1,2...1,4 TWh and 443 000...647 000 tCO₂ was emitted yearly. While electricity consumption amounted to 19...30% of the total final energy consumption, the resulting CO₂ emissions amounted to 58...73% of the total emissions. This is caused by the fact that most of Estonian electricity is produced from oil shale.

TEMPERATUURI MÕJU AURUGA LÕHKAMISE EELTÖÖTLUSMEETODI EFEKTIIVSUSELE BIOETANOOLI TOOTMISPROTSESSIS

Marti Tutt, Timo Kikas, Jüri Olt

Eesti Maaülikooli Tehnikainstituut, 51014 Tartu, Kreutzwaldi 56

Annotatsioon

Töö eesmärgiks oli uurida aurlõhkamise meetodi mõju lühaheina struktuurile ning glükoosi ja bioetanooli saagistele. Lisaks uuriti ka erinevatel temperatuuridel läbi viidud aurlõhkamisprotsessi mõju hüdrolyüsi efektiivsusele.

Töös valiti tooraineks lühahein, sest lühaniidud vajavad suure liigilise mitmekesisuse säilitamiseks regulaarselt niitmist. Eestis on ligikaudu 20 000 ha lühaniite, mis toodavad aastas üle 100 000 tonni biomassi. Kiuanalüüsi tulemused näitavad, et lühaheinal on kõrge ligniinisaldus (24,2%), kuid suhteliselt madal tselluloosisaldus (27,2%). Kõrge ligniinisaldus tähendab, et lühahein vajab enne hüdrolyüsi protsessi põhjaliku eeltöötlust. Lühaheina eeltöötlemiseks valiti aurlõhkamise meetod kombineerituna ensüümhüdrolyüsiga.

Suurim glükoosi- (234,6 g kg⁻¹) ja etanoolisaagis (115,7 g kg⁻¹ biomassi kuivaine kohta) saadi auruga lõhkamisel 200 °C juures. Kõige väiksem glükoosi- ja etanoolisaagis (vastavalt 83,8 g kg⁻¹ ja 19,8 g kg⁻¹) saadi auruga lõhkamisel temperatuuril 150 °C. Tulemused kinnitavad ka elektronmikroskoobiga tehtud pildid auruga lõhatud biomassist erinevatel temperatuuridel. Temperatuuril 150 °C töödeldud proovides on taimeraku struktuur endiselt terve, kuid temperatuuril 200 °C töödeldud proovides on taimeraku seinad hävinud ning lahti rebitud tselluloosikiud paljastunud.

Märksõnad: biomass, lühahein, glükoos, bioetanol, auruga lõhkamine.

Sissejuhatus

Bioetanol on maailmas kõige laialdasemalt toodetav biokütus (Global Renewable Fuels Alliance 2011). Suurem osa bioetanoolist toodetakse endiselt suhkruroost, maisist ja nisust, kuid lignotselluloosist biomassist toodetava bioetanooli osakaal kasvab kiirelt. Lignotselluloosist biomassist toodetud bioetanooli eeliseks traditsioonilise teraviljapiirituse ees on asjaolu, et etanooli tootmiseks saab ära kasutada kogu taime maapealse osa. See omakorda võimaldab saavutada suuremat efektiivsust ja optimaalset maakasutust. Lignotselluloosist biomassist etanooli tootmise miinusteks on väga

energiamahukas tootmisprotsess ning suuri investeeringuid nõudvad seadmed (Stevens jt 2004).

Lignotselluloosne biomass kujutab endast suurimat looduslikku ressursi vedelate biokütuste tootmiseks (Lin ja Tanaka 2006, Talebnia jt 2010). Kuna nõudlus nii biokütuste kui ka toidu järele on maailmas pidevalt suurenenud, siis on hakatud pöörama üha rohkem tähelepanu rohumaade majandamisele ning sealt kogutud biomassi kasutamisele (McKendry 2002, Heinsoo jt 2010). Eestis on ligikaudu 20 000 ha luhaniite, mis vajavad regulaarset niitmist, et säilitada suurt liigilist mitmekesisust (Kukk ja Sammül 2006). Need luhaniidud toodavad üle 100 000 tonni biomassi aastas (Heinsoo jt 2010). Siiani on sellele biomassile leidunud vähe rakendust, kuid luhahiin võiks olla sobiv tooraine näiteks bioetanooli tootmiseks.

Lignotselluloosse biomassi töötlemiseks on uuritud palju erinevaid eeltötlusmeetodeid. Praeguseks on maailmas üheks kõige laialdasemalt kasutatavaks eeltötlusmeetodiks auruga lõhkamine. Auruga lõhkamisel kuumutatakse biomassi veeauru keskkonnas temperatuuril 150–250 °C. Peale mõneminutilise inkubatsiooni kuuma veeauru keskkonnas toimub plahvatuslik rõhulangetus, mis muudab füüsikaliselt ja keemiliselt biomassi struktuuri ning koostist. Hemitelluloos laguneb, osa ligniini lahustub ning tselluloosi kiud rebitakse lahti, muutes need ensüümidele kergesti ligipääsetavaks (Cantarella jt 2004, Chen ja Zhang 2012).

Selle töö eesmärgiks oli uurida aurlõhkamismeetodi mõju luhahiina struktuurile ning glükoosi ja bioetanooli saagistele. Lisaks uuriti ka erinevatel temperatuuridel läbi viidud aurlõhkamisprotsessi mõju hüdrolüüsi efektiivsusele.

Materjalid ja meetodika

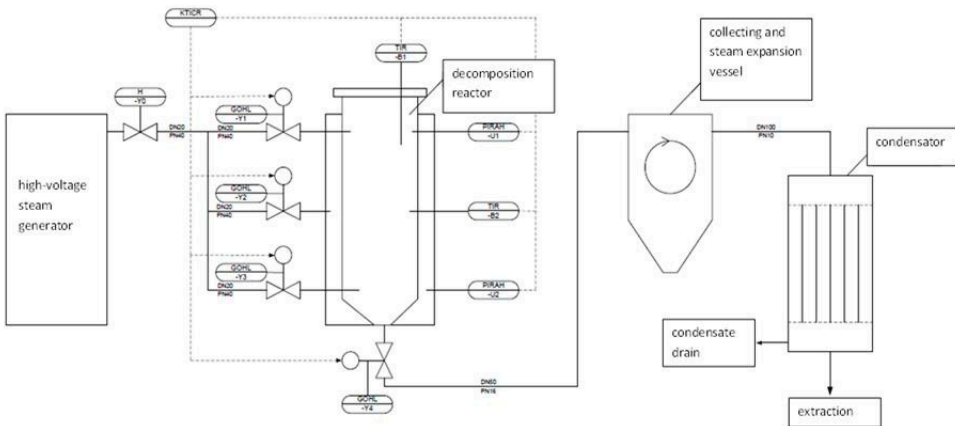
Biomass

Luhahiina proovid koguti juulis 2012. a Emajõe luhalt Tartumaal. Proovid kuivatati ja jahvatati osakeste suuruseni 1–3 mm ning hoiustati toatemperatuuril. Proovide kuivainesisaldus oli 90,4%.

Eeltötlus

Töös kasutati auruga lõhkamise eeltötlusmeetodit. Proovi suuruseks oli 900 g eelnevalt kuivatatud ja jahvatatud luhahiina, mida niisutati enne reaktorisse sisestamist 900 g destilleeritud veega. Proovide eeltötlamine teostati laboratoorse aurlõhkamisseadmega (joonisel 1) Ülem-Austria Rakendusülikooli laboris. Auruga lõhkamised toimusid

temperatuuride vahemikus 150–200 °C ning inkubatsiooniajaga 10–30 minutit. Seejärel kuivatati töödeldud materjali temperatuuril 40 °C, kuni saavutati kuivainesisaldus 95%.



Joonis 1. Laboratoorne auruga lõhkamise seade (Eisenhuber jt 2013)
Figure 1. Laboratory scale steam explosion unit (Eisenhuber et al. 2013)

Hüdroolüüs ja fermentatsioon

Eeltötlusele järgnes ensümaatiline hüdroolüüs, milleks kasutati ensüümkompleksi Accellerase 1500. Ensüümlahust lisati proovidele suhtega 0,3 mL grammi biomassi kuivaine kohta. Hüdroolüüsilahuse kuivainesisaldus oli 10% ning pH 5. Hüdroolüüsiprotsess toimus loksutil pideval segamisel kiirusega 2,5 p/s, temperatuuril 50 °C ja kestis 72 h.

Fermentatsioon toimus 1-liitrilistes klaaspudelites, mis suleti pealt kääritustoruga. Fermentatsioonilahuse kogus oli 500 mL ja pH 4,6. Fermentatsioonilahusele lisati 2 mL $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 2 mL KH_2PO_4 , 2 mL $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0,44 g $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ja 2 mL pärmilahust *Saccharomyces cerevisiae*. Fermentatsioon toimus temperatuuril 30 °C ja kestis 120 h.

Proovide analüüsimine

Kuivaine sisaldust määrati niiskuse analüsaatoriga Ohaus MB 45. Kiuanalüüsid teostati vastavalt AOAC 973.1 (Association of Official Analytical Chemists) standardmeetodile seadmega Tecator (seerianumber 1706). Sahhariidide, orgaaniliste hapete ning etanooli kontsentratsioone määrati kõrgsurve-vedelikkromatograafia (HPLC system Agilent Technologies 1200 Series). Taimeraku struktuuri uurimiseks enne ja pärast auruga lõhkamist kasutati skaneerivat elektronmikroskoopi VEGA 2 LMU, Tescan.

Joonistel on kasutatud keskmistatud tulemusi ning mõõteviga on näidatud vertikaalsete joontega. Andmete töötlemisel kasutati programme Microsoft Excel ja GraphPad Prism 5.

Tulemused

Käesolevas töös uuriti bioetanooli tootmist luhahainast, kasutades auruga lõhkamise eeltöötlusmeetodit. Kiuanalüüsi tulemused näitavad, et juulis niidetud luhahainal on kõrge ligniinisisaldus (24,16%) ja suhteliselt madal tselluloosisisaldus (27,19%), võrreldes näiteks nisupõhuga, mille tselluloosisisaldus on ligikaudu 40%. Lisaks on luhahainal ka kõrge hemitselluloosisisaldus (29,15%). Kiuanalüüsi tulemused on toodud tabelis 1. Kõrge ligniini- ja hemitselluloosisisaldus tähendab, et luhahain vajab enne hüdrolyüsiprotsessi põhjalikku eeltöötlust. Ligniini ja hemitselluloosi moodustavad taimerakkudes kaitsva barjääri, mis takistab taimerakkude lagundamist seente ning bakterite poolt (Kumar jt 2009).

Tabel 1. Tselluloosi, hemitselluloosi, ligniini ja kuivaine sisaldus luhahaina proovides (HS150 – auruga lõhatud luhahain temperatuuril 150 °C)

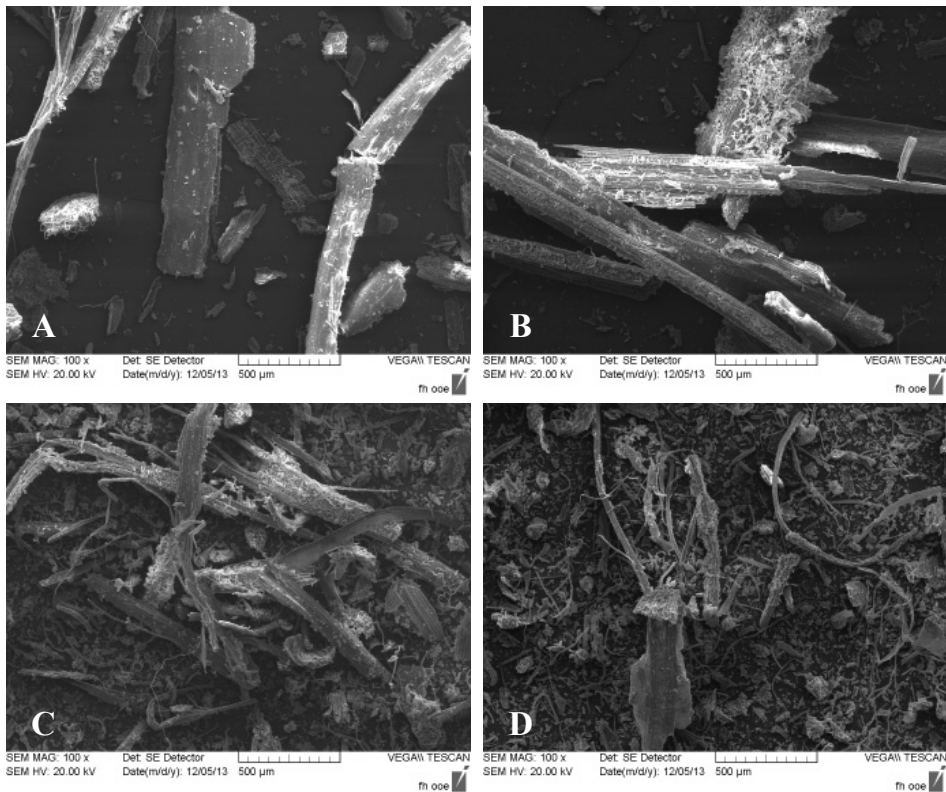
Table 1. Cellulose, hemicellulose, lignin and dry matter content of meadow hay samples (HS150 – steam exploded hay at 150 °C)

	Tselluloos (%)	STD₂ (%)	Hemitselluloos (%)	STD₂ (%)	Ligniini (%)	STD₂ (%)	Kuivaine (%)
Luhahain (töötlemata)	27,19	0,69	29,15	0,48	24,16	0,29	90,43
HS150	32,66	0,23	26,51	0,15	26,49	0,31	93,46
HS170	33,42	1,11	25,98	0,38	28,82	0,12	93,96
HS180	33,87	0,36	24,63	1,02	29,05	0,09	95,20
HS200	35,07	0,36	15,27	0,48	33,71	0,17	95,83

Auruga lõhkamise eeltöötlus lõhub taimeraku struktuuri ja eemaldab hemitselluloosi, kuid see lagundab vaid väikese osa ligniinist. Ligikaudu 95% ligniinist jääb taimerakkudesse alles. Kuna eeltöötlusel kemikaale ei kasutata, siis vajab auruga lõhkamine kõrgeid temperatuure, et efektiivselt hemitselluloosi lahustada. Auruga lõhkamise meetodi efektiivsus suureneb järsult temperatuuridel üle 180 °C. Auruga lõhkamine temperatuuril 200 °C vähendab proovis hemitselluloosi sisalduse 15,27%-ni, võrreldes esialgse 29,15%-ga töötlemata proovis.

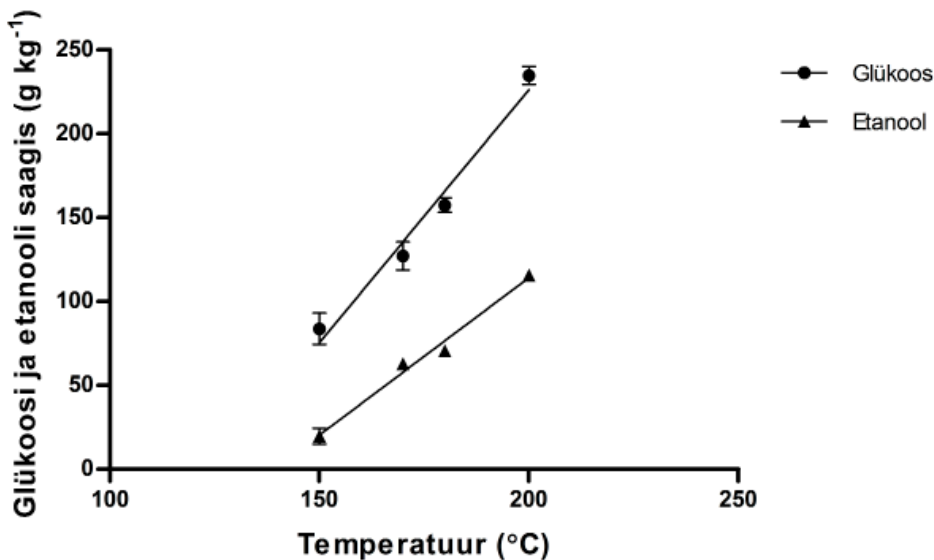
Taimeraku struktuuri uurimiseks kasutati skaneerivat elektronmikroskoopi, millega vaadeldi taimeraku struktuuri nii töötlemata proovides kui ka erinevate temperatuuride juures auruga lõhatud proovides, tulemused on esitatud joonisel 2. Nagu tulemustest

selgub, on auruga lõhkamine temperatuuril 200 °C taimeraku lõhkumiseks väga efektiivne: taimeraku seinad on purustatud ning tselluloosikiud paljastatud. Samas on auruga lõhkamine temperatuuridel alla 180 °C selgelt ebapiisav. Nagu jooniselt 2 näha, on auruga lõhkamine temperatuuril 150 °C teinud taimeraku struktuurile väga väikest kahju ning tselluloosikiud on endiselt kaetud.



Joonis 2. Skaneeriva elektronmikroskoobi pildid luhahaina proovidest: töötlemata (A) ja erinevate temperatuuride juures auruga lõhatud proovid (B – 150 °C, C – 170 °C ja D – 200 °C)
 Figure 2. Comparison of scanning electron microscope (SEM) images of meadow hay samples: untreated (A) and steam exploded at different temperatures (B – 150 °C, C – 170 °C and D – 200 °C)

Hüdrolüüsi tulemustest selgub, et kõige suurem glükoosisaagis (234,6 g kg⁻¹ biomassi kuivaine kohta) saadi, kasutades auruga lõhkamist 200 °C juures, tulemused on esitatud joonisel 3. See kinnitab, et eeltötlus 200 °C juures eemaldab suurema osa hemitselluloosist ning jätab tselluloosikiud ensüümidele kergesti ligipääsetavaks. Kõige väiksem glükoosisaagis (83,8 g kg⁻¹) saadi, kasutades auruga lõhkamist temperatuuril 150 °C. Kuigi eeltötlusel kasutatud temperatuuride erinevus oli kõigest 50 °C, erinesid glükoo- si saagised 2,8 korda.



Joonis 3. Auruga lõhkamisel rakendatud temperatuuri mõju lühaheina proovide glükoosi ja etanooli saagistele

Figure 3. Influence of different pretreatment conditions on the glucose and ethanol yields from floodplain meadow hay samples

Etanooli saagiste ja eeltötlusel rakendatud temperatuuri vahel esinesid sarnased seosed, mida leiti eelnevalt glükoosi saagiste puhul. Suurim etanoolisaagis (115,7 g kg⁻¹ biomassi kuivaine kohta) saadi auruga lõhkamisel, kasutades temperatuuri 200 °C, ning väikseim etanoolisaagis (19,8 g kg⁻¹) saadi auruga lõhkamisel 150 °C juures.

Tabel 2. Hüdrolüüsi ja fermentatsiooni efektiivsused erinevatel eeltötlustingimustel (HS – auruga lõhkamine temperatuuridel 150–200 °C)

Table 2. Hydrolysis and fermentation efficiencies at different pretreatment conditions (HS – steam explosion pretreatment at temperatures 150–200 °C)

Proovi tähis	Glükoosi saagis g kg ⁻¹	Etanooli saagis g kg ⁻¹	Hüdrolüüsi efektiivsus %	Fermentatsiooni efektiivsus %
HS150	83,8	19,8	30,8	46,2
HS170	127,1	62,8	46,7	96,9
HS180	157,4	70,7	57,9	88,1
HS200	234,6	115,7	86,3	96,7

Kõrgeim hüdrolüüsi efektiivsus (86,3%) ja üks kõrgemaid fermentatsiooni efektiivsusi (96,7%) saavutati auruga lõhkamisel temperatuuril 200 °C. See näitab, et auruga lõhkamine kõrgetel temperatuuridel on väga efektiivne meetod lühaheinast bioetanooli tootmiseks. Näiteks lühaheina eeltöötlemisel lahjas happelahuses saadi hüdrolüüsi ja fermentatsiooni efektiivsusteks vastavalt 42,4% ja 69,8% (Tutt jt 2014).

Luhaniidud toodavad aastas üle 100 000 tonni biomassi ning kasutades eeltöötluks auruga lõhkamist temperatuuril 200 °C, millele järgneb ensüümhüdrolüüs, oleks võimalik sellest biomassist toota ligikaudu 11 500 tonni bioetanooli.

Kokkuvõte

Tulemused näitavad, et luhahainal on kõrge ligniinisaldus (24,2%), kuid suhteliselt madal tselluloosisaldus (27,2%). Kõrge ligniinisaldus tähendab, et luhahaein vajab enne hüdrolüüsiprotsessi põhjalikku eeltöötlust.

Suurim glükoosisaagis (234,6 g kg⁻¹) ja etanoolisaagis (115,7 g kg⁻¹ biomassi kuivaine kohta) saadi, kasutades auruga lõhkamist 200 °C juures. Väikseim glükoosisaagis (83,8 g kg⁻¹) ja etanoolisaagis (19,8 g kg⁻¹) saadi, kasutades auruga lõhkamist temperatuuril 150 °C. Neid tulemusi kinnitasid ka skaneeriva elektronmikroskoobi pildid, mis näitasid, et eeltöötlus temperatuuril 150 °C ei lõhu taimeraku struktuuri piisavalt ning tselluloosikiud pole ensüümidele ligipääsetavad. Seetõttu on vajalik kasutada luhahaina auruga lõhkamisel kõrgemaid temperatuure, soovitatavalt 200 °C.

Kuigi luhahainal on kõrge ligniini- ja suhteliselt madal tselluloosisaldus, siis sobiva eeltöötlusmeetodi kasutamisel sobib see bioetanooli tootmiseks. Kasutades eeltöötluks auruga lõhkamist temperatuuril 200 °C, oleks Eestis võimalik luhahainast toota ligikaudu 11 500 tonni bioetanooli aastas. See võimaldaks biokütusega asendada umbes 5% Eestis tarbitavast bensiinist.

Kasutatud kirjandus

- Cantarella, M., Cantarella, L., Gallifuoco, A., Spera, A., Alfani, F. 2004. Comparison of different detoxification methods for steam-exploded poplar wood as a substrate for the bioproduction of ethanol in SHF and SSF. – *Process Biochemistry* 39, 1533–1542.
- Chen, H., Zhang, Y. 2012. Multiscale modeling of biomass pretreatment for optimization of steam explosion conditions. – *Chemical Engineering Science* 75, 177–182.
- Eisenhuber, K., Jäger, A., Wimberger, J., Kahr, H. 2013. Comparison of different pretreatment methods for straw for lignocellulosic bioethanol production. – *Agronomy Research* 11, 173–182.
- Global Renewable Fuels Alliance, World Ethanol Fuel Production data from F.O.Licht http://www.globalrfa.org/pr_021111.php (11.02.2011).
- Heinsoo, K., Melts, I., Sammul, M., Holm, B. 2010. The potential of Estonian semi-

- natural grasslands for bioenergy production. – *Agriculture, Ecosystems and Environment* 137, 86–92.
- Kumar, P., Barrett, D. M., Delwiche, M. J., Stroeve, P. 2009. Methods for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Efficient Hydrolysis and Biofuel Production. – *Industrial Engineering and Chemistry Resource* 48, 3713–3729.
- Kukk, T., Sammul, M. 2006. Loodusdirektiivi poollooduslikud kooslused ja nende pindala Eestis. – *Eesti Looduseuurijate Seltsi aastaraamat* 84, 114–159.
- Lin, Y., Tanaka, S. 2006. Ethanol fermentation from biomass resources: current state and prospects. – *Applied Microbiology and Biotechnology* 69, 627–642.
- McKendry, P. 2002. Energy production from biomass. Part I. Overview of biomass. – *Bioresource Technology* 83, 37–46.
- Stevens, D.J., Worgetten, M., Saddler, J. 2004. Biofuels for transportation: an examination of policy and technical issues. IEA Bioenergy Task 39, Liquid Biofuels Final Report 2001–2003, Canada.
- Talebnia, F., Karakashev, D., Angelidaki, I. 2010. Production of bioethanol from wheat straw: An overview on pretreatment, hydrolysis and fermentation. – *Bioresource Technology* 101, 4744–4753.
- Tutt, M., Kikas, T., Kahr, H., Pointner, M., Kuttner, P., Olt, J. 2014. Using steam explosion pretreatment method for bioethanol production from floodplain meadow hay. – *Agronomy Research* 12, 417–424.

USING STEAM EXPLOSION PRETREATMENT METHOD FOR BIOETHANOL PRODUCTION FROM FLOODPLAIN MEADOW HAY

Marti Tutt, Timo Kikas, Jüri Olt

This article investigates influence of the steam explosion pretreatment method at different temperatures on sugar conversion rates and bioethanol production efficiencies from floodplain meadow hay. Floodplain meadow hay is used as a raw material, because these semi-natural grasslands need regular maintenance to preserve their high biodiversity. So far, this biomass has been largely unused, but it could provide a good feedstock for bioethanol production.

In this work, steam explosion pretreatment is used in combination with enzymatic hydrolysis. Effects of steam explosion pretreatment on the fibre content and cell wall structure are also studied. Results from fibre analysis show, that the floodplain meadow hay has very high lignin content of 24,16%, but relatively low cellulose content of 27,19%. Highest cellulose to glucose conversion rate of 234,6 g kg⁻¹ and ethanol yield of 115,7 g kg⁻¹ of biomass were achieved with the steam explosion pretreatment at 200 °C. Scanning electron microscope (SEM) images show that pretreatment at 150 °C does very little damage to plant cells, while steam explosion at 200 °C disintegrates most of the plant cell walls and exposes cellulose fibres.