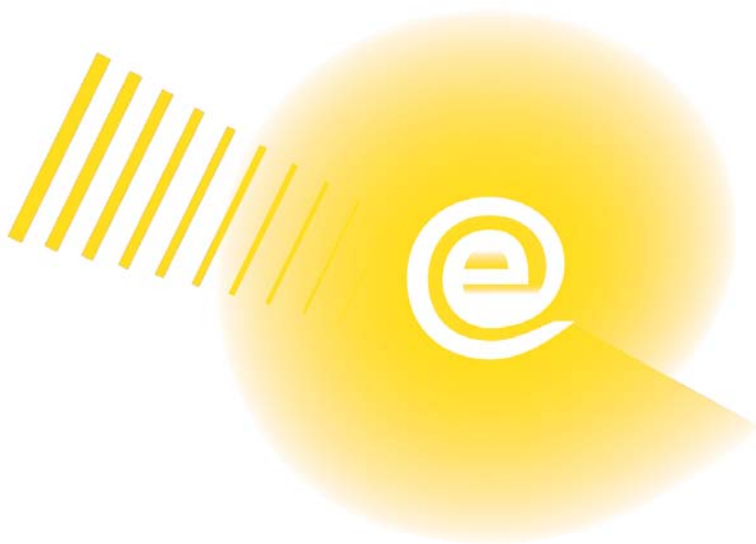


# **TEUK XVII**

## **TAASTUVATE ENERGIAALLIKATE UURIMINE JA KASUTAMINE**

SEITSMETEISTKÜMNENDA KONVERENTSI KOGUMIK



## **INVESTIGATION AND USAGE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES**

SEVENTEENTH CONFERENCE PROCEEDINGS

TARTU, ESTONIA, 2015

Toimetaja / Compiled by: Elis Vollmer  
Keeleline toimetis: Karin Veske, Margit Lehis

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



**Eesti Taastuenergia Koda**



Trükitud: OÜ Paar  
Printed by: Paar Ltd

Kirjastaja: Eesti Maaülikool  
Publisher: Estonian University of Life Sciences

© 2015  
Eesti Maaülikool  
Estonian University of Life Sciences  
All Rights Reserved

ISBN: 978-9949-569-06-9 (trükis)  
978-9949-569-07-6 (pdf)

# SISUKORD

Eessõna

EESTI HILJUTISED ÕPPETUNNID VÄIKETUULIKUTEGA Tuuliki Kasonen .....	6
PÄIKESEENERGIA KASUTAMINE TALUS LÕUNA-EESTIS Mihkel Jakobson, Valdur Tiit .....	16
BIOSÖE TOOTMINE TASUB ÄRA – PROOVITUD TEHNOLOOGIAGA 20 ERINE- VAST VÕIMALIKUST TOORMEST ÜHE PAINDLIKU PROTSESSIGA KUNI VIIS TOODET Ahto Oja, Harri Vesa .....	25
PÄIKESEENERGEETIKA JA PERSPEKTIIVID VESINIKUNA SALVESTAMISEL Tiit Kallaste .....	33
PV-MOODULI TOODANG SUURFARMIS Teolan Tomson .....	45
TASAPINNALISE 2,5 M <sup>2</sup> PÄIKESEPANEELI TÖÖ TULEMUSED AJAVAHEMIKUS SEPTEMBER 2014 KUNI OKTOOBER 2015 Veli Palge, Margus Arak, Erkki Jõgi .....	52
KURENURME PÄIKESEELEKTRIIAAMAS ASUTAKSE ENERGIAT SALVESTAMA VESINIKUNA Viido Polikarpus, Tiit Kallaste .....	58
KAHE FOTOELEKTRILISE PÄIKESEENERGIA KASUTAMISE SÜSTEEMI (PS) ANALÜÜS ESIMESE TÖÖTAMISAASTA ANDMETE ALUSEL. RAKENDUSLIKUD SOOVIKUD PS-I KASUTAMISEKS Valeri Saikovski.....	70
HOONE ELEKTRISÜSTEEMI PARAMEETRID, MIS SOBIVAD UUENDUSTEKS (DRAIVERID). NEGATIIVSED ERIPÄRAD, MILLELE TULEB TÄHELEPANU PÖÖ- RATA, ET VÄLTIDA UUENDUSTE REALISEERIMISE EBAPIISAVA TASUVUSE JA MITTESOBIVA TEHNILISE KÕRVALMÕJU TEKET Valeri Saikovski, Raivo Teemets.....	80
BIOENERGIA KASUTUS PÕLLUMAJANDUS- JA METSANDUSETTEVÕTETES INVESTEERINGUTOETUSE SAAJATE NÄITEL Jaana Prants.....	88
MILLISEKS BIOKÜTUSEKS VÄÄRINDADA LOODUSKAITSSELISTEL EESMÄR- KIDEL HOOLDATUD LAMMINIITUDE ROHTSET BIOMASSI? Indrek Melts, Marti Tutt, Katrin Heinsoo .....	96
EESTI SMEAR-JAAMA ANDMETE KASUTUS JÄTKUSUUTLIKU BIOMASSI TOOTMISE JÄLGIMISEL Steffen M. Noe, Alisa Krasnova, Dmitrii Krasnov, Ahto Kangur.....	104
MASTIMÕÖTMISED VÕIMALDAVAD HINNATA TUULEENERGIA RESSURSSI Marko Kaasik, Steffen M. Noe.....	111
BIOETANOOLKÜTUSE MÕJU KAHETAKTILISE KOLBMOOTORI VÄLJUNDPA- RAMEETRITELE Arne Küüt, Risto Ilves, Jüri Olt.....	118
BIOKEEMILISE HAPNIKUTARBE SENSOR-RIVID Kätlin Pitman, Merlin Raud, Timo Kikas .....	131

## EESSÕNA

2015. aastal toimub konverents "Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine" juba 17. korda. TEUK on läbi aastate olnud üks põhilisi taastuvenergia valdkonna teadurite, praktikute, poliitikute ja lihtsalt huviliste kohtumispaiku.

Käesoleva konverentsi fookuses on sel korral aasta lõpus toimuva globaalse Pariisi kliimakohtumise temaatika. Pariisi kliimakohtumise eesmärgiks on jõuda uute riikidevaheliste kokkulepeteni, et pidurdada kliima muutumist inimtegevuse mõjul ning vähendada lokaalset ja globaalset tööstussaastet. Konverentsil heidetakse pilk Eesti senisele kliimapolitikale kui ka ootustele peale uusi riikidevahelisi kokkuleppeid. Eriline tähelepanu on aspektidel, kuidas uued kokkulepped hakkavad meie energetikasektori arengut mõjutama.

Tavapärastele teadlaste ettekannetele on sel korral lisaks antud rohkem sõna ka ettevõtjatele ja praktikutele, et tutvustada edukaid kogemusi päikeseenergia väikelahenduste vallas. Lisaks suuliste ettekannetele on esindatud ka posterettekanded väga laia teemaderingiga, alates erinevatest päikeseenergia teemalistest uuringutest Eestis, biojäätmete kompleksse käitlemise potentsiaalid kuni hoonete elektrisüsteemi innovatsioonide ja biosöe majandusliku rakenduseni.

Päeva lõpetusena toimub Eesti taastuvenergia sektori hetkeseisu ja arenguid käsitlev paneeldiskussioon „Energiapoliitika valikud karmistuva kliimapolitiika valguses“, mis võtab kokku eelnevates ettekannetes käsitletud teemad ning üritab prognoosida, kuhu taastuvenergia valdkond nii globaalselt, Euroopa mastaabis kui ka riiklikult liigub. Diskussioon võimaldab poliitikutel, teadlastel ja praktikutel ühiselt arutleda ees ootavate arengusuundade üle.

Huvitavaid ettekandeid ja head lugemist!

Elis Vollmer

Eesti Maaülikooli taastuvenergia keskuse asejuhataja

## FOREWORD

Annual conference Investigation and Usage of Renewable Energy Sources is being held already 17th 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 is the outcome of the global climate summit held in Paris later this year. The goal of the Paris summit will be new intergovernmental agreements to decrease human influence on climate change and reducing local and global pollution. Our conference will look at Estonian climate policies so far as well as the possible future developments in Estonian energetics sector after the Paris climate summit.

In addition to the regular scientific presentations, we also have higher focus on best practices from the entrepreneurs in solar energy sector. Besides oral presentations we also exhibit poster presentations with very diverse topics ranging from different solar energy studies, biowaste treatment possibilities to building innovation developments and the economic feasibility of biochar production.

The conference day is summarised with open discussion on "Options for renewable energy sector under the new more strict climate policies", bringing together all the ideas from previous presentations as well as trying to predict to where and how our energy sector will develop in global, European and local scale. The discussion enables politicians, scientists and practitioners to debate on oncoming development possibilities.

Enjoy the articles and the conference presentations!

Elis Vollmer

Acting head of the Centre of Renewable Energy of Estonian University of Life Sciences

# EESTI HILJUTISED ÕPPETUNNID VÄIKETUULIKUTEGA

Tuuliki Kasonen

Eesti Tuuleenergia Assotsiatsioon, Regati pst. 1, 11911 Tallinn

e-post: tuuliki@tuuleenergia.ee

## **Annotatsioon**

Tuuleenergia Assotsiatsiooni all tegutsev Tuuleenergia Klaster uuris 2015. aastal, kui tootlikud on olnud Kredexi investeerimistoetusega soetatud väiketuulikud ning mida tuleks tulemustest õppida. Käesolev töö tutvustab Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika Instituudi rohelise investeerimisskeemi „Väikeelamute rekonstrueerimise toetus” (Ulm ja Palu 2015) abil Eestis püstitatud väiketuulikute tootlikkuse analüüsi, järeltõlget ja ettepanekuid tulevikuks.

Märksõnad: tuuleenergeetika, väiketuulik, elektrituulik, tuulegeneraator, tasuvusaeg, KredEx.

## **Sissejuhatus**

Sihtasutus KredEx pakkus 2012. aastal eraisikute väikeelamutele energiatarbe vähendamiseks mõeldud renoveerimistoetust, mille raames sai taotleda 70% toetust ka elektrit tootvate taastuvenergiaseadmete, sh väiketuulikute kasutuselevõtmiseks. Rohelise investeerimisskeemi „Väikeelamute rekonstrueerimise toetus“ maksimaalne määr oli 30 000 eurot taotleja kohta ning sellega finantseeritava väiketuuliku võrgupoolne võimsus võis olla kuni 11 kW. Taastuvenergeetika väikelahenduste toetamise eelarvelised vahendid pärinesid saastekvootide müügist. Huvi taastuvenergia toetusmeetme vastu oli väga suur ning KredEx peatas kaks nädalat pärast toetusvooru algust taotluste vastuvõtu vahendite lõppemise tõttu (Kredex 2012).

Kokku esitati 252 taotlust kogusummas 2 767 837,76 eurot, keskmine taotletav summa oli 10 983 eurot. Taastuvenergia toetust said 95 taotlejat, keskmine eraldatud summa oli 10 526,32 eurot. Toetust saadi 11 väiketuuliku, 64 päikesekollektori ja 25 PV-süsteemi paigaldamiseks (Talvar 2013).

Et tegemist oli esimese taolise väiketuulikute soetamiseks kasutatud toetuskeemiga Eestis, siis soovis Eesti Tuuleenergia Assotsiatsiooni all tegutsev Tuuleenergia Klaster analüüsida Kredexi investeringutoetusega püstitatud väiketuulikute tootlikkust ja tasuvust, et tulemuste baasil välja töötada konkreetset ettepanekuid samalaadsete toetussüsteemide täiustamiseks tulevikus. Selleks tellis Tuuleenergia Klaster Tallinna

Tehnikaülikooli Elektroenergeetika Instituudilt investeeringutoetusega soetatud väike-  
tuulikute tootlikkuse analüüsi. Töö koostajaks oli TTÜ doktorant Lauri Ulm ning juhen-  
dajaks professor Ivo Palu. Analüüsi finantseerimisel osalesid nii Tuuleenergia Klasteri  
partnerid kui ka Euroopa Regionaalarengu Fond (EAS-i klastrite programmi kaudu) ja  
Tallinna Ettevõtlusamet.

### **Analüüsitud väiketuulikud**

Analüüsimiseks sooviti võtta kõik KredExi investeeringutoetusega soetatud 11 tuulikut.  
Et üks tuulik oli installeeritud nn off-gridina ehk autonoomses süsteemis, siis jäeti see  
analüüsitava tuulikute hulgast välja. Kõik analüüsitud 10 tuulikut olid 10 kW nomi-  
naalvõimsusega, neist neljal mudelil 8 m diameetriga rootor SWG FD 8,0 – 10 000 ja  
kuuel tuulikul 7,2 m diameetriga rootor TUGE 10HV. SWG-tuulikute masti kõrguseks  
oli 16 meetrit ja TUGE-tuulikute puhul 18 meetrit. Kaks tuulikut asusid Saaremaal,  
kolm Harjumaal ja Pärnumaal ning üks nii Lääne-Virumaal kui ka Viljandimaal.

Analüüsitava andmete perioodiks oli üks aasta. SWG-tuulikutel analüüsiti kõikidel  
tuulikutel perioodi 01.03.2013 – 28.02.2014 ning TUGE-tuulikutel perioodi 01.10.2013  
– 30.09.2014. Andmed kas edastati juba sellisena või teisaldati need 5 minuti keskmis-  
teks. Andmetest kasutati analüüsi koostamiseks ajainfot, kogu elektrienergia toodangut,  
keskmist väljundvõimsust ja keskmist tuulekiirust.

### **Metoodika**

Võimsusgraafiku leidmiseks lähtuti üldjuhul IEC 61400-12-1 standardist (IEC 2005),  
mis on välja töötatud tuuleparkide elektrienergia toodangu hindamiseks ja mõõtmiseks.  
Erandina kasutati enamasti 5 minuti keskmisi andmeid, kuigi standard näeb ette 10  
minuti keskmiste andmete kasutamist. Väiketuulikute puhul oleks veel sobilikum 30se-  
kundiline andmetihedus, sest rootori kerguse tõttu reageerib väiketuulik tuule kiiruse  
kasvamisele ja kahanemisele väga kiiresti.

Kuna tuulikute töös esines katkestusi, siis koostati mudel, mis võeti aluseks potent-  
siaalse aastase elektrienergia toodangu määramisel. Alusandmed mudeli loomiseks pä-  
rinevad NASA projektist „Modern Era Retrospective analysis for Research and App-  
lications“. Iga tuuliku asukohale kõige lähemast andmepunktist laaditi alla MERRA  
modelleeritud tuulekiiruse andmed 50 m kõrgusel iga tunni kohta vaadeldud perioodil.  
Alla laaditud toorandmetes olid esitatud tuule vektorid, mille põhjal leiti tuulekiirus ja  
tuulesuund, arvestamata asukohtade iseärasusi, ümbritsevaid objekte jms, mis reaalses  
elus tuuliku tööd mõjutavad.

Kontrolli otstarbel võrreldi mudeli abil koostatud andmeid väiketuulikute tegeliku toodangu andmetega nende tundide osas, mis olid olemas. Selleks kasutati kogutoodangu andmeid, kus ühel tunnil toodetud elektrienergia kogus leiti eelmise tunni minimaalse kogutoodangu näidu ja vaadeldud tunni minimaalse kogutoodangu näidu vahena. Filtrereimisel välistati andmed, kus kogutoodangu näit oli 0.

Et Tuuleenergia Klasteri liikmeid huvitas väiketuulikute analüüsimisel enim, mida sellest kogemusest oleks tuleviku tarbeks õppida, siis hinnati töös ka tuulikute asukohta – täpsemalt tuule kiirust ja ümbritsevaid objekte.

KredExi investeringutoetuse määruse seletuskirjas on antud soovitus, et lähimas EMHI (ilmateenistus) mõõtejaamas võiks aasta keskmine tuulekiirus olla 4 m/s või suurem. Tuulekiiruse osas on heaks peetud tulemust, kui aasta keskmine tuulekiirus on 4,5 m/s või suurem (Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium 2012). Eesti Tuuleenergia Assotsiatsiooni välja antud „Väiketuulikute ABC“-s on loetud minimaalseks tuulekiiruseks 4,5 m/s ja väga heaks 5–6 m/s (Eesti Tuuleenergia Assotsiatsioon 2012). Analüüsis loeti soovituslikuks tuulekiiruseks vähemalt 5 m/s ja väga heaks tuulekiirust alates 5,5 m/s.

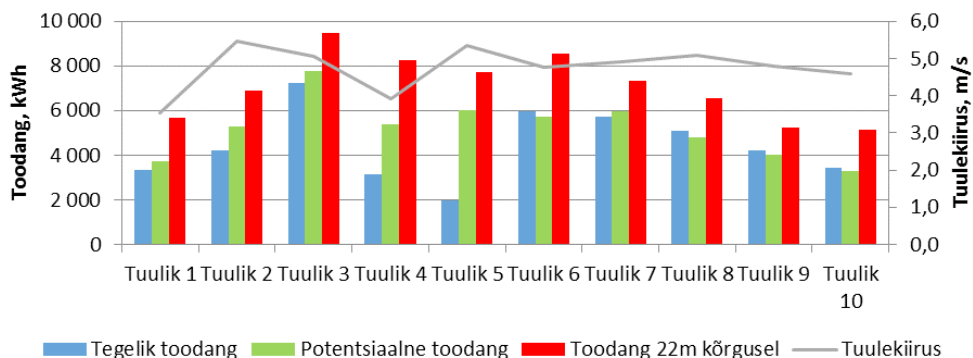
Lisaks tuule kiirusele mõjutavad tuuliku toodangut ka lähedal asuvad objektid ning nende poolt tekitatud turbulents. Väikeelamute rekonstrueerimise toetuse määruse seletuskirjas on soovitatud, et tuuliku paigalduskohast 75 m raadiuses asetsevast kõrgemast objektist peaks elektrituuliku tiiviku alumine serv olema minimaalselt 6,5 m kõrgemal. Heaks peetakse tulemust, kui paigalduskohast 75 m raadiuses ei paikne ühtegi objekti (Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium 2012). „Väiketuulikute ABC“-s on antud soovitus paigaldada tuulik objekti kõrgusest vähemalt 20-kordsele kaugusele (Eesti Tuuleenergia Assotsiatsioon 2012).

Tasuvused leiti kahele toetuse stsenaariumile:

- Taastuvenergiatoetus – tuuliku toodetud ja võrku müüdüd elektrienergia eest makstakse 12 aastat taastuvenergia toetust 53,7 €/MWh.
- Investeerimistoetus – tuuliku rajamiseks maksti investeringutoetust 70%.

Majandusliku analüüsi juures koostati iga tuuliku kohta 64 stsenaariumit ning leiti nende nüüdisväärtus (NPV).





Joonis 1. Tuulikute toodangud ja tuulekiirused  
 Figure 1. Energy produced by wind turbines and wind speed

### Tulemused ja arutelu

Töös analüüsitud tuulikute tegelik aastane elektrienergia toodang oli keskmiselt 4435 kWh. Mudeli alusel leitud toodang originaalmasti kõrgusel, arvestades tegelikku võimsusgraafikut, oli keskmiselt 5196 kWh, mis arvestas 90% töökindlusega.

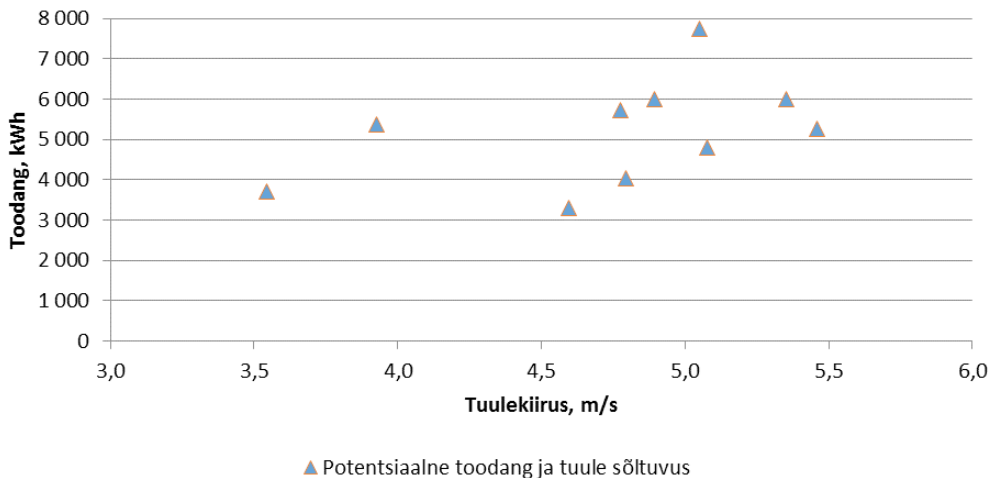
Kui tuuliku omanikud oleksid soetanud 22 meetri kõrguse masti, oleks arvutustekohaselt olnud potentsiaalne aastane elektrienergia toodang keskmiselt 7081 kWh. Seega oleks keskmine aastase toodangu suurenemine sellisel juhul 1885 kWh. Suurem keskmine mõju, 2053 kWh aastas, on masti kõrguse suurendamisel SWG-tuulikudel, kuna SWG-tuulikute puhul oli kasutatud madalamaid maste kui TUGE-tuulikute puhul (16 m vs 18 m).

Keskmine kasutustegur tegeliku toodangu järgi oli väiketuulikudel 5,1% ja mudeli toodangu järgi 5,9%. Võrdluseks olgu toodud, et väga heas asukohas väiketuulikute puhul jääb kasutustegur tavaliselt 10–30% vahele.

Tulemused olid oodatust oluliselt kehvemad, mistõttu on oluline analüüsida, millest see tuleb.

Kõikidel juhtudel oli projektide nüüdisväärtus negatiivne, mis tähendab, et tuuliku paigaldamine oli majanduslikult vaatenurgast ebamõistlik. Analüüsitud asukohtades ei tooda tuulikud piisavalt elektrienergiat, et saadav tulu kompenseeriks tuulikusse investeerimise maksumuse.

Asukohtade täpsemal hindamisel selgus, et kuuel juhul olid tuulikud paigaldatud hal-



Joonis 2. Tuulikute keskmine tuulekiirus ning mudeli alusel leitud toodang  
 Figure 2. Average wind speed near the turbines and the energy production estimated by the model

ba ja neljal juhul keskmisse asukohta. Kümnest tuulikust polnud mitte ühegi asukoha puhul tegemist hea paigutusega. Asukoha all peetakse silmas tuulekiiruse ja turbulentsi mõju ning masti kõrgust. Ühes asukohas olid head tuuleolud tuulekiiruse mõttes, kuid puhangute ja turbulentsi tõttu lülitas tuulik end pidevalt välja. Aeg-ajalt oli selles kohas tuul nii tugev, et hetke tootmine ja ka lisakoormusesse minev energia ületas süsteemis lubatud piirväärtusi, mistõttu tuulik lülitas end välja.

Keskmine tuulekiirus analüüsitud tuulikute asukohas oli 4,75 m/s, mida ei saa pidada heaks. Tuulekiirus on hea tuuleenergia toodangu kohalt ülioluline, sest väljundvõimsus on kuupsõltuvuses tuulekiirusest. See tähendab, et ka väikesed muutused tuulekiiruses avaldavad märkimisväärset mõju elektritoodangu suurusele.

Joonisel on esitatud analüüsitud tuulikute keskmine tuulekiirus ning mudeli alusel leitud toodang. Tegelik toodang sõltub konkreetses asukohas olevatest tuuleoludest ja paigutusest.

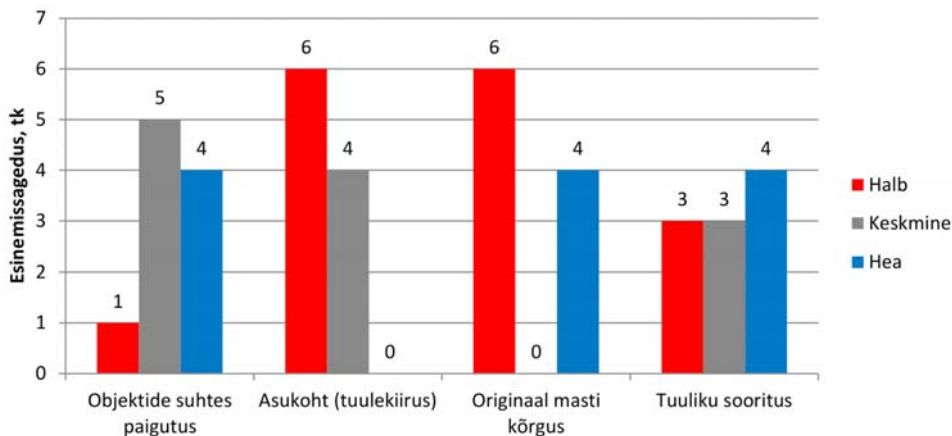
Lisaks tuulekiirusele on oluline selle ühtlus. Puhangud ja turbulents vähendavad oluliselt toodangut. Näiteks oli ühe tuuliku asukohas küll kõige suurem keskmine tuulekiirus (5,5 m/s), kuid puhangute ja turbulentsi tõttu ei sobi asukoht sellegipoolest väiketuulikele.

Kõik looduslikud ja tehisoobjektid takistavad tuule sujuvat voolamist, vähendades tuule kiirust ja tekitades õhukeeriseid ehk turbulentsse. Sellistes oludes väheneb tuuliku toodang oluliselt ja turbulentsi poolt põhjustatud vahelduva mehaanilise koormuse tõttu ka tuuliku komponentide eluiga. Seetõttu tuleb tuulik paigutada eemale nii puudest, majadest kui muudest tuult segavatest objektidest (Eesti Tuuleenergia Assotsiatsioon 2012).

Hindamaks ja andmaks soovitusi, iseloomustati iga tuulikut ja tema asukohta viie tunnuse alusel skaalal halb, keskmine ja hea.

- Paigutus objektide suhtes – hinnati, kas lähedal olevatel objektidel on olulist mõju tuulekiiruse vähendamisele ja turbulentsi tekkimisele.
- Asukoht – hinnati asukoha sobivust väiketuulikule. Keskmine tuulekiirus 5,5 m/s ja enam loeti heaks, 5–5,4 m/s loeti keskmiseks ning alla 5 m/s halvaks. Arvesse võeti ka turbulentsi mõju asukohas.
- Originaalmasti kõrgus – hinnati toodangut originaalmasti kõrgusel ja toodangu suurenemist juhul, kui oleks kõrgem mast olnud.
- Tuuliku sooritus – anti hinnang tuuliku tegelikule toodangule, arvestades mudeli alusel leitud toodangut.

Saadud tulemused on toodud tabelis 1 ja joonisel 3.



Joonis 3. Tuulikute ja nende asukohtade hindamine  
Figure 3. Evaluation of the turbines and its locations

Halvaks hinnati enim, kuuel korral, tuuliku asukohta ehk tuulekiiruse ja turbulentsi mõju ning originaalmasti kõrgust – tuuliku masti kõrguse suurendamisel oleks saadud oluliselt rohkem toodangut.

Tabel 1. Hinnang tuulikutele ja paigutusele  
Table 1. Evaluation to the turbines and their location

Tuuliku paigutamine	Tuulik 1	Tuulik 2	Tuulik 3	Tuulik 4	Tuulik 5	Tuulik 6	Tuulik 7	Tuulik 8	Tuulik 9	Tuulik 10
Objektide suhtes paigutus	Hea	Keskmine	Keskmine	Hea	Hea	Hea	Keskmine	Keskmine	Halb	Keskmine
Asukoht	Halb	Keskmine	Keskmine	Halb	Keskmine	Halb	Halb	Keskmine	Halb	Halb
Originaal masti kõrgus	Halb	Hea	Hea	Halb	Hea	Halb	Halb	Hea	Halb	Halb
Tuuliku sooritus	Keskmine	Halb	Keskmine	Halb	Halb	Hea	Keskmine	Hea	Hea	Hea
Originaal masti kõrgus m	16	16	16	16	18	18	18	18	18	18
Keskmine tuulekiirus m/s	3,5	5,5	5,1	3,9	5,4	4,8	4,9	5,1	4,8	4,6

Tuuliku sooritus hinnati kolmel juhul halvaks. Neljal juhul esines ka väga head sooritust, kus arvutuslik tegeliku toodangu osakaal mudeli omast oli üle 90%.

Paigutust objektide osas hinnati ainult ühel tuulikul halvaks – lähedal olevad objektid mõjutasid oluliselt tuulekiirust. Enamasti olid tuulikud keskmiselt paigutatud ning valdavates tuulesuundades olulist objektide mõju tuulekiirusele ei tuvastatud. Neljal juhul hinnati paigutus heaks.

Arvestades analüüsi tulemusi, oli TTÜ spetsialistide peamine ettepanek enne tuuliku paigaldamise toetamist konsulteerida väiketuulikute ekspertidega, kes aitavad koostada elektritoodangu analüüsi ja majandusarvestused. Täiendavalt tuleks vajadusel teostada tuulemõõtmised, kui ekspert ei suuda olemasolevate andmete alusel piisava usaldusväärsusega elektrienergia toodangut prognoosida. Et väiketuulikute töökõrgusel reaalselt andmestikku väga saada pole, siis on ilma tuule mõõtmiseta üsna raske tuule kohta paikapidavaid ennustusi erinevates asukohtades teha.

## Kokkuvõte

Käesolevas töös analüüsiti kümnet Eestis KredExi investeringutoetusega soetatud ja püstitatud väiketuuliku tootlikkust. Kõikidel juhtudel oli projektide nüüdsväärtus negatiivne, mis tähendab, et väiketuuliku paigaldamine oli majanduslikust vaatenurgast ebamõistlik. Analüüsitud asukohtades ei tootnud tuulikud vaadeldud perioodil piisavalt elektrienergiat, et saadav tulu kompenseeriks tuulikusse investeerimise maksumuse.

Asukohtade täpsemal hindamisel selgus, et kuuel juhul olid tuulikud paigaldatud halba ja neljal juhul keskmisse asukohta. Kümnest tuulikust polnud mitte ühegi asukoha puhul tegemist hea paigutusega. Asukoha all peetakse silmas tuulekiiruse ja turbulentsi mõju ning masti kõrgust. Peamiseks õppetunniks võib seega pidada, et väiketuulikutele sobivat asukohta tuleb hoolega valida.

- Enne tuuliku paigaldamise toetamist konsulteerida väiketuulikute ekspertidega, kes aitavad koostada elektritoodangu analüüsi ja majandusarvestused. Vajadusel teostada tuulemõõtmised.
- Juhul, kui tuuliku soetamist ja paigaldamist toetatakse avalikest vahenditest, lugeda täiendavalt abikõlblikuks ka kulud eksperdile tuulemõõtmiste, elektrienergia toodangu analüüsi ja tasuvusarvutuste teostamiseks.
- Juhul, kui nii väiketuuliku asukohavaliku analüüsimist (sh tasuvusarvutus) kui ka tuuliku soetamist ja paigaldamist toetatakse, määrata investeeringutoetuse määraks varasema 70% asemel 50%. Järgmiste taotlusvoorude avamisel toetab toetusmäära vähendamine valdkonna arengu suunamist efektiivsemate väiketuulikute poole. Lisaks paneb suurem omaosalus inimesi rohkem tegelema tasuvusarvutustega ja seeläbi ka tuulikule paremate asukohtade valikuga.
- Tasuvusaja lühendamiseks võiksid väiketuuliku omanikud teostada tuulikuhooldust iseseisvalt vastavalt hooldusjuhendile, lähtudes tootjapoolsest koolitusest.
- Väiketuuliku paigalduskohas ning tuuliku töökõrgusel peaks aastane keskmine tuulekiirus olema vähemalt 5 m/s.
- Väiketuulikute liitmisel elektrivõrguga on mõistlik mitte piirata elektrivõrguga liitumise võimsust tuuliku nominaalvõimsuse lähedase võimsusega (näiteks 10 kW), vaid võimalusel liituda suurema võimsusega (näiteks 15–20 kW). Tuulekiiruse suurenedes ja puhangute ajal suunatake piirangu korral üleliigne elektrienergia koormustakistisse ning see elektrienergia läheb raisku. Raisku mineva elektrienergia vähendamiseks tasub üleliigne elektrienergia suunata läbi arvesti elektrivõrku või oma tarbeks.

Väiketuulikule asukohta valik ei tohi tähendada halvimatest parima asukohta kaardistamist, vaid põhimõttelist valikut – kas meil on tuulikule anda parimate tuuleoludega asupaik või tuleks ideest tuule abil elektrit toota loobuda. Õnneks on Eesti väga pika rannajoonega ning paljude saartega riik, kus leidub piisavalt väga häid asukohti nii tööstuslikele kui ka väiketuulikutele. Need kohad tuleb vaid osata kasutusele võtta.

## Tänuavaldused

Ettekandja soovib tänada Lauri Ulmi ja Ivo Palu Tallinna Tehnikaülikoolist „Rohelise investeerimisskeemi „Väikeelamute rekonstrueerimise toetus“ abil Eestis püstitatud väiketuulikute tootlikkuse analüüsi“ koostamise eest ning sihtasutust KredEx, Bakeri OÜ-d ja Konesko AS-i tõhusa koostöö eest andmete väljastamisel.

Analüüsi teostamist aitasid rahastada EAS-i klastrite programmist Euroopa Regionaalarengu Fond ja Tallinna Ettevõtlusamet.



Euroopa Liit  
Euroopa  
Regionaalarengu Fond



Eesti tuleviku heaks

## Kasutatud kirjandus

Eesti Tuuleenergia Assotsiatsioon. 2012. Väiketuulikute ABC.

IEC 61400-12-1:2005(E) – Wind turbines – Part 12:1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines.

Kredex. 2012. KredEx peatab taastuenergia toetuse taotluste vastuvõtu. <http://kredex.ee/kredexist/uudised/kredex-peatab-taastuenergia-toetuse-taotluste-vastuvotu/>.

Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium. 2012. Seletuskiri majandus- ja kommunikatsiooniministri määruse „Rohelise investeerimisskeemi „Väikeelamute rekonstrueerimise toetus“ kasutamise tingimused ja kord“ juurde [WWW]. [http://www.kredex.ee/eramaja/uploads/vaikeelamute\\_toetuse\\_maaruse\\_seletuskiri.docx](http://www.kredex.ee/eramaja/uploads/vaikeelamute_toetuse_maaruse_seletuskiri.docx).

Ulm, L.; Palu, I. 2015. Rohelise investeerimisskeemi “Väikeelamute rekonstrueerimise toetus” abil Eestis püstitatud väiketuulikute tootlikkuse analüüs. – Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika Instituut.

Talvar, T. 2013. Alternatiivenergeetika saab tuult tiibadesse. – Äripäev: Tööstus, nr 4, lk 42–44.

## RECENT LESSONS IN USING SMALL WIND TURBINES IN ESTONIA

Tuuliki Kasonen

The Estonian governmental fund KredEx launched a pilot investment scheme in spring 2012 for grants up to 70% for buying and installing solar panels and wind turbines (up to 11kw). The grant was dedicated for individuals to produce electricity and heat for their own purpose, using wind and solar resources. As a result 11 new small wind turbines were installed in Estonia, 10 of them also connected to the grid.

The Wind Power Cluster working under the Estonian Wind Power Association recently looked into how these small turbines are producing and what could be learned from the pilot investment scheme. An analyses of the small turbines installed by the help of the Green Investment Scheme was made by Lauri Ulm and Ivo Palu from the Department of Electrical Power Engineering in Tallinn University of Technology. The report looked into the productivity of the ten turbines that were connected to the grid, explained the results and also made suggestions for the future.

In all cases, the net present value of the projects was negative, which means that from the economic perspective the installation of the turbines was irrational. It was so because in those locations the turbines were not able to produce enough electricity that the revenue generated would compensate the cost of investment.

When analyzing the locations it was found out that in six cases the turbines were installed in bad and four cases in average locations. None of the ten wind turbines were placed in good or ideal locations considering wind speed, turbulence and mast height. So the main lesson was that a suitable location for the small wind turbine must be carefully selected. Several concrete suggestions how to do that were also made in the report. There is a very long coastline and numerous islands in Estonia, where there are enough very good locations for both industrial and small wind turbines. We just need to know how to deploy these sites.

# PÄIKESEENERGIA KASUTAMINE TALUS LÕUNA-EESTIS

Mihkel Jakobson<sup>1</sup>, Valdur Tiit<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Urvaste vald, Kirikuküla 666512, Otso talu, mihkel.jakobson.003@mail.ee

<sup>2</sup>Estonian Euromanagement Institute, Emajõe 8, Tartu 51008, vtiit@neti.ee

## **Annotatsioon**

Kirjeldatakse päikesepaneelidega mikroelektrijaama ehitamist, mis on valminud olulisel määral oma oskustega. Paneelid on asetatud maasse kinnitatud terastorust posti otsa. Paneelide kinnituskoht posti otsas on maapinnast 4 m kõrgusel. Päikese ligikaudseks jälgimiseks on kasutatud programmkella. Mikrojaam sai valmis 2013. a suve lõpul ja töötab hästi alates sama aasta 6. septembrist. Tabelites 1 ja 2 esitatakse andmed Otso talu elektrienergia kasutusest möödunud kahe aasta jooksul. Tänu lähedalasuvale tiigile on maja kütteks edukalt rakendatud maasoojuspump.

Märksõnad: päikesepaneel, tugikonstruktsioon, jälgiv süsteem, inverter, akupank, maasoojuspump.

## **Sissejuhatus**

Järjest rohkem levib Eestis taastuvate energiaallikate kasutamine. Soojuse saamiseks kasutatakse siin puitkütuseid iidsetest aegadest, kuid sel viisil saadud soojuse abil elektrienergia tootmiseks väikeses mahus seni sobivaid seadmeid ei ole. Sisemaal, eriti metsarohketes piirkondades ja vahelduva profiiliga aladel on tuul väga puhanguline ning selle aastane keskmine kiirus väike. Seetõttu väärib tähelepanu otsese päikesekiirguse kasutamine elektri tootmiseks, millele aitab oluliselt kaasa ka vastavate seadmete maksumuse vähenemine. On ilmunud rida töid, kus uuritakse sobivaid lahendusi päikesepaneelide võimalikult otstarbekaks kasutamiseks (Märss jt. 2014; Palge jt. 2014). Eestis on mitmeid firmasid, kes paigaldavad eri võimsuse ja asetusega päikesepaneele. Lisaks leidub ka Eestis inimesi, kes on ise võimelised otsima uusi lahendusi ja tegema olulise osa paigaldustöödest. Järgnevalt kirjeldame ühte sellist, mis on tehtud Otso talus Urvaste vallas Võrumaal.

## **Päikesepaneelide kandekonstruktsioon**

Tööde kavandamisel tuli teha otsus kahe võimaluse vahel. Esimene, lihtsam variant oli paigutada paneelid statsionaarselt kas maapinna lähedale või ilmakaarte suhtes soodsalt asetseva hoone katusele. Sel juhul poleks erilist muret nende hooldamisel, aga eeldatavalt ei kasuta nad täies mahus ära taevastähtsust suures ulatuses liikuva Päikese kiirguse energiat. Seepärast otsustati paigutada liigutatavad päikesepaneelid posti otsa nii, et



nende normaal oleks kogu aeg enam-vähem suunatud Päikese poole. Kahjuks sai kohe selgeks, et selline ostetav seade on üsna kallid (hind üle 6000 euro). Hinnang näitas, et majanduslikult poleks selline otsus mõistlik, sest tasuks end ära väga pika aja jooksul kui üldse. Samas tundus, et ise on võimalik ehitada vajalik tugisüsteem oluliselt odavamalt, ostes vaid vajalikud materjalid ja sõlmed. Ka oma töö maht ja abivahendite vajadus ei tundunud olevat ülemäära suur, sest olulised tööriistad ja metallitöökogemus olid olemas.

Kandekonstruktsiooni põhiosa moodustab 240 mm välisdiameetri ja 10 mm seinapaksusega 6,5 m pikkune terastoru. Kuivõrd pinnas on paigalduskohas üsna tugev, siis polnud tarvidust ehitada kallist raudbetoonist vundamenti. Piisas 2,5 m sügavusest puuritust august, kuhu sai sisse tõsta toru ja selle vertikaalsust jälgides pinnasega ümberringi kinni tihendada. Toru ülemisse otsa, mis jääb maapinnast 4 m kõrgusele, olid eelnevalt kinnitatud paneelide pöördemehhanismid (vt joonis 1).

Selle külge kinnitati enda koostatud I-tala (topelt T-tala) serva kõrgusega 100 mm. Kandetraversiks kasutati 100 mm diameetriga ruuttoru (vt joonis 2). Vajalike materjalide ning väiksemate seadmete ostuks kulus 792 eurot.



Joonis 1. Päikesepaneelide tugisammas  
Figure 1. The solar photovoltaics panels groundsel



Joonis 2. Päikesepaneelide tugisammas koos hoideraamiga  
Figure 2. The solar photovoltaics panels groundsel with holding frame

Päikesepaneelid, kokku 18 tk, ühiku nimivõimsusega 245 W, osteti koos vajalike kinnitusdetailide ja inverteriga firmast Naps Solar Estonia OÜ (<http://napssolar.ee/>), kogumaksumusega 6252 eurot. Ehitatud päikese-elektrijaama arvutuslikuks koguvõimsuseks on 4,41 kW. Paneelid kinnitati spetsiaalsete klambritega eelnimetud terasest hoideraamile ja põhiline ehituskonstruksioon oli valmis (vt joonis 3).

Kui eelnimetud rahalistele kuludele lisada liitumistasu (348 eurot) ja vajalike mõõtmistega seotud kulud (500 eurot), on ehitamisega seotud otsesed rahalised väljaminekud kokku 7842 eurot. Ehitamiseks kulus orienteeruvalt 115 tundi, mille rahaline väärtus on umbes 500 eurot. Kui lisada juurde mitmesugused transpordikulud (u 100 eurot), siis kujunes päikeseelektrijaama ehitamise kogumaksumuseks 8500 eurot. Ühe installeeritud võimsusühiku vati maksumuseks seega 1,93 eurot.

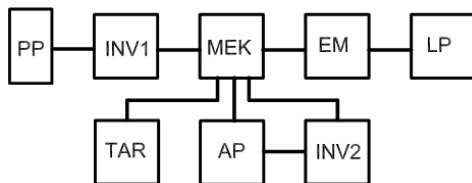
Vertikaalse telje ümber toimub paneelide pööramine programmkella poolt juhitava mootori abil. Reduktiiri koosseisus on tähtis roll suurel tigurattal ja teol, need hoiavad mootori seismise ajal paneelid paigal. Horisontaalse telje ümber toimub paneelide pööramine praegu käsitsi, kuid kavas on seegi liigutamine täielikult automatiseerida.

Päikesepaneelide ühendamine olemasoleva maja elektrisüsteemi ja -võrguga läks sujuvalt. Kogu mikroelektrijaama skeem on toodud joonisel 5.



Joonis 4. Otso talu päikeseelektrijaama vaade

Figure 4. The view of Otso farm solar photovoltaics station



Joonis 5. Mikroelektrijaama skeem. PP – päikesepaneelid, INV1 – esimene inverter, MEK – maja lülituste kilp, EM – kahesuunaline elektrienergia mõõtur, LP – liitumispunkt, TAR – elektritarbijad, AP – akupank, INV2 – teine inverter

Figure 5. The scheme of microelectric station. PP – photovoltaics, INV1 – the first inverter, MEK – switchboard, EM – duplex electric meter, LP – connection point, TAR – consumers of electric energy, AP – storage battery, INV2 – second inverter

Päikesepaneelidelt PP läheb alalisvool esimesse inverterisse INV1. Selles toimub muundamine ja edasi läheb kolmefaasiline vahelduvvool maja lülituste kilpi MEK. Seal saavad voolu maja üldised elektritarbijad TAR ja laaditakse akupank AP. Elektri ülejääk suunatakse läbi mõõtuuri EM ja liitumispunkti LP elektrivõrku. Kui tarbimine ületab päikesepaneelide toodangu, siis võetakse puuduv energia võrgust. Kogu tegevus toimub automaatselt. Soovi korral on võimalik maja lülituste kilbist MEK võrguühendus katkestada ja rahuldada tarbijate elektrivajadused akupangast AP läbi teise inverteri INV2. Praegu kasutatava akupanga energiamahutus on umbes 3 kW·h, mida on liiga vähe.

### Talu elektritarbimise ja mikroelektrijaama töötamise iseloomustus

Kirjeldatud päikeseelektrijaam valmis 2013. a suve lõpul ja võeti kasutusele sama aasta 6. septembril. Tolle aasta elektritoodang 6. septembrist kuni 31. detsembrini oli 739 kW·h. 2014. a oli päikesepaneelide elektritoodang 1. septembrist kuni aasta lõpuni 1025 kW·h.

Mikropäikeseelektrijaam on nüüdseks edukalt töötanud kaks aastat. Järgnevalt esitame kogu 2014. a ja 2015. a üheksa kuu päikesepaneelide elektritoodangu, võrgust võetud ja sinna saadetud ning talu kogu energiatarbimise andmed. Samuti esitame nn saldeeritud energiahulgad – võrku saadetud ja sealt võetud energiakoguste vahe. Kui vahe on negatiivne, siis loetakse seda kokkuleppe kohaselt nulliks.

Tabelist 1 selgub, et kõige vähem tootsid päikesepaneelid elektrit 2014. aasta lõpul novembris ja detsembris. Kuid just sel ajal on elektrienergiat kõige rohkem vaja, sest enamasti pole siis veel lund ja valitseb valgusevaene sügisilm. Jaanuarist alates (tavaliselt on sel ajal lumi maas) elektritoodang kasvab ja saavutab Otso talu mikrojaama andmetel maksimumi juulis. Jaama senise tööperioodi maksimaalne päevane elektritoodang registreeriti 2014. a 27. juunil, mil see oli 47,5 kW·h.

Tabel 1. Talu elektritoodang ja tarbimine 2014. a  
Table 1. The turnout of electricity at 2014

Jkr nr.	Kuu	Paneelide toodang, kW·h	Saadetud võrku, kW·h	Tarbimine võrgust, kW·h	Omatarve, kW·h	Saldeeritud kogus, kW·h
1	Jaanuvar	151	25	306	432	0
2	Veebruar	135	50	252	337	0
3	Märts	558	120	190	628	0
4	Aprill	895	734	174	335	560
5	Mai	666	527	215	354	312
6	Juuni	637	480	249	406	231
7	Juuli	967	743	238	462	505
8	August	677	494	280	463	214
9	September	599	455	280	424	175
10	Oktoober	313	182	473	604	0
11	November	84	49	575	610	0
12	Detsember	29	15	657	671	0
13	Kokku	5711	3874	3889	5726	1997

Tabel 2. Talu elektritoodang ja tarbimine 2015. a  
Table 2. The turnout of the farms electricity at 2015

Jkr nr.	Kuu	Paneelide toodang, kW·h	Saadetud võrku, kW·h	Tarbimine võrgust, kW·h	Omatarve, kW·h	Saldeeritud kogus, kW·h
1	Jaanuvar	35	15	316	336	0
2	Veebruar	188	94	282	376	0
3	Märts	427	288	285	424	3
4	Aprill	521	366	256	411	110
5	Mai	742	592	241	391	351
6	Juuni	850	648	280	482	368
7	Juuli	787	612	310	485	302
8	August	720	494	222	448	272
9	September	555	487	280	348	207
10	Kokku	4825	3596	2472	3701	1613

Tabelist 2 näeme, et kuude lõikes on elektritoodang võrreldes 2014. aastaga mõnevõrra erinev ja kogutoodang eelmise aasta sama ajaga (5285 kW·h) 460 kW·h võrra väiksem. Aastad pole ka sel alal vennad!

Päikesepaneelide maksimaalne võimsus, 4,45 kW, on registreeritud 2015. a augusti keskel. Siis, kui selge Päike paistis otse paneelidele ja tema ümber olid ilusad heledad pilved.

Päikesepaneelide asetuse mõju uurimiseks elektritoodangule tehti järgmine katse. 25. juunil 2014. a suunati juba hommikul paneeli normaal otse lõunasse ja paneel ise asetati vertikaali suhtes 40 kraadi kaldu. Niisuguse asetuse puhul saadi päevaseks elektritoodanguks 26,3 kW·h. Ka järgmisel päeval, 26. juunil 2014. a oli samasugune, täiesti selge ilm. Nüüd jäeti paneelide kalle vertikaali suhtes samaks (40 kraadi), aga vertikaaltelje ümber pööras mootor programmikella juhtimisel paneelide normaali Päikese poole selle tõusust kuni loojanguni, kokku umbes 240 kraadi. Päevane elektritoodang oli siis märgatavalt suurem, 41,2 kW·h. Võime järeldada, et paneelidega Päikese jälgimine suurendab oluliselt elektritoodangut. Seepärast vajab uurimist, kas saab senisest odavamalt valmistada jälgivaid süsteeme päikesepaneelide otstarbekaks liigutamiseks.

Saldeeritud energiakogused on arvelduste aluseks elektrienergia müüjatega. Kahjuks pole saadav tasu mikrotootjale praegu kuigi soodne. Seepärast on oluline suurendada akupanga energiamahu Otso talule sarnase elektritarbimisega majapidamistes (sellised on Eestis enamasti üheperekonnamaju) umbes 20 kW·h-ni. Arvame, et on vaja leida senisest odavamaid energia salvestusviise. Samuti leiame, et Otso talule sarnastes tarbimiskohtades on otstarbekohane kasutada 5 kW võimsusega päikesepaneelidega mikroelektrijaamu.

### **Soojuspumba kasutamine**

Otso talu aia servas asub üsna suur tiik. See võimaldas edukalt kasutusele võtta maasoojuspumba, mis saab tööks vajaliku energia võtta tiigist kui suurepärasest salvestist. Ühel talvel, kui pakane oli tiigi tugeva jääga kaanetanud, sai sellele paigaldada soojuspumbale vee soojust koguvad torud koos raskete kivist ankrutega (vt joonis 6). Kevadel, kui jää sulas, vajusid torud koos ankrutega tiigi põhja ning seisavad seal hästi paigas. Joliet-tüüpi soojuspump, mille väljundvõimsus küünib 13,5 kW-ni, toidab põrandaküttetorusid kuni 40 C° temperatuuriga veega. Soojuspump saavutab võimsusteguri (nn COP) ligi 4, sest ka talvel on tiigi põhjas vesi üle 4 C° soe.

Sooja vee saamiseks ja külmade ilmadega tubade täiendavaks soojendamiseks kasutatakse traditsioonilist puitkütust.



Joonis 6. Soojuspumba energiakogumise torustik koos ankrutega tiigi jääl  
Figure 6. The heat pump pipes with anchors on the pond ice

### **Kokkuvõte**

Otso talus Urvaste vallas on suuresti oma oskustega edukalt ehitatud 4,41 kW nominaalvõimsusega päikesepaneelidega mikroelektrijaam, mis töötab korralikult juba üle kahe aasta. Tänu programmkellale, mis aitab üsna hästi suunata paneelide normaali Päikesele, on võrreldes seisvate paneelidega saavutatud elektritootmisel suurem efektiivsus. Loodetavasti saab siinomandatud kogemusi edukalt rakendada päikesepaneelide uutel rakendustel mikrotootmises. Otso talus on ka maasoojuspumba efektiivseks töötamiseks hästi kasutatud lähedalasuva tiigi vett kui energiasalvestit.

### **Kirjandus**

- Märss, M., Järvik, J., Annuk, A., Allik, A., Uiga, J. 2014. Mikrotootmisjaamaga eramu elektrienergia tarbimise ja tootmise analüüs. –Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine XVI. Eesti Maaülikool, Tartu, 42–53.
- Palge, V., Arak, M., Jõgi, J. 2014. Tasapinnalise 2,5 m<sup>2</sup> päikesepaneeli töö tulemused ajavahemikus september 2013 kuni september 2014. –Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine XVI. Eesti Maaülikool, Tartu, 149–155.
- <http://napssolar.ee/>

## **THE UTILIZATION OF SOLAR ENERGY IN A FARM IN SOUTHERN ESTONIA**

Mihkel Jakobson, Valdur Tiit

The article describes nominal 4.41 kW power solar PV station, suitable for a farm. The Otso farm, where the experiment has been conducted, is situated in Southern Estonia. The support construction is made by the skilled engineer – the owner of Otso farm. The production and usage of electric energy is presented in tables.

Experiment confirms that the usage of tracking system works significantly better as the stationary panels system. For the station an integrated battery solution with a capacity of about 3 kW·h is used. In the Otso Farm, the energy collecting pipes of heat pump are in the pond.



# BIOSÖE TOOTMINE TASUB ÄRA – PROOVITUD TEHNOLOOGIAGA 20 ERINEVAST VÕIMALIKUST TOORMEST ÜHE PAINDLIKU PROTSESSIGA KUNI VIIS TOODET

Ahto Oja<sup>1</sup>, Harri Vesa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Balti Biometaan OÜ

<sup>2</sup> Gara Energy Systems GmbH, Raffael Schindele, Gara Energy Systems GmbH

## **Annotatsioon**

Biosütt on tehtud ja kasutatud mullaparandusainena aastatuhandeid. Metsanduse, põllumajanduse ja energiamajanduse arengukavade alusel saame järeldada, et tooret, mida söestada ehk raidmeid, kasutuseta puitu ja muid gaasistatavaid toormeid on Eestis piisavalt. Nende toormete majanduslikult tasuv kasutamine biosöe tootmiseks puudub, sh ei oma toorme niiskus ega tüki suurus tähtsust, pürolüüsida saab märgadest raidmetest kuni kändudeni. Seni on olnud pürolüüsil biosöe tootmiseks kaks takistust: (1) on puudunud stabiilset kvaliteeti tagav paindlik pürolüüsi tehnoloogia ja (2) biosöe tootmist ei ole käsitletud komplekselt, kaasates tasuvusarvutustesse holistiliselt kogu antud paikkonna toormevood ja energiatarbimised. GARA pürolüüsitehnoloogia on töötanud aastaid ja andnud stabiilselt kvaliteetset toodangut aastast 2006. GARA pürolüüsis on võimalik toota kuni 20 erinevast toormest ühe pürolüüsiprotsessiga kuni viis tulemust, mh biotaimekaitsevahendeid, biokütuseid, puugaasist koostootmisel elektrit, sooja ning kolme sorti sütt - biosütt, grillisütt ja aktiivsütt. Iga üksiku eeltoodud toote tootmine ei oleks majanduslikult kasulik, kuid omavahelises sümbioosis holistiliselt lähenedes on see aga tasuv. Paindlik protsess väikeste retortidega saab orienteeruda soojuskoormusele 0-100%, mis teeb selle tehnoloogia majanduslikult huvitavaks ka Eestis käimasolevas kohalike kaugküttevõrkude ümber ehitamisel kohalikele biokütustele. Kui renoveerida olemasolevaid katlamaju, siis võiks kaaluda lihtsalt soojatootmise asemel toota esmalt biosütt, mille kõrvaltoodeteks on paindlikult muundatud soojus ja vajadusel ka elekter. Samuti võib biosöe tootmine muuta tasuvamaks piima ja biometaanii tootmist, kui pürolüüsiprotsessi gaasidest toodetud elektrit ja sooja kasutatakse kohapeal. Huvitava tulemuse annab biosöe väärindamine biogaasi kääritusjäägiga, mis tõstab mõlema kvaliteeti. Pikemas perspektiivis, kui enamus biometaanii toodetakse Eestis rohelisest biomassist ja tekib kääritusjäägi ülejääk, saadakse kääritusjäägi ja biosöe segamisel kõrgete väetusomadustega, taimedele hästi omastatav bioväetis.

## **Sissejuhatus**

Loodusrahvaste tarkusest on paslik õppida ka tänapäeval. Amazonase indiaanlased teadsid, et biosüsi teeb mullale head ja sellel kasvab parem saak. Biosöe pikaajalisest

positiivsest mõjust mullale tuuakse näiteks just need samad Amazonase jõe kallastel maad harinud inkadest indiaanlased, kelle biosöe-rikkad mullad eristusid ümbritsevatel muldadest märksa suurema mullaviljakuse poolest, mis on säilitanud need omadused aastatuhandeid ja mille lääne uurijad avastasid alles mõnekümne aasta eest. Amazonase kunagiste inkade biosöerikast mulda on hakatud nimetama *Terra Preta de Indiano* (Terra – maa, pind, Preta – must), ehk indiaanlaste mustad mullad (Astover et al 2014).

Biosütt saadakse hapnikuvabas või –vaeses keskkonnas, kiiresti või aeglaselt biomassi kuumutades 300-1100 °C juures ning teatud rõhu all. Sõltuvalt toormest ja tehnoloogiast saadakse põllumajanduses mullaparandusainet ehk biosütt, grillisütt või aktiivsütt, neist viimast kasutatakse näiteks veepuhastus- ja biogaasi puhastusfiltrites. Biosöel on mitmeid omadusi, ta seob mh mullas vett ja toitaineid. Seni on biosöe tootmist enamjuhul käsitletud liiga kitsalt, keskendudes kas gaasilistele või vedelatele fraktsioonidele ning tahke fraktsiooni kasutamist eelolevatel viisidel.

Raave (2014) on uurinud ja toonud mitmed olulised järeldused biosöe kohta Eesti tingimustes: „*Biosüsi vähendab mulla lasuvustihedust ja suurendab selle veehoiuvõimet, poorsust ja Corg sisaldust. Mõju mulla pH-le on mõõdukas ning suurendamise kõrval võib mõni biosüsi seda ka vähendada. Toitainete sisaldus on biosöes väike, mistõttu see ei ole käsitletav väetisena. Biosüsi on mullaparandusaine, mille positiivne mõju põllukultuuridele seisneb tema võimes parandada taime jaoks toitumistingimusi läbi mulla happesuse neutraliseerimise, mulla parema õhustatuse, suurema niiskusesisalduse ja katioonide neelamismahutavuse. Biosöe mõju saagile on neutraalne.*

*Biosöe positiivset mõju saagile on seni kirjeldatud peamiselt troopikas ja lähistroopikas väga happelistel, väikese katioonide neelamismahutavuse ja süsiniku sisaldusega muldadel nagu seda on ka Amazonase jõe ääres Terra Pretasid ümbritsevad mullad. On võimalik, et Eesti kõige madalama viljakusega mullad on selleks liiga viljakad, et biosüsi nende viljakust parandaks. Biosöest saadav efekt on seda suurem, mida kontrastsemad on biosöe omadused võrreldes mulla omadustega. Vastasel korral tuleb muutuste esile kutsumiseks viia sütt mulda väga suur kogus. Teine võimalus on, et biosütt kasutatakse valesti. Tulu loodetakse saada puhta biosöe mulda viimisest, kuid tegelikult tuleks seda enne mulda viimist toitainetega rikastada või viia mulda koos orgaanikaga. Viimasele osutavad nii meie kui Saksamaal tehtud uuringu tulemused, mis näitavad, et võrreldes puhta biosöega, on saak suurem, kui biosütt antakse mulda koos kompostiga. Seda hüpoteesi toetavad ka Terra Preta muldade uuringu tulemused, millest selgus, et nende muldade viljakus ei põhine ainult biosöel, vaid see süsi on viidud mulda koos*

*majapidamises tekkinud orgaaniliste jäätmetega nagu luud, kondid, väljaheited jne.*

*Biosöe abil on võimalik vähendada  $NO_3$ -N,  $NH_4$ -N ja P leostumist ning kaitsta põhjaveid nendega saastumise eest, kuid sünteefektiivsus on siin erinev. Eesti tingimustes, kus mulla süsiniku bilanss on teraviljakasvatustes negatiivne, võiks biosütti kasutada mulla C sisalduse suurendamiseks ja stabiliseerimiseks. Samuti võiks olla biosööst kasu nitraaditundlikel aladel, kus see aitaks hoida toitaineid mullas kinni ja kaitseks seeläbi põhjavett põllult tulevate toitainete eest. Puidust biosöe tootmise asemel tuleks mõelda biosöe tootmisele põllumajandusliku tootmise kõrvalsaadustest nagu põhk, eurohein, kääritusjäägi tahke separaat jmt.”*

Uuritud on biosöe väetusomadusi, kuigivõrra ka tootmise tehnoloogiaid, kuid mitte biosöe majanduslikku tasuvust. Varasemad uuringud tõdevad ka, et biosöe kvaliteet on kõikumav ja stabiilset kõrgekvaliteedist biosütti ei ole võimalik toota. Küsimusele vastamiseks, miks seni pole Eestis biosöe tootmine käima läinud, tuleks läbi viia vastav uuring. Võib eeldada, et äriprojekte pole alustatud, kuna väidetavalt on toorme hind on kõrge ja toodangu hind madal – biosöe tootmine üksinda ei tasu ära. Probleem on selles, et seni on biosöe teemale lähenetud ühekülgelt. On puudunud holistiline lähenemine, konkreetse piirkonna sisend-väljund analüüsid, kus kaardistatakse ainete ja energia bilansid ja kaalutakse terviklikult majanduslikku, sotsiaalset ja keskkonnahoiu kasulikkust antud paikkonnas antud tingimustel.

## **Eesmärk ja meetodika**

Käesolevas artiklis püstitatakse hüpotees, et biosöe tootmine on majanduslikult tasuv, sh ilma toetusteta, selleks on olemas aastaid töötanud tehnoloogia ja sama toorme koguse juures on võimalik toota aga viis erinevat toodet, kusjuures toodang on stabiilselt kõrge kvaliteediga. Artikli eesmärk on tuua argumente hüpoteesi tõestamiseks. Meetodikaks on biosöealane uurimistööde ja tehnoloogiatega kirjeldus.

## **Tulemused**

Aluse majanduslikuks tasuvuseks loob ühe paindliku pürolüüsi protsessiga erinevate toodete tootmine ja selle optimeerimine tulusaimale tootele. Toome siinkohal viis valdkonda, milles sünnivad kasulikud tooted pürolüüsi abil:

1. Bioväetiste ja bioloogiliste taimekaitsevahendite tootmine
  - *Puu-äädikas (püroligniinine hape) on kõrgete väetusomadustega bioloogiline väetis;*
  - *Pürolüüsi geeli saab pärast lahjendamist kasutada bio-herbitsiidina.*
2. Erinevate biokütuste tootmine (gaasilised, vedelad, tahked)

- *Pürolüüsiigaasi (puugaas) kui gaaskütust kasutatakse erinevate seadmete / masinate (SEK ja / või soojamajanduses) käitamiseks;*
  - *Pürolüüsi õli on väga väärtuslik tooraine ja võib asendada fossiilseid vedelkütuseid transpordisektoris;*
  - *Pürolüüsi protsessi kütustest saab muundada elektrivoolu kodumajapidamistes või tööstuses tarbimiseks.*
3. Elektrienergia tootmine baaskoormuse ja paindliku pakkumise režiimis
- *“Jääksoojuse” ja tootmisprotsessis genereeritud gaaside kasutamine pürolüüsi-protsessi enda jaoks;*
  - *Kui soojuse, elektri ja / või gaasi salvestamise seadmed on paigaldatud - hakkab jaam täiskoormusel väga paindlikult andma elektrit lõppkasutajatele, mh on võimeline kiiresti reageerima suurenenud tarbimisele.*
4. Intelligentne soojakasutus
- *“Jääksoojuse” kasutamine kohaliku või maakonna (piirkonna) kaugkütte võrkudes;*
  - *“Jääksoojuse” kasutamine vee puhastamiseks ja / või reovee käitluseks;*
  - *“Jääksoojuse” kasutamine pürolüüsi jaoks puidu kuivatamisel või kasvuhoonetes või mujal (näiteks loomalautade ja/või biogaasijaamade soojatarbe rahuldamiseks).*
5. Kliimamuutuste stressi vähenemine, keskkonnakaitse ja muud avalikud hüved
- *Aktiivsöe kasutamine veepuhastusseadmetes ja muudes tööstuslikes rakendustes;*
  - *Grillsöe kasutamine tööstuslikes protsessides, nagu metallurgias ja elektrijaamades kivisöe asemel ehk taastuvenergia edendamine, aga ka toiduainetetööstus jne.;*
  - *Biosüsi koos komposti või biogaasi kääritusjäädiga väärindatult on kõige olulisem koostisosa “Terra Preta” pinnase parandamise aines;*
  - *Biosöe mulda viimist mullaparandusainena võib käsitleda ka süsiniku salvestamise (sekvesteerimise) ökoloogilise tehnoloogiana, mis oluliselt parandab mulda, selmet seda kasutuseta sügavale maa alla kaljukoobastesse pumbata, et ülemäärast süsinikku atmosfäärist välja viia.*

Tihtiilugu eelneva viie tulemusega komplekselt ei arvestada, samas on selge ka see, et bioloogiliste taimekaitsevahendite, vedelate biokütuste või süsiniku salvestamise positiivsete mõjude arvestamisel on veel arenguruumi.

## **GARA pürolüüsitehnoloogia**

GARA Energy Systems GmbH omab pürolüüsitehnoloogiat, mille üks reaalne tööstuslik tehas on töötanud alates 2006. aastast. Kvaliteetse ja stabiilse biosöe, grillsöe ja aktiivsöe tootmise tagab aastatepikkune arendustöö, intelligentne protsessi juhtimine,

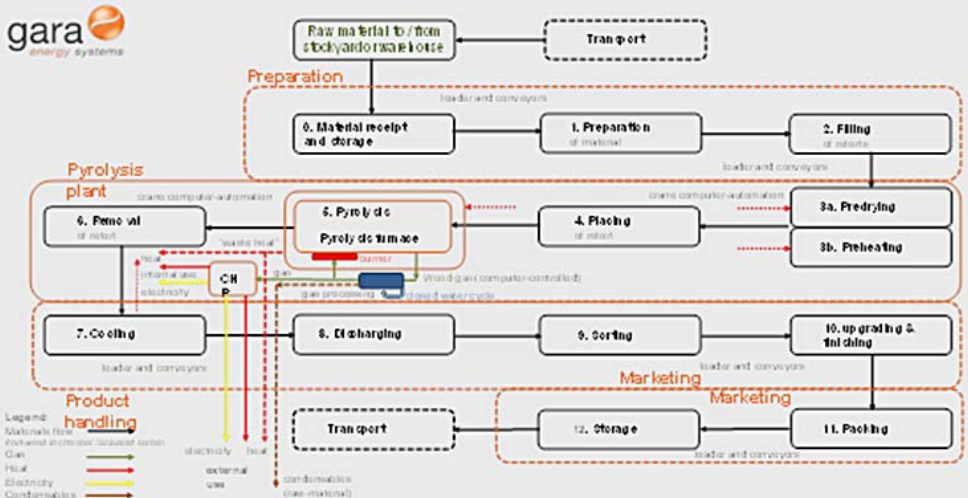
## Pürolüüsi tehase EL-s – grillsöe tootmine alates 2006 aastast



**gara partner**

Foto 1. Gara pürolüüsitehase tootmistehase fotod  
Photo 1. Photos of GARA pyrolysis factory

## Lihtsustatud pürolüüsi protsessi skeem



## Toorme ettevalmistus – pürolüüsiga biosöe tootmine – toote turustamine

Joonis 1. Gara pürolüüsitehase biosöe tootmise põhimõtteline skeem  
Figure 1. Simplified scheme of Gara pyrolysis plant biochar production process

väikeste retortide kasutamine (ruumalaga ligi 5 m<sup>3</sup>), toorme paindlikkus ja toodangu paindlikkus. Jadamisi ühendatud retortidest on võimalik madala soojuskoormusega perioodil kasutada ainult osa neist, seevastu näiteks talvel suure soojuskoormusega on töös kõik retordid.

Biosöe sisendmaterjalidena saab antud tehases kasutada metsanduse (raidmed), puiduvarumise ja puidutootmise jääk, kände, suuremõõtmelist puitu (läbimõõduga kuni 1,5 m), kookospähkli koori, luuviljaliste seemneid, põllumajanduse tahkeid jääke, põhku, reoveemuda jmt.

Table 1. Gara pürolüüsitehase biosöe tootmise näidistasuvusarvutus.

Table 1. Gara pyrolysis plants biochar production process model feasibility calculations.

Year of production	Amount	"price"	Increase p.a.	1 2016	2 2017	3 2018	4 2019	Gesamt
<b>Revenues</b>								
Total amount of produced charcoal								70 41.494.066
CHP: electricity (MWh)								78 6.636.941
CHP: heat (MWh)								23 6.055.178
Raw gas with distillates - pyrolysis of etc.								04 13.868.338
< > Ø 350 lit wood < >								
<b>Total revenues</b>								
<b>Costs</b>								
Raw materials / wood mass [t]								11 -11.667.014
Maintenance and retort replacement								46 -12.962.302
Wages and salaries								45 6.348.553
Estimated depreciation								85 -27.260.367
<b>Total operating expenses</b>								
<b>EBIT</b>								
Interest expense								01 40.794.156
Business tax (simplified) 20%								92 -2.823.018
Corporation tax (simplified) 16,35%								96 -4.651.464
Win / loss (-)								83 -6.208.281
Depreciation								05 28.034.098
Cash-flow								45 -6.348.553
Auszahlung Darlehen (Fremdkap.)								21.685.545
Investment / capital costs								7.870.585
Repayment loan								-7.870.585
Cash after repayment of loan (simplified)								0 -7.870.585
<b>IRR:</b>		19,72%		1.910.901	1.091.540	1.482.977	1.530.060	13.814.960
<b>NPV:</b>		7.960.460 €		7.870.585				7.870.585
< > 5,00%				-7.870.585	0	-787.058	-787.058	-787.058
								-7.870.585
								05 28.034.098
								45 -6.348.553
								01 40.794.156
								92 -2.823.018
								96 -4.651.464
								83 -6.208.281
								05 28.034.098
								45 -6.348.553
								01 40.794.156
								92 -2.823.018
								96 -4.651.464
								83 -6.208.281
								05 28.034.098
								45 -6.348.553
								01 40.794.156
								92 -2.823.018
								96 -4.651.464
								83 -6.208.281
								05 28.034.098
								45 -6.348.553
								01 40.794.156
								92 -2.823.018
								96 -4.651.464
								83 -6.208.281
								05 28.034.098
								45 -6.348.553
								01 40.794.156
								92 -2.823.018
								96 -4.651.464
								83 -6.208.281
								05 28.034.098
								45 -6.348.553
								01 40.794.156
								92 -2.823.018
								96 -4.651.464
								83 -6.208.281
								05 28.034.098
								45 -6.348.553
								01 40.794.156
								92 -2.823.018
								96 -4.651.464
								83 -6.208.281
								05 28.034.098
								45 -6.348.553
								01 40.794.156
								92 -2.823.018
								96 -4.651.464
								83 -6.208.281
								05 28.034.098
								45 -6.348.553
								01 40.794.156
								92 -2.823.018
								96 -4.651.464
								83 -6.208.281
								05 28.034.098
								45 -6.348.553
								01 40.794.156
								92 -2.823.018
								96 -4.651.464
								83 -6.208.281
								05 28.034.098
								45 -6.348.553
								01 40.794.156
								92 -2.823.018
								96 -4.651.464
								83 -6.208.281
								05 28.034.098
								45 -6.348.553
								01 40.794.156
								92 -2.823.018
								96 -4.651.464
								83 -6.208.281
								05 28.034.098
								45 -6.348.553
								01 40.794.156
								92 -2.823.018
								96 -4.651.464
								83 -6.208.281
								05 28.034.098
								45 -6.348.553
								01 40.794.156
								92 -2.823.018
								96 -4.651.464
								83 -6.208.281
								05 28.034.098
								45 -6.348.553
								01 40.794.156
								92 -2.823.018
								96 -4.651.464
								83 -6.208.281
								05 28.034.098
								45 -6.348.553
								01 40.794.156
								92 -2.823.018
								96 -4.651.464
								83 -6.208.281
								05 28.034.098
								45 -6.348.553
								01 40.794.156
								92 -2.823.018
								96 -4.651.464
								83 -6.208.281
								05 28.034.098
								45 -6.348.553
								01 40.794.156
								92 -2.823.018
								96 -4.651.464
								83 -6.208.281
								05 28.034.098
								45 -6.348.553
								01 40.794.156
								92 -2.823.018
								96 -4.651.464
								83 -6.208.281
								05 28.034.098
								45 -6.348.553
								01 40.794.156
								92 -2.823.018
								96 -4.651.464
								83 -6.208.281
								05 28.034.098
								45 -6.348.553
								01 40.794.156
								92 -2.823.018
								96 -4.651.464
								83 -6.208.281
								05 28.034.098
								45 -6.348.553
								01 40.794.156
								92 -2.823.018
								96 -4.651.464
								83 -6.208.281
								05 28.034.098
								45 -6.348.553
								01 40.794.156
								92 -2.823.018
								96 -4.651.464
								83 -6.208.281
								05 28.034.098
								45 -6.348.553
								01 40.794.156
								92 -2.823.018
								96 -4.651.464
								83 -6.208.281
								05 28.034.098
								45 -6.348.553
								01 40.794.156
								92 -2.823.018
								96 -4.651.464
								83 -6.208.281

ta. Samas, võtmeküsimuseks jääb piisav aastaringne soojatarbimine antud paikkonnas. Kuid GARA paindlik elektri- ja soojatootmise režiim võimaldab jälgida paikkondlikku soojuskoormuse kõverat ja seetõttu on see tehnoloogia konkurentsivõimeline.

Tabel 2. Gara pürolüüsitehase biosöe tootmise tulud antud näidistasuvusarvutuses.  
Table 2. Gara pyrolysis plants biochar production process income in model feasibility calculations.

Input from market	Throughput out	Throughput in	Output to market	Explanation for calculations
Ø 29,4 €/t Wood			Ø 476 €/t coal	different charcoal qualities
27.920 t/a Wood			6.142 t/a coal	and activated carbon
<b>822.082 €/a</b>			<b>2.924.000 €/a</b>	<b>solids for market</b>
	gas		<b>electricity / heat</b>	
			10,00 ct/kWh	
			5.531 MWh/a	
	9.999.999 MWh/a	32.249 MWh/a	<b>553.078 €/a</b>	<b>electricity for FO &amp; market</b>
	999.999.999 m³/a	7.677.937 m³/a	6,00 ct/kWh	
			7.111 MWh/a	
			<b>426.660 €/a</b>	<b>heat for FO and market</b>
	destillates	destillates		
	100,00 €/m³			
	9.772 m³/a			
<b>revenues gara</b>	<b>977.192 €/a</b>	"payment from FO"	<b>sales revenues</b>	<b>destillates for market</b>

Lihtsustatud esimese aasta kulu-tulu analüüsis näeme (tabel 2), et 12 retordi käitamiseks kulub aastas 27 920 tonni puitmaterjali, mida hangitakse hinnaga 29,4 €/t, biosöe, grillsöe ja aktiivsöe keskmise turuhind on 476 €/t ning aastas toodetakse 6 142 t sütt, millest saadakse tulu 2,924 mln eurot. Elektrimüügist on Saksamaa hinna 0,1 €/kWh juures tulu pool miljonit eurot, kui koostootmisel muundatakse 5 531 MWh/a. Tulud soojatootmisest on alla poole miljoni euro müügihinna juures 60 €/MWh. Ligi miljon eurot on tulu, kui vedelate pürolüüsiõilide müük toimub hinnaga 100 €/m³ ja kogus on 9 772 m³/a.

### Kokkuvõte

Biosöe muudab Eestis tasuvaks just nimelt tervikliku, samas paikkondliku holistilise lähenemisega tootmis-tarbimismudeli kasutamine, mille puhul biosöe, grillsöe ja aktiivsöe ning bioõlid saab eksportida, seevastu soojuse ja elektri saab tarbida kohapeal. Seda võiks silmas pidada nii kohalikud kaugkütte katlamajad, kes asendavad fossiilse maagaasi või põlevkiviõli puiduhakkega kui ka tootmisprotsessid, kus tarbitakse suu-

rel määral elektrit ja sooja, sh kõrgetemperatuurset soojust või auru. Lisaks saadavale elektrile ja soojale on võimalik maha müüa biosüsi, grillsüsi või aktiivsüsi ja bioõlid. Biometaani kääritusjäätisega saab rikastada biosütt, mis granuleerimise järel on sobilik eksporditav. Seda asjaolu saab eriti arvestada lähitulevikus, kus biometaan toodetakse rohtsest biomassist ning tekib kääritusjäätis ülejääk.

### **Kasutatud kirjandus**

- Astover, A., Raave, H. & Rossner, H. 2014. Biosöe potentsiaal põllumajanduses. Maaleht, 24. märts 2014. <http://maaleht.delfi.ee/news/maamajandus/uudised/biosoe-potentsiaal-pollumajanduses?id=68266931>
- Gara Energy Systems GmbH 2015. Pürolüüsiiga biosöe tootmine. <http://www.gara-energy.de/downloads.html>
- Raave, H. 2014. Alternatiivsete väetussainete keskkonnahoidliku kasutuse võimalused ja efektiivsus tava- ja maheviljeluses võrdlevalt traditsiooniliste orgaaniliste ja mineraalväetistega. Projekti lõpparuanne. EMÜ. [http://www.pikk.ee/upload/files/Alternatiivsed\\_vaetusained\\_Projekti\\_lopparuanne.pdf](http://www.pikk.ee/upload/files/Alternatiivsed_vaetusained_Projekti_lopparuanne.pdf)

## **BIOCHAR PRODUCTION IS FEASIBLE, WHILE PRODUCING WITH FLEXIBLE PROVEN TECHNOLOGY IN ONE PROCESS FROM 20 RAW MATERIAL UP TO 5 PRODUCTS**

Ahto Oja, Harri Vesa

Biochar production is not feasible, if the focus is only on biochar. The Gara biochar production technology is flexible for heat consumption, it has holistic approach to use all potential of local renewable resources and to consume electricity and heat locally with flexible regime. The biochar, charcoal and active coal can be exported. The feasibility is attractive for investors (IRR is up to 24%), when the input is bought with price of 29,4 €/t, the biochar is sold with price of 476 €/t, the annual biochar production is 6 142 t/a. In that case the income from selling renewable electricity and heat is around half million euros (electricity unit price: 0,1 €/kWh, heat unit price: 60 €/MWh). The income from selling the liquid biofuels is around 1 million euro (the unit price is: 100 €/m<sup>3</sup> and amount is 9 772 m<sup>3</sup>/a).



# PÄIKESEENERGEETIKA JA PERSPEKTIIVID VESINIKUNA SALVESTAMISEL

Tiit Kallaste

SEI Tallinn, tiit.kallaste@seit.ee

## **Annotatsioon**

Päikesekiirguse ja tuulejõu energia on peamised taastuvad energiaallikad, mille varudest inimkond täna vaid väga väikese osa oskab ära kasutada. Kuid see osa kasvab koos tehnoloogia arenguga nendes sektorites kiires tempos kogu maailmas. Päikeseelektrijaamade kiire juurdekasv paljudes riikides tähendab fossiilkütuste baasil elektri genereerimise järjekindlat vähenemist, millega kaasneb kliima soojenemist põhjustavate kasvuhoonegaaside heite järsk kahanemine. Päikeseelektrijaamade rajamine omakorda annab võimaluse energia salvestamiseks vesinikuna, mida saadakse vee elektrolüüsil ja mida on võimalik vajadusel kasutada ka siis, kui päike ei paista. Kütuseelementide baasil toimiv vesinikuenergeetika on Maailma Energeetikanõukogu poolt tunnustatud lähikümnendite teedrajavaks arengusuunaks. Artikkel annab põgusa ülevaate päikeseenergia kui ühe taastuva energiaallika kiirest arengust ning perspektiivsetest võimalustest süsinikuvaba majanduse loomisel.

Märksõnad: IPCC, KHG, päikeseenergia muundamine, päikeseelektrijaam, PV-paneelid, mikrotootmine, vesinik, taastuenergia toetus, kütuseelemendid.

## **Kliima soojenemine ja püüd seda pidurdada taastuenergia edendamisega**

Taastuenergia on nii maailmas kui ka Euroopas järjest enam populaarsust võitev valdkond eelkõige kliimamuutustest tingitud ohtude ja fossiilsete kütuste liigtarbimise tõttu. Kliima soojenemise üheks peamiseks põhjuseks loetakse kasvuhoonegaaside (KHG), nagu süsihappegaasi, metaani, lämmastikoksiidi, fluori-, väävli- ja süsinikuühendite (HFCs, PFCs, SF6) järjest suurenevat paiskamist Maa-lähedasse õhukihti, mis omakorda laseb küll läbi Päikese ultraviolettkiirguse, kuid Maalt tagasipeegelduvat soojuskiirgust mitte. Fossiilsete kütuste põletamisega tööstuses, elektri ja soojuse tootmisel, transpordis ja mujalgi, kaasneb peamiselt süsihappegaasiheidet. Kõigile arusaadavaks lahenduseks on saavutada tänapäevaseid lähenemisviise kasutades väiksem KHG-heide. Sellel on iseenesest kaks positiivset resultaati, Maa-lähedase õhukihi soojenemine ei kasva enam endise kiirusega, mis annab lootust kliimamuutuste mõju pidurdumisele. Ja mitte vähemoluline on, et paraneb märkimisväärselt toote- või teenuseühikule kulutatud materjali- ja energiahulk. Viimane omakorda tähendab väiksemaid KHG-heideid õhku.

Valitsustevahelise kliimamuutuste paneeli, IPCC (ingl k *Intergovernmental Panel of Climate Change*) üks viimaseid kinnitusi on, et inimtegevuse mõju kliimasüsteemile on selge ja kasvab pidevalt. Mõjusid on seiratud üle kõigi kontinentide ja ookeanide. Eksperdid väidavad end olevat 95% kindlad, et inimtegevus on praeguse kliima soojenemise põhjustaja. Lisaks märgitakse trükivalgust näinud IPCC sünteesraportis, et mida enam mitmesugused inimtegevused rikuvad kliima tasakaalu, seda suurem on tõsiste ja pöördumatute negatiivsete mõjude risk inimestele endile ja ökosüsteemidele ning pikaajalistele muutustele kliimasüsteemide kõikides komponentides (Rajendra jt 2015). Raport kinnitab, et meie käsutuses on palju erinevaid vahendeid piirata kliimamuutusi ja sellest tulenevaid riske, aga üleilmselt seatud eesmärk – temperatuuri kasvu piiramine alla 2° Celsiust võrreldes nn eelindustriaalse perioodiga, nõuab ilmselgelt senise arengutee korrigeerimist.

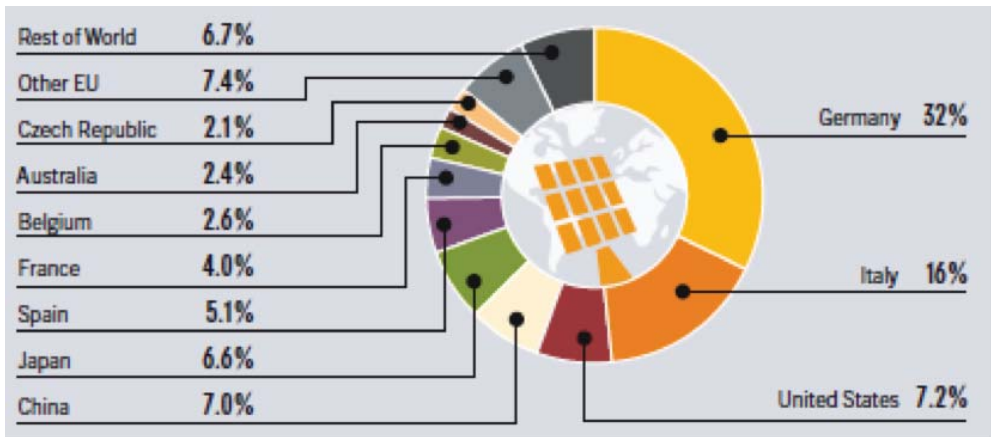
Energiatootmine on vaieldamatult suurim ülalloetletud KHG õhkupaiskaja ja seega üks peamisi sektoreid, kus kliimamuutuste leevendamiseks mõjusaid meetmeid esmajärjekorras tuleb rakendada. Eestis põlevkivist elektri tootmise keskkonnamõjud avaldavad CO<sub>2</sub>-heitmetena globaalset mõju, kõik ülejäänud kaasnevad mõjud jäävad aga siia. Mida efektiivsemalt elektrit toota, seda vähem tarbitakse ressursi ja paisatakse keskkonda heitmeid, sh kasvuhoonegaase. Tõhusam elektritootmine loob omakorda eeldused väiksema mõju avaldamiseks kliima soojenemisele ja kliimamuutustega paremaks kohanemiseks ning vajaminevate ressursside (rahaliste, tööjõu, materjalide jms) kasutamiseks. Kliima soojenemise leevendamisele aitab enim kaasa taastuvate energiaallikate tuulejõu, langeva vee, päikesekiirguse ja biomassi laialdasem kasutuselevõtmine fossiilsete asemel, kuna vähendab KHG õhkupaiskamist. Selle tulemusel kliima soojenemine aeglustub võrreldes olukorraga, mil kasutatakse fossiilseid kütuseid. Taastuvate energiaallikate laialdasem kasutuselevõtmine on üks nendest efektiivsetest võimalustest, mida tuleb kliimamuutuste pidurdamiseks kasutada. Kui see õnnestub, siis seda vähemal määral tuleb ühiskonnal tegeleda kliimamuutustega kohanemisega ja reserveerida kohanemismeetmete elluviimiseks vajalikke ressursse.

### **Päikeseenergia kasutuselevõtmise hoogne kasv**

Päikesekiirguse energiat võib õigusega pidada ammendamatuks energiaallikaks, mille kasutamisel ei teki kliimamuutusi esilekutsuvaid õhu saasteainete heiteid ega ka muid jääkaineid. Samas on päikeseenergia laialdasem kasutuselevõtmine väga suure perspektiiviga. Päikesele avatud kohtades ülesseatud fotoelektrilised ehk levinuma nimega PV-paneelid (ingl k *solar photovoltaic panels*) võimaldavad edendada lokaalset, hajutatud elektritootmist, mis omakorda aitab vähendada elektrienergia ülekandega kaasnevaid

liinikadusid, tormituulte tekitatud liinide ja mastide kahjustusi ja sellest tulenevaid voolukatkestusi ning mitmeid muid elektrivõrkudega seonduvaid riske. Päikeseenergia osa kasvab tänu PV-paneelide maksumuse järjepidevale vähenemisele kiires tempos kogu maailmas. Juhtivateks riikideks kogu maailma arvestuses on Saksamaa, Itaalia, USA, Jaapan, Hiina jt, kes 2012. a lõpuks olid enim rajanud päikeseenergiat elektri muundavate elektrijaamade installeeritud võimsust, vt joonis 1.

Saksamaa oli 2013. a lõpuks installeerinud 35,7 GW päikese-PV võimsusi, mis moodustab kolmandiku globaalsest võimsusest. PV-paneelidega toodetud elekter (29,7 TWh) moodustab 5,7% Saksamaa elektritoodangust (Weiss 2014). Taastuvenergia tootmise sihtarvud on ambitsioonikad – 40–45% elektritarbimisest taastuvatest allikatest 2025. aastaks ja 55–60% 2035. aastaks). 2014. a oli Saksamaa vastav näitaja 25% (Jaramillo 2014).

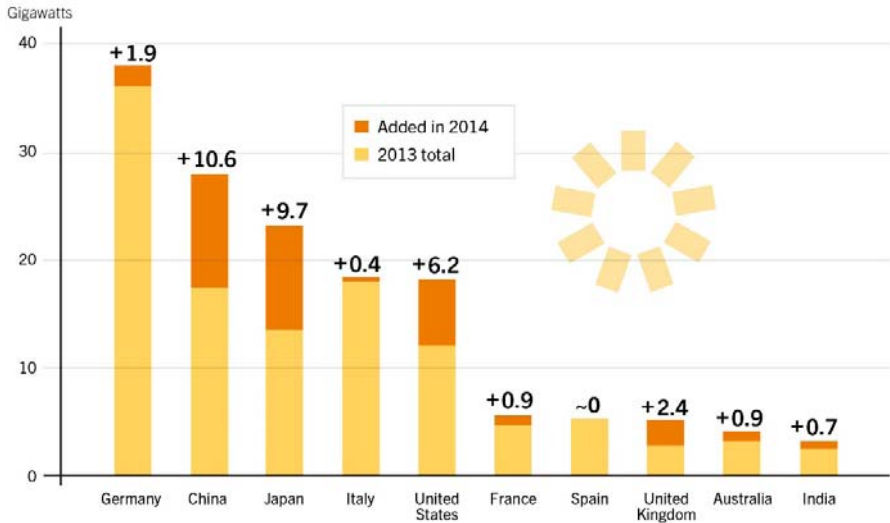


Joonis 1. Installeeritud päikeseenergia muundamise võimsus maailmas 2012. a lõpuks  
 Figure 1. Installed solar PV capacity globally by the end of 2012 (Renewables 2013)

Maailmas toimub käesoleval ajal lausa võidujooks PV-paneelide ülesseadmisel. Sellest annab tunnistust fakt, et kahe aasta jooksul (2012–2014) on ülalesitatud pingerida muutunud – Saksamaa järel on ennast teisele kohale rebinud Hiina, järgnevad Jaapan, Itaalia ja tugeva spurdi teinud USA, kes siiski oma senise 4. koha Itaaliale on pidanud loovutama, vt joonis 2.

Nii on ühe aastaga (2014) enim päikeseelektri tootmise võimsusi lisanud Hiina, Jaapan ja USA.

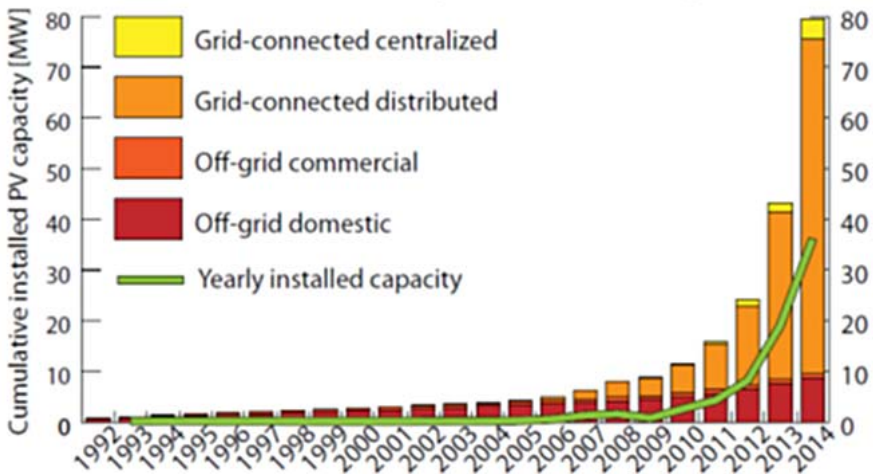
## Solar PV Capacity and Additions, Top 10 Countries, 2014



REN21 *Renewables 2015 Global Status Report*



Joonis 2. Installeeritud päikeseenergia muundamise võimsus maailmas 2014. a lõpuks  
Figure 2. Installed solar PV capacity globally by the end of 2014 (Renewables 2015).



Joonis 3. Rootsis installeeritud kumulatiivne PV-paneelide võimsus, MW  
Figure 3. Cumulative installed PV capacity, MW (Lindahl 2014)

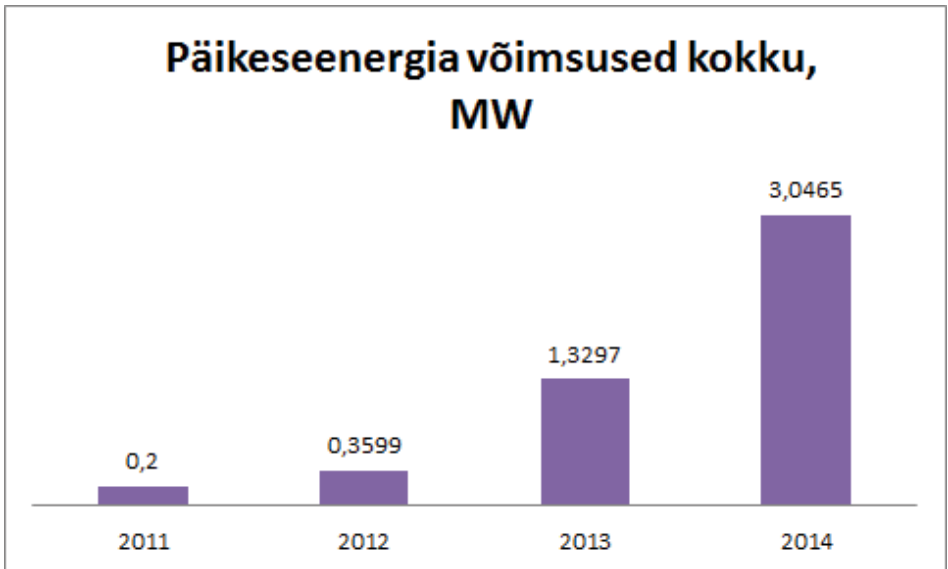
Rootsis, kus kliimaatilised tingimused Eestiga üsna lähedased, on viimastel aastatel päikeseenergiast elektri tootmisele väga suurt tähelepanu osutatud. Areng, sarnaselt juhtpositsioonidel olevate riikidega, on olnud hüppeline, nagu nähtub alltoodud arengutrendi kirjeldavast diagrammist, vt joonis 3.

See annab veelkord tunnistust, et ka Eesti kliimaatilised tingimused oma keskeltläbi 2000 päikeselise tunniga aastas pakuvad piisavalt võimalusi päikesekiirguse tõhusaks kasutamiseks reostusvaba elektritootmise edendamisel (Statistikaamet 2014).

### **Päikeseenergeetika senised arengud Eestis**

Sarnaselt Rootsil on ka Eestis PV-paneele kasutavate võrguühendusega mikrotootjate arv hüppeliselt kasvanud. Päikeseenergia muundamine elektrienergiaks on osutunud tuuleenergia kasutuselevõtmise kõrval teiseks suurima juurdekasvutempoga taastuvate energiaallikate rakendamise valdkonnaks. Kui nt 2014. a lisandus ligi 100 erineva elektrilise võimsusega tootjat ja koguarv ulatus 211-ni, siis 2015. a suveks on ametlikult registreeritud ja seega ka toetust saavate üksuste arv tõusnud juba 259-ni. Taastuvenergia-toetust makstakse elektrituruseaduse §59 alusel kõikide taastuvate energiaallikate poolt toodetud energia eest (Riigi Teataja 2015). Seega eelmise aastaga võrreldes on kasv üle kahe korra. Toodetud elektrienergia maht kasvas Eleringi andmetel neli ja pool korda – 117 MWh-lt 524 MWh-ni (Elering 2015). 2014. a seisuga oli Eestis installeeritud päikesepaneelide koguvõimsusega juba enam kui 3MW. PV-paneelide paigaldusfirmade hinnangul ulatub installeeritud koguvõimsus käesolevaks ajaks vähemalt 4 MW-ni. Kuna eeldatavalt tarbivad enamuse toodetud päikeseelektrist paljud ettevõtjatest mikrotootjad ise kohapeal, võib päikesepaneelide abil toodetud elektri üldkogus olla toetust saanud jaamade üldkogusest hinnanguliselt kordi suurem. Kõigi taastuvate energiaallikate baasil toodetud elekter moodustas 2015. a esimeses kvartalis kogutarbimisest 17,3 protsenti ja oli 439 GWh, ja teises kvartalis 16,7 protsenti ja oli 346 GWh (Elering 2015).

Arvestades mikrotootjate huvi võrguliitumiste vastu ja eriti päikeseenergia osas, lihtsustas põhivõrguettevõtte oluliselt taastuvenergia toetuse taotlemist eraisikutest tootjatele. Alates 2015. a augustist on tootjatel võimalus otse Eleringi poolt hallatavas elektrituru andmelaos, kus asuvad tootja tunnipõhised mõõteandmed, kinnitada eeltäidetud taastuvenergia toetuse taotlus ja suunata see kohe kontrollimiseks ning edasi juba väljamaksmisele. Varasemalt tuli taastuvenergia toetuse taotlejatel edastada andmed tabelisse kantuna e-posti teel. Toetuse taotlemise lihtsustamine peab eeskätt silmas kiirelt kasvavat PV-paneelidega elektrit tootvate eraisikute arvu kasvu. Nagu öeldud, nende arv on viimase aastaga kahekordistunud ja igal nädalal lisandub kolm kuni neli uut toot-



Joonis 4. 2014. aasta seisuga oli Eestis installeeritud PV-paneelide koguvõimsusega juba enam kui 3 MW (Eesti ... 2015)

Figure 4. The capacity of installed solar PV panels capacity exceeds 3MW by the end of 2014

jat või toetuse taotlejat. Kokku on Eleringi poole pöördunud ligi 300 MW(!) võimsuse ulatuses päikesepaneelidega elektrit toota soovivaid huvilisi (Taastuenergia... 2015). See on arv, mis iseloomustab tuulesektoris seniajani installeeritud võimsusi ning näitab suurt huvi asja vastu. Eesti Taastuenergia Koda on koostanud diagrammi päikeseenergia muundavate PV-paneelide installeeritud võimsuse dünaamikast viimase nelja aasta kohta. Sarnaselt maailmas toimunud trendidega näitab joonis selgesti buumitaolist huvi päikeseenergia baasil elektri tootmise vastu (Eesti... 2015).

Rahva seas levib mõtteviis, et PV-paneelide või päikesekollektorite (soojust tootvad päikesepaneelid) soetamine on oma pensionipõlve kindlustamiseks märkimisväärselt tulusam viis võrreldes säästude pensionifondidesse paigutamisega.

#### **Toetused taastuvate allikate baasil elektri tootmise eest**

Eestis on päikeseenergia muundamine elektrienergiaks osutunud tuuleenergia hüppelise arengu kõrval teiseks suurima juurdekasvutempoga taastuvate energiaallikate rakendamise valdkonnaks. Eriti levinud on kodumajapidamiste tasemel PV-paneelide, päikesekollektorite ja väiketuulikute ülesseadmine oma tarbeks. Mikrotootmine, nagu seda ka rahvusvaheliselt määratletakse, on elektri või soojuste koos või eraldi tootmine enda või väiksema ettevõtte tarbeks. Euroopa Komisjon eristab võrguühendusega

ja autonoomseid energia genereerimise süsteeme. Seejuures võib mikrotootja tarbida kogu genereeritava elektri või selle osa, mis enda tarbimisest üle jääb, müüa võrku või salvestada kohapeal (Meesak 2013). Eestis on võrguettevõtja AS-i Elering eeskirjade järgi mikrotootjad need elektritootjad, kelle poolt võrkuantav tootmisvõimsus on kuni 11 kW. Juba suuremaid, 11–200 kW nimetatakse pisitootjateks ja alates 201 kW kuni 5 MW – väiketootjad ning sellest suuremad – juba suurtootjad.

Taastuvenergiatoetust makstakse, nagu eelnevalt mainitud, elektrituruseaduse §59 alusel kõikide taastuvate energiaallikate poolt toodetud energia eest. Seoses muudatustega elektrituruseaduses makstakse alates 1. maist 2007 toetusi elektrienergia eest, mis on toodetud taastuvatest energiaallikatest, koostootmise režiimil biomassist või töhusa koostootmise režiimil. Võrku antud elektrienergia toetuste ja ostukohustuse rahastamise kulud tasutakse võrgutasudest (Riigi Teataja 2003). Vastavalt elektrituruseadusele maksab toetused välja põhivõrguettevõtja – AS Elering. Aluseks on võetud üldtunnustatud klassifikatsioon, mille järgi taastuvateks energiaallikateks loetakse kehtiva elektrituruseaduse mõttes vesi, tuul, päike, laine, tõus-mõõn, maasoojus, prügilagaas, heitvee puhastamisel eralduv gaas, biogaas ja biomass. Nendest allikatest toodetud elektrienergia on taastuvenergia ja seda toetatakse 5,37 euroasendiga kilovatt-tunni kohta (Taastuvenergia... 2015). Elering peab oma andmelaos täpset arvestust taastuvenergia tootjatele vastava toetuse väljamaksmise kohta, kus taastuvate allikate, v.a biomassist toodetud elektrienergia eest makstavad toetused nimeliselt kirjas on ning need andmed on veebilehel avalikult kättesaadavad. 2014. a maksti toetusi kõikide ülalpool loetletud taastuvate allikate baasil elektritootjatele, sh ettevõtted ja eraisikud, kokku 59,7 mln EUR (Taastuvenergia tootjatele... 2015).

### **Vesinik päikeseenergiast toodetud elektri abil**

Päikeseelektrijaamade tormiline juurdekasv tähendab fossiilkütuste baasil elektri genereerimise järjekindlat vähenemist, millega omakorda kaasneb kliima soojenemist põhjustava KHG-heite kahanemine. Päikeseelektrijaamade rajamine annab tõuke ja tekitab vajaduse mittekorrapäraselt toodetud elektrienergia salvestamiseks. Eriti on see teema aktuaalne siis, kui toodetavale elektrienergiale puudub lihtsaltrakendatav alternatiivne lahendus. Seni enamlevinud lahenduseks on salvestamine akumulaatorpangas või superkondensaatoris. Kuid ka need pole veel piisavalt head lahendused. Superkondensaatorite arendustöö kestab juba kümnendeid, tavakasutuse tarbeks sobivaid prototüüpe on aga veel vähe. Päikeseelektrijaama poolt toodetud elektrile võib leida kasutusvõimaluse kas mõne elektrit mõistlikult tarbiva tootmisüksuse, nt puidukuivati käitamiseks, mille puhul ei ole lausa hädavajalik ööpäevaringne toide. Või maakoha reljeefi ära kasutades

vee pumpamiseks allpoolpaiknevast veekogust kõrgemasse, et siis vajadusel langeva vee jõudu jälle elektri muundada, nagu seda ühel varasemal TEUK-i konverentsil suurema majapidamisega energiavarustuseks on pakutud, vt (Tamm jt 2013). Märksa energiatõhusamaks mooduseks on võrguühenduse piirangute või nende puudumisel elektrolüüsiga vee lagundamise teel toota vesinikku ja hapnikku ning neid eraldi koguda. Vesinikku on võimalik kasutada ka siis, kui päike ei paista, kuid elektrit on vaja, nt tuuleparkide poolt toodetava elektrivoo ühtlustamiseks. Hapnik leiab juba ammu kõige mitmekesisemaid rakendusviise. Tuule- ja päikeseenergia abil elektri- ja vesinikutootmise kombineerimine võimaldab kokkuvõttes märksa tõhusamat ja ühtlasemat elektri genereerimist. Sellist kombinatsiooni on edukalt kasutatud Saksamaal (Hydrogenics... 2013). Ebäühtlaselt toodetava elektrienergia akumuleerimine vesinikuna avab kindlasti ka Eesti jaoks põhimõtteliselt uue perspektiivi, pakkudes energiatõhusaid võimalusi hajutatud elektrivarustuseks.

Vesinikku kasutatakse ka lokaalseks soojuse- või elektritootmiseks. Samuti kompresseritud maagaasil (ingl k CNG – *Compressed Natural Gas*) töötavate busside ja muude sõiduvahendite kütusena. Eriti oluline on see linnatingimustes, sest vesinikkütuse kasutamisel inimesele toksilisi heitgaase linnaõhku ei heideta. Tartu on selles osas pioneer, surugaasi-bussid on linnaliikluses käigus juba õige mitu aastat. Kui kütuseks on vesinik, siis on suitsugaaside asemel heiteks vaid vesi ja soojus, maagaasi puhul aga ka veel süsihappegaas, diisli puhul aga terve spekter kahjulikke põlemisjääke, sh lämmastikuühendeid, vingugaasi, tahma, peenosakesi jpm.

Euroopa linnades sõidavad juba aastaid vesinikku tarbivate kütuseelementide baasil töötavad ühistranspordibussid, sõiduautodest rääkimata. Võib julgelt väita, et kütuseelementid on kogu maailma energeetika tulevik. Juba täna genereerivad need elektrit, kütavad hooneid ning vahetavad transpordis välja fossiilseid kütuseid.

Eestis käivitas AS Elcogen erakapitali baasil 2001. a kütuseelementide teadusuuringud paralleelselt kahes keskusel, Tartu ülikooli tollaegses Füüsikalise keemia instituudis ja Tallinnas TA Keemilise Bioloogia ja Füüsika Instituudis. Aasta pärast uurimistöö alustamist oli Tartu ülikooli töögrupp leidnud lahenduse küsimusele, mis oli ja on väga paljude teadlaste ja ettevõtete huvi keskpunktis kõikjal maailmas ning millele on kulutatud sadu miljoneid dollareid (Niitra 2003). Tartu ülikoolis töötava akadeemiku Enn Lusti sõnul on peamine see, kuidas vesinikku toota. Kui selleks kasutada taastuvate allikate poolt toodetud elektrit, siis tuleb kasutada tippkoormusevälist tuuleelektrit või päikeseelektrijaamade poolt toodetud elektrit. Praegu veel toodetakse vesinikku suures-



ti loodusliku gaasi katalüütilise lagundamise teel. Tartu töögrupil on käesolevaks ajaks saadud kütuseelementidele ligi paarkümmend patenti. Ei ole kahtlust, et kütuseelemendid ja vesinik loovad uue ajastu ka Eesti energeetikas. Vesiniku eelised on igakülgsed ja vaieldamatult parema energiatõhususega ning rakendatavad pea kõikides majandussektorites. Akadeemik Enn Lust on Eesti esindaja Euroopa Liidu kütuseelementide ja vesiniku ühisinitsiatiivi tehnoloogiaplatvormis EU Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaken ja Eesti Teaduste Akadeemia esindaja Euroopa Liidu Teaduste Akadeemia Assotsiatsiooni Energeetika Koordineerimiskomitees.

Elektritootmise kaugemas tulevikus, selle sajandi teisel poolel, on väga tõenäoline, et põlevkivi otsepõletamine on välja tõrjutud ja vaid teatav osa elektrist toodetakse põlevkiviõli tootmise kõrvalproduktidest – generaatorgaasist ja poolkoksist. Samas on ilmne, taastuvenergiaallikate baasil toodetakse juba enne 2050. aastat märkimisväärne kogus riigis vajaminevast elektrist. See suundumus tugevneb iga kümnendiga. Suure osa elektritoodangust annavad meretuulepargid, väheväärtusliku biomassi baasil toodetakse nii soojust kui ka elektrit. Päikesepaneelide abil toodetava elektri kogused võivad ulatuda juba märgatava osatähtsuseni aastasest elektritarbest. Tõenäoliselt jõuavad lähikümnendil tavarakendustesse salvestamise tehnilised lahendused, mis talletavad nii päikeseelektrijaamade kui ka tuuleparkide poolt toodetud elektrienergia vesinikuna. Nii on võimalik saavutada korraga kahte eesmärki, energiatõhusalt toota ja salvestada taastuvate baasil toodetud elektrit ning piirata kasvuhoonegaaside heidet ja seeläbi piirduda kliima soojenemist.

Maailma Energeetikanõukogu (ingl k WEC – *World Energy Council*) poolt on kütuseelementide baasil toimiv vesinikuenergeetika tunnustatud lähikümnendite teedrajavaks arengusuunaks (WEC 2013). Euroopa Liidu teadusprogrammide raames käivitati eelmise kümnendi alguses uut suunda rajav teadusprogramm Hydrogen Highway, mille edukatest praktilistest rakendustest meie meedias veel vähe kuulda on. Projektide lühikirjeldused vastavas kataloogis näitavad aga elegantseid lahendusi, mille kallal töötatakse juba pea paar kümnendit ja millest paljud on juba oma koha tavarakendustena leidnud (European Commission 2006).

Vesinik tulevikukütusena väärib kindlasti märksa enam tähelepanu eelkõige võimaliku energiasalvestajana ja kõige mitmekesisemate kasutusvõimaluste poolest kütuseelementide toiteks. Kütuseelementide kasutusvaldkond on juba täna mitmekesine, alates lokaalse energiatootmisega kuni rakendusteni eri tüüpi transpordivahendites. Vesinikul baseeruv energeetika on kahtlemata tulevikuteema, seejuures mitte kauge tuleviku.

Seda kinnitavad selle valdkonna juhtivate riikide Saksamaa, Jaapani ja USA praktilised rakendused (REN21 2015).

## **Kokkuvõte**

Päikeseenergia laialdasem kasutuselevõtmine on väga suure perspektiiviga. IPCC poolt seatud ambitsioonikat eesmärki, pidurdada kliima soojenemist, on teiste lähenemiste kõrval võimalik saavutada ka taastuvate energiaallikate laialdasema kasutuselevõtmisega. Päikest võib õigusega pidada ammandamatuks energiaallikaks, mille kasutamisel ei teki kliimamuutusi esilekutsuvaid saasteainete heiteid ega muid jääkaineid. Praktiliselt igas vähegi päikesele avatud paigas ülesseatud PV-paneelid võimaldavad edendada lokaalset, hajutatud elektritootmist, mis omakorda aitab vähendada mitmesuguseid elektrivarustusega seonduvaid probleeme ja ka riske. Päikese- ja tuuleenergia baasil toodetud elektri abil võib edukalt toota vesinikku ja seda salvestada ning seejärel sobival ajal kütuseelementide abil vajalikuks energiaks muundada. Vesiniku kui energiakandja baasil on ka Eestis võimalik luua energiatõhusatel kütuseelementidel toimiv vesiniku-energeetika. Vesiniku eelised on igakülgsed, tema kasutamine kütusena on saastevaba ja vaieldamatult parema tõhususega peaaegu kõikides majandussektorites ja kasutusvaldkondades.

## **Kasutatud kirjandus**

- Climate Change 2014 Synthesis Report. 2015. Ed. By Rajendra K. Pachauri, L. Meyer and The Core Writing Team of IPCC Synthesis Report. 167p.
- Eesti Taastuvenergia Koda. <http://www.taastuvenergeetika.ee/>. Viimati 17.10.2015.
- European Commission. 2006. Directorate-General for Research. Sustainable Energy Systems. European Fuel Cell and Hydrogen projects 2002–2006. ISBN: 92-79-02692-5. 187p.
- Hydrogenics News Update. 2013. <http://www.hydrogenics.com/about-the-company/news-updates/2013/10/01/140-mw-wind-park-officially-opens-in-germany-with-energy-storage-facility-using-1-mw-power-to-gas-system-from-hydrogenics>. Viimati: 24.09.2015.
- Jaramillo, A.M. 2014. Renewables in Germany: where is the Energiewende headed? <http://www.europeanpublicaffairs.eu/tag/energiewende/>. Viimati 17.10.2015.
- Lindahl, J. 2015. National Survey Report of PV Power Applications in Sweden 2014. Swedish Energy Agency, 58 p.
- Meesak, A. 2013. Taastuvenergia mikrotootmise tasuvus kodumajapidamistele Eestis PV-jaama näitel. – Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine XV, Tartu, 6–23.
- REN21. Renewables 2013. Global Status Report 2013. <http://www.ren21.net/Portals/0/>

- [documents/Resources/GSR/2013/GSR2013\\_lowres.pdf](#). Viimati 14.10.2015.
- REN21. Renewables 2015. Global Status Report 2015. [http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015\\_Onlinebook\\_low1.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015_Onlinebook_low1.pdf). Viimati 14.10.2015.
- Riigi Teataja. RT I 2003, 25, 153. <https://www.riigiteataja.ee/akt/ELTS>. Viimati 14.10.2015.
- Statistikaamet. 2014. Eesti statistika Aastaraamat. Päikesepaiste kestus Eestis aastal 2013. [http://rahvatervis.ut.ee/bitstream/1/5805/1/Stat\\_aastaraamat2014.pdf](http://rahvatervis.ut.ee/bitstream/1/5805/1/Stat_aastaraamat2014.pdf). Viimati 16.10.2015.
- Taastuenergia toetus. AS Elering. <http://elering.ee/taastuenergia-toetus/>. Viimati 15.10.2015.
- Taastuenergia toetuse taotlemine muutub oluliselt lihtsamaks. Eleringi uudised. 28.07.2015. <http://elering.ee/taastuenergia-toetuse-taotlemine-muutub-oluliselt-lihtsamaks/>. Viimati 16.10.2015.
- Taastuenergia tootjatele väljamakstud toetused. AS Elering. [http://elering.ee/public/Taastuenergia/Valjamakstud\\_toetused.xls](http://elering.ee/public/Taastuenergia/Valjamakstud_toetused.xls). Viimati 15.10.2015.
- Taastuenergia. AS Elering. <http://elering.ee/taastuenergia-5/>. Viimati 16.10.2015.
- Tamm, T., Annuk, A., Loka, J., Palge, V., Tiit, V. 2013. Leigo talu energiavarustus taastuvate energiaallikate kasutamisel. – Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine XV, Tartu, 24–32.
- WEC, 2013. World Energy Scenarios: Composing energy futures to 2050. <http://www.worldenergy.org/publications/2013/world-energy-scenarios-composing-energy-futures-to-2050/>. Viimati 6.10.2015.
- Weiss, J. 2014. Solar Energy Support in Germany. A Closer Look. The Brattle Group. 49 p.

## **PERSPECTIVES OF HYDROGEN GENERATION WITH SOLAR PV-PANELS**

Tiit Kallaste

Solar PV development all over the world demonstrates very clearly the fact that it is starting to play increasingly growing share in electricity generation in many countries around. PV based electricity generation elaborates well to climate mitigation targets set by IPCC due to no greenhouse gases exhausts and wide availability to small enterprises as well as private persons. The stepwise phase out of fossil based electricity generation is foreseen by long term development plans up to mid of century. After that renewable based energy production will be prevailing. Solar based electricity generation with following hydrogen production has good option to be used in the areas where existing grid connections are poor or missing. Hydrogen could be accumulated separately from the electrolysis byproduct, oxygen, and used for the variety of purposes. The most prospective and appealing is the the use of hydrogen for fuel cells. Hydrogen is perfect fuel for fuel cells. Fuel cells equipped transport means have the single exhaust gase, water vapour. Estonian scientists have been working on fuel cells since the 2000-ies and have around 20 patents of which a number are in serial production by now. The coming decades expose the explosive growth of solar based electricity generation. Hopefully it will be good start for hydrogen energetics in Estonia.

# PV-MOODULI TOODANG SUURFARMIS

Teolan Tomson

TTÜ materjaliteaduse instituut

teolan62@gmail.com

## Annotatsioon

Töös uuritakse PV-paneelide tootlikkuse langust suurfarmis nende vastastikuse varjutamise tõttu. Näidatakse, et Eestis oludes on soovitatav kasutada paneelide madalaid kaldenurki ja suhtelist reavahet, mis ületab paneeli kõrguse pooleteistkordset väärtust.

Märksõnad: otsekiirgus, hajukiirgus, varjestamine.

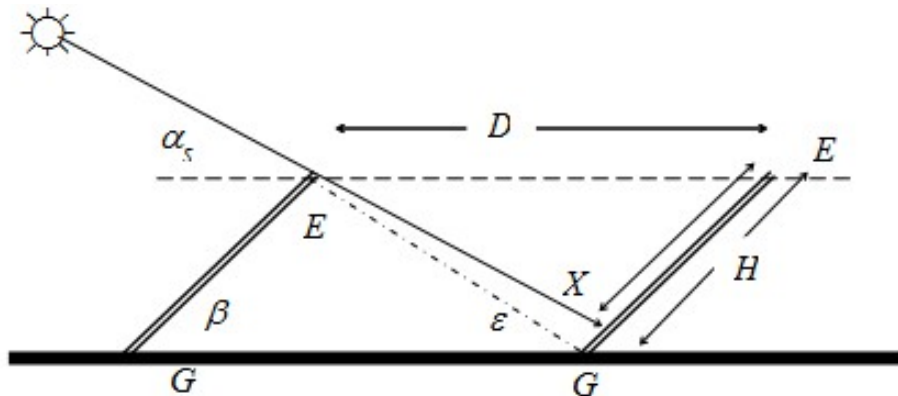
## Sissejuhatus

Eestis on päikeseelektri tootmine osutunud üllatavalt populaarseks. Ka on muutunud aktuaalseks suurte PV-farmide rajamine, milles PV-moodulid, igaüks pinnaga  $A$  paiknevad üksteise taga (pikkades) ridades. Sellise paigutuse puhul tekib sisemiste moodulite varjutamine eelnevate (päikesepoolsete) ridade poolt ja  $n$  sisemist moodulit töötavad (sõltuvalt päikese kõrgusnurgast  $\alpha_s$ ) vähemasti osa aega osalise varjutuse tingimustes. Nii otsese kui ka hajukiirguse suhtes on varjutamist uuritud (Jones 1981), kuid seal kirjeldatud arvutusmetoodika ei võimalda uurida sisemise mooduli tööd ööpäeva lõikes ega anda soovitusi ridade tiheduse valikuks. Teeme seda käesolevas uurimuses. Eesmärgiks on anda arvutusjuhend sisemise paneeli efektiivse kiiritustiheduse  $G^*T$ ,  $Wm^{-2}$  leidmiseks, sest konkreetse farmi elektrienergiatoodang on hõlpsasti leitav, teades farmi paneelide kogupinna  $A_F = nA$  suurust ja kasutatavate paneelide muundustegurit  $\eta$ . Rõhutame, et analüüs kehtib siserea paneelile, mis on monteeritud rõhtpinnale ja orienteeritud lõuna suunas. Analüüs ei puuduta esirea ja äärmiste paneelide tööd, mis moodustavad ~5–20% farmi paneelide koguarvust ja mis ei määra farmi tootlikkust.

## Metoodika

Toodetud päikeseelektri kogus on teatavasti  $E = h \cdot \eta \cdot A(\alpha_s) \cdot G_T$ , kWh, milles  $h$  on ekspositsiooniaeg ja  $G_T$  (kogu) kiiritustihedus kaldenurgaga  $\beta$  installeeritud mooduli pinnal. Kasutades kiiritustiheduse asemel kiirgusenergia tunnisummasid  $G_T \Rightarrow Q_T$ , on  $h = 1$ . Osalise varjutuse tingimustes tuleb avaldisse lisada veel kiiritustegur  $x \leq 1$ , mis väljendab suhtelist kiiritatud pinda. On suvaline, kas omistame selle teguri mooduli kiiritatavale pinnale  $A(\alpha_s) = x \cdot A$  või tunnisummale  $Q^*T(x) = x \cdot Q_T$ , milles  $x = \text{var}$ . Kogukiirgust käsitatakse tema komponentide summana, millest otse- ja hajukiirgus toimivad sisemisele moodulile, kuid (maast) peegeldunud kiirgus on varjutatud ja ei toimi.

See toimib küll esirea moodulitele, aga tema osakaal aastatoodangus jääb paari protsendi piiridesse ja omakorda esirea osatähtsus on ülalöeldult madal. Niisiis peegeldunud kiirgust ei uurita. Otse- ja hajukiirguse pikaajalised keskmised tunnisummad on antud (Tooming 2003) Tõravere ja Tiirikoja kohta ning need iseloomustavad kogu Eestit vea- ga, mis ei ületa 5%.



Joonis 1. Siserea PV-moodulile langev otsekiirgus  
Figure 1. Direct radiation performing on the inner PV-module

### Otsekiirgus siserea moodulil

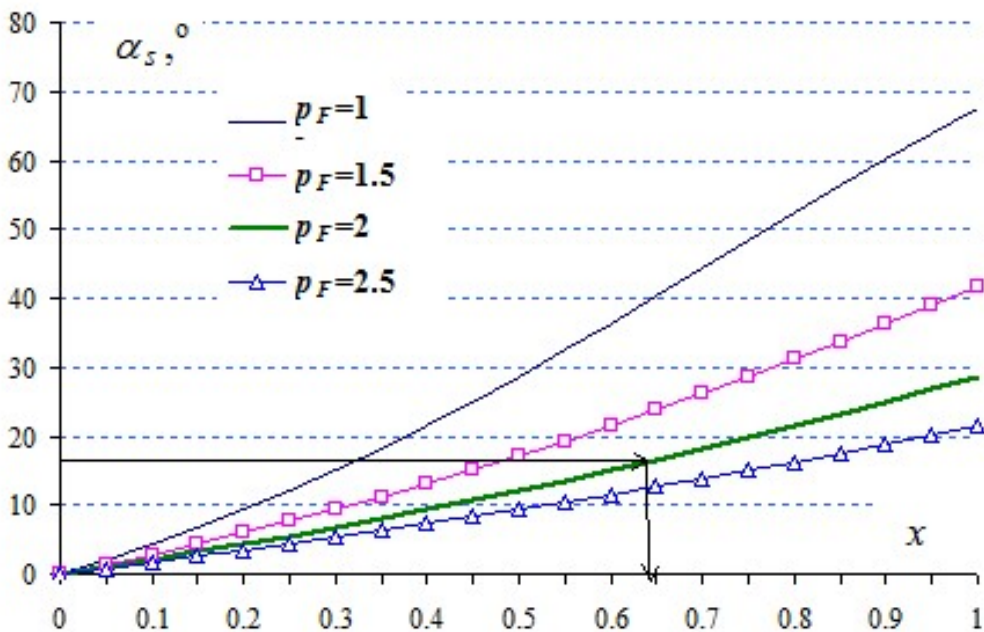
Farmi siserea kiirgust otsekiirgusele kujutab joonis 1. moodul kõrgusega  $H$  on monteeritud aluspinnale kaldenurgaga  $\beta$ . Aluspind on tasapind, mis ühendab kõikide moodulite alumisi servi (näiteks vundamenti kõrgusel) ning punkt  $G$  asub sellel. Punkt  $E$  tähistab moodulite ülaseri. Tähis  $D$  on mooduliridade vahemaa. Punkt  $X$  on mooduli kiirgatud osa piir ja lõigu  $EX$  suhteline väärtus  $EX/H = x$  on kiirgustegur otsekiirgusele. Lõik  $EG$  moodustab aluspinnaga nurga  $\epsilon$ . Kui päikese kõrgusnurga as suurenedes punkti  $X$  asend langeb allapoole punkti  $G$ , on kogu moodul kiirgatud. Skeemi geometriast lähtudes

$(x \cdot H \cdot \sin\beta) / (x \cdot H \cdot D - x \cdot H \cdot \cos\beta) = \operatorname{tg}\alpha_s$ ,  
millest võrrandit  $H$ -ga läbi jagades leiame

$$\alpha_s = \operatorname{atg}(x \cdot \sin\beta) / (p_F - x \cdot \cos\beta). \quad (1)$$

Siin suhe  $D/H = p_F$  on farmi parameeter ja oluline muutuja. Meid huvitaks antud päikese kõrguse  $\alpha_s$  juures leida vastav kiirgustegur, kuid paraku on (1) otsitava  $x$  suhtes transendentne võrrand ja pole lahendatav. Seepärast tuleb ülesanne lahendada tagur-

pidi – ette antud kiiritustegurite juures arvutada vastavad päikese kõrgusnurgad ning graafikust joonisel 2 leida iga otsitava päikese kõrguse jaoks tema kiiritustegur (mis on töömahukas protseduur). See tehe on joonisel 2 juhtumi  $\alpha_s = 17^\circ$  ja  $p_F = 2$  jaoks näidatud nooltega.

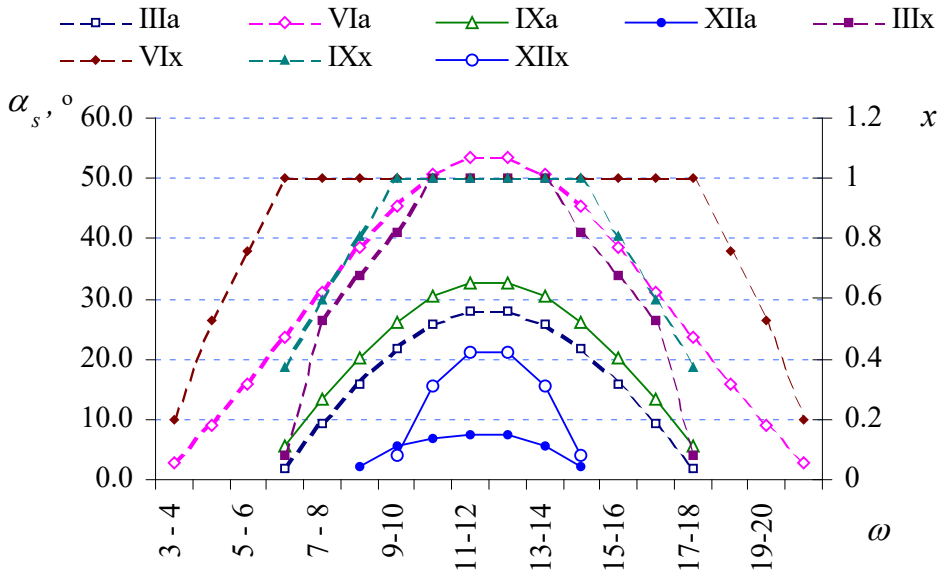


Joonis 2. Kiiritusteguri  $x$  sõltuvus päikese kõrgusnurgast  $\alpha_s$  ja farmi parameetrist  $p_F$   
 Figure 2. Dependence of (the relative value) of the illuminated area  $x$  on the sun's height angle  $\alpha_s$  and farm parameter  $p_F$

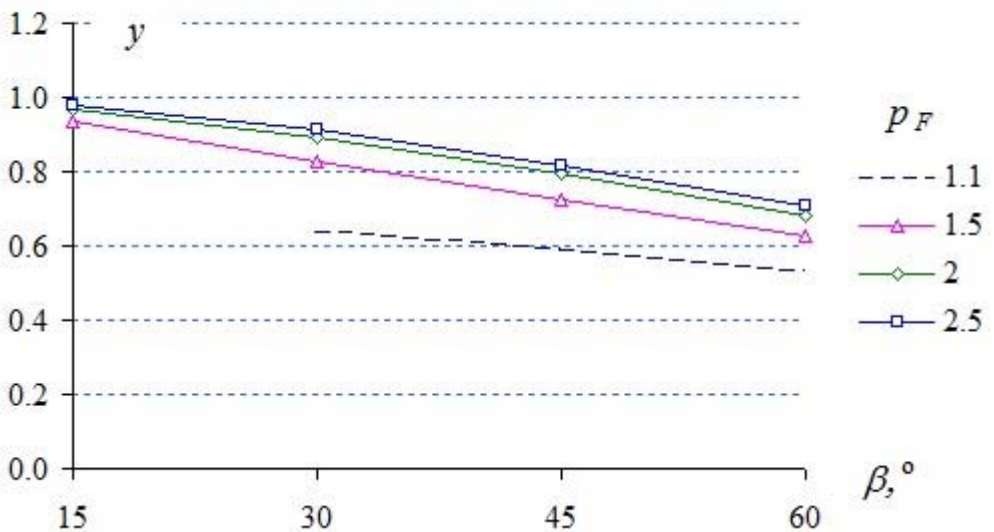
Eestis on (sõltuvalt koha laiuskraadist) päikese maksimaalne kõrgus (suvisel pööripäeval)  $\max \alpha_s \approx 55^\circ$ , mis tähendab, et  $p_F = 1$  puhul ei ole siserea moodul kunagi täielikult kiiritatud. Kuna päikese kõrgusnurgal on nii kalendriline kui ka kellaajaline sõltuvus, siis on ka  $x$  sõltuv kalendrist ja kellaajast. Joonisel 3 on pideva joonega (näit IIIa) näidatud (märtsikuine keskmine) päikese kõrgusnurk  $\alpha_s$  ja katkendjoonega (vastavalt IIIx) kiiritusteguri  $x$  sõltuvus kellanurgast  $\omega$  (päikesesajas). Esitatud graafik on ehitatud tingimusel  $p_F = 2$ . Tunni vältel otsekiirguse poolt  $1 \text{ m}^2$  moodulile kiiratud energia on

$$E_s = s \cdot x \cdot \cos(\theta_T) = s \cdot x \cdot [\cos(\Phi - \beta) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\Phi - \beta) \cdot \sin(\delta)], \quad (2)$$

milles  $s$  on (Tooming, 2003) tabelina antud tunnisummade funktsioon;  $\theta_T$  on mooduli normaali ja päikesekiirte vaheline kohtumisnurk;  $\Phi$  on asukoha laiuskraad ja  $\delta$  (päikese) kääne. Allpool toodud näidete juures on võetud  $\Phi = 59.2^\circ \text{N}$ , mis vastab Väike-Maarjale.



Joonis 3. Päikese kõrgusnurga  $\alpha_s$  ja otsekiirguse kiiritusteguri  $x$  kalendriline ning kellaajaline sõltuvus  
 Figure 3. Functional dependence of the sun's height angle  $\alpha_s$  and relative illuminated area  $x$  on months and hours



Joonis 4. Hajukiirguse kiiritusteguri  $y$  sõltuvus mooduli kaldenurgast  $\beta$  ja farmi parameetrist  $p_F$   
 Figure 4. Dependence of the relative area of the PV-module  $y$ , illuminated by diffuse radiation, on the tilt angle  $\beta$  and farm parameter  $p_F$



## Hajukiirgus siserea moodulil

Hajukiirgus vabal kaldpinnal  $D_T$  on sõltuv mooduli kadenurgast ja (Tooming 2003) tabelina antud hajukiirguse tunnisummadest  $D$  horisontaalpinnal. Vastavalt (Liu 1960) isotroopse hajukiirguse mudelile

$$D_T = D(1 + \cos\beta) / 2. \quad (3)$$

Seega horisontaalasendis  $\beta = 0^\circ$  kogub moodul hajukiirguse kogu taevaalaotuse pool-sfäärlist, vertikaalasendis  $\beta = 90^\circ$  ainult veerandsfäärlist jne, vastavalt nurgale  $\beta$  (valem (3)).

Jooniselt 1 näeme, et eelmine moodulirida lõikab poolsfäärlist välja sektori allpool sirgega  $EG$  tähistatud pinda ja sektorist ( $\pi - \varepsilon$ ) hajukiirgust moodulile ei kiirata. Seega siserea efektiivne hajukiirgus on avaldatav

$Dy = D \cdot [(1 + \cos\beta) / 2 - (1 + \cos(\pi - \varepsilon)) / 2]$ , ehk kiiritustegur hajukiirgusele  $y = Dy / D$  avaldub

$$Y = (\cos\beta - \cos(\pi - \varepsilon)) / 2, \quad (4)$$

milles nurk  $\varepsilon$  avaldub

$$\varepsilon = \text{atg}(H \cdot \sin\beta / (D - H \cdot \cos\beta)) = \text{atg}(\sin\beta) / (p_F - \cos\beta). \quad (5)$$

Näeme, et hajukiirguse kiiritustegur  $y$  on kahe tehisliku muutuja funktsioon (joonis 4) ja ei sõltu kalendrist ega kellaaajast. Nurk  $\varepsilon$  ei ole (5) järgi leitav, kui  $\beta \rightarrow 0$  ja  $p_F \rightarrow 1$ , sest murru nimetaja ja jagaja liginevad mõlemad nullile. See juhtum praktikat ka ei huvita (vrd joonis 2), kuna ka otsekiirgusele on ridade vahe liiga väike. Madalama kaldenurga moodulid võtavad vastu rohkem hajutatud päikeseenergiat ja joonisest 5 järeldub, et hajukiirguse ärakasutamise mõttes  $p_F > 2$  olulist võitu enam ei anna.

Tunni aja vältel hajukiirguse poolt  $1 \text{ m}^2$  moodulile kiiratud energia on leitav tabelifunktsiooni  $D$  (Tooming 2003) järgi

$$E_D = y \cdot D. \quad (6)$$

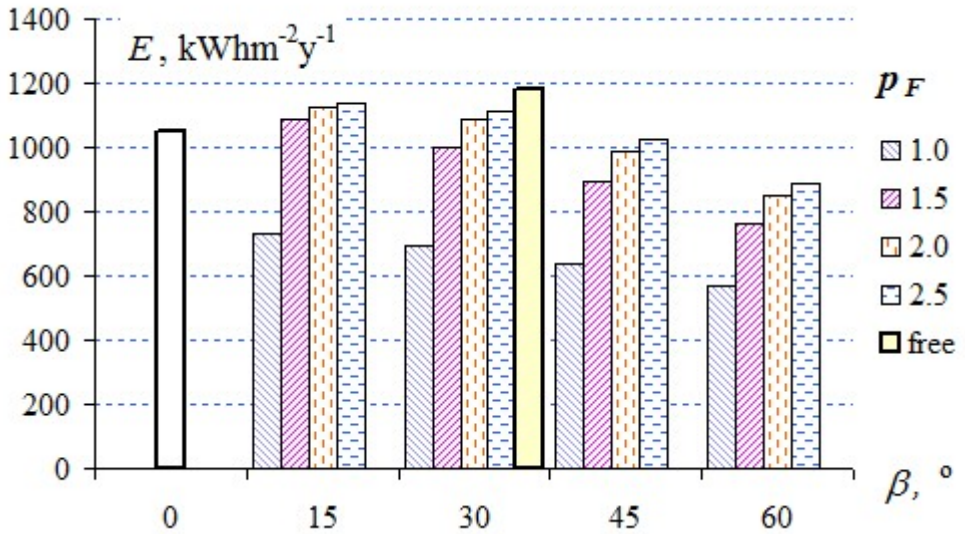
Hajukiirguse omandamise mõttes on mõistlik valida  $p_F > 1.5$ , eriti mooduli madala kaldenurga juures.

## Siserea mooduli energiatoodang

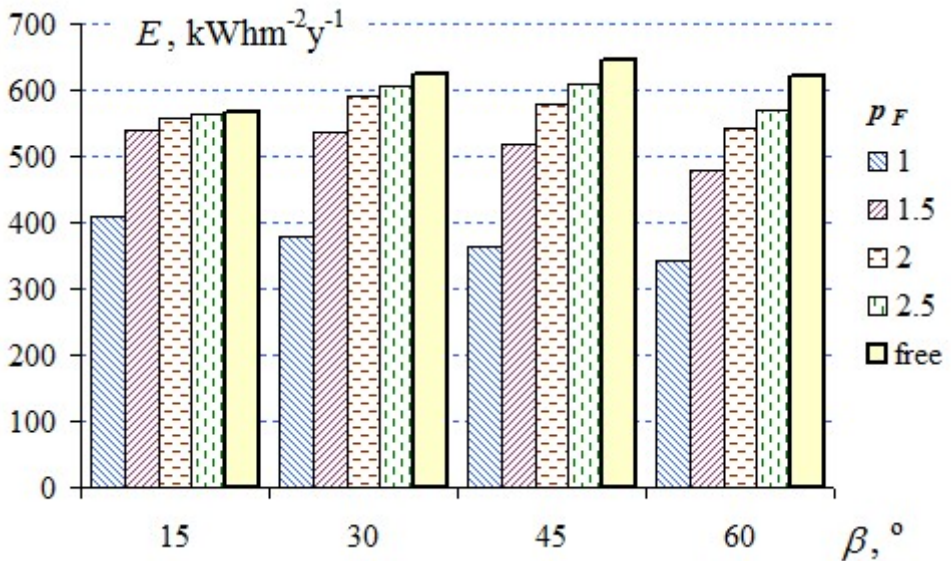
Kuna moodul omandab võrdselt kumbagi päikeseenergia komponenti, siis kogu moodulile antud energia on

$$E = E_S + E_D. \quad (7)$$

Joonis 5 esitab simuleeritud aastase energia mooduli pinna ühe ruutmeetri kohta sõltuvalt valitud kaldest  $\beta$  ja farmi moodulist (suhtelisest reavahest)  $p_F$ . Näeme, et rea-



Joonis 5. Siserea 1 m<sup>2</sup> PV-moodulile aastas langev päikeseenergia  $E$  farmis sõltuvalt mooduli kaldenurgast  $\beta$  ja suhtelisest reevahest  $p_F$   
 Figure 5. Annual energy yield of a 1 m<sup>2</sup> inner PV-module of a farm depending on the tilt angle  $\beta$  and relative distance between rows  $p_F$



Joonis 6. Siserea 1 m<sup>2</sup> PV-moodulile aastas langev otsekiirguse energia PV-farmis sõltuvalt kaldenurgast ja reevahest  
 Figure 6. Annual energy yield of a 1m<sup>2</sup> inner PV-module of a farm produced by direct radiation depending on the tilt angle  $\beta$  and relative distance between rows  $p_F$

vahe suurendamine annab lisaenergiat, kuid ühtlasi kasvab farmiks vajalik maapind, mis muust (põllumajanduslikust) kasutusest välja langeb. Võrdluseks on antud vaba horisontaalpinna ( $\beta = 0^\circ$ ) ja vaba  $\beta = 30^\circ$  mooduli free energiasaagis. Jooniselt nähtub, et valitud kaldesammu  $15^\circ$  juures jääb optimum leidmata ja asub vahemikus  $0 < \beta < 15^\circ$ . Nii madalate kaldenurkade kasutamine on siiski küsitav nii saastumise kui ka lumetõrje seisukohast. Optimumi paiknemise põhjus madalatel kalletel lasub hajukiirguse suurel osakaalul Eestis. Kui analüüsida otsekiirgusest saadavat energiatoodangut joonisel 6, siis on näha, et optimum langeb  $\sim 45^\circ$  kalde juurde, mis vastab ka vaba kollektori jaoks kirjanduses antud rusikareeglile

$$\beta = \Phi - 15^\circ.$$

### **Kokkuvõte**

Suure, mitmerealise PV-farmi tootlikkuse määrab tema siserea mooduli tootlikkus, mis peale kiirguskliima on määratud suhtelise reavahe ja valitud mooduli kaldenurga-ga. Tuleb vältida väikesi reavahesid  $p_F < 1.5$  ja Eestis eelistada madalaid kaldenurki  $15 < \beta < 30^\circ$ , sest veel madalama kaldenurga juures tekib ilmselt probleeme saaste ja lumeärastusega.

### **Kasutatud kirjandus**

- Jones, R. E. (Jr), Burkhart J. F. 1981. Shading effects of collector rows tilted towards the equator. – Solar Energy, 26, 563–565.
- Liu, B.Y.H., Jordan, C. 1960. The Interrelationship and Characteristic distribution of Direct, Diffuse and Total Solar radiation. – Solar Energy, 4, 1–19.
- Tooming, H. (ed) 2003. Handbook of Estonian solar radiation climate. EMHI, Tallinn, (in Estonian and English).

## **ENERGY PRODUCED BY A MODULE IN A LARGE PV-FARM**

Teolan Tomson

In a large PV-farm modules are installed as long rows each behind foremost, which shadows the next one at least during of some time intervals. This phenomenon causes reduced effective radiation, which is studied in the present paper. Effective direct and diffuse radiation are both depending on the tilt angle  $\beta$  and relative distance between rows  $p_F$ . Due to high share of diffuse fraction of the solar radiation in Estonia low tilt angles  $\beta < 30^\circ$  are preferred and in fact suitable tilt angle depends on problems of pollution and snow elimination.

# TASAPINNALISE 2,5 M<sup>2</sup> PÄIKESEPANEELI TÖÖ TULEMUSED AJAVAHEMIKUS SEPTEMBER 2014 KUNI OKTOOBER 2015

Veli Palge<sup>1</sup>, Margus Arak<sup>2</sup>, Erkki Jõgi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Eesti Maaülikool, veli.palge@emu.ee;

<sup>2</sup>Eesti Maaülikool, margus.arak@emu.ee;

<sup>3</sup>Eesti Maaülikool, erkki.jogi@emu.ee

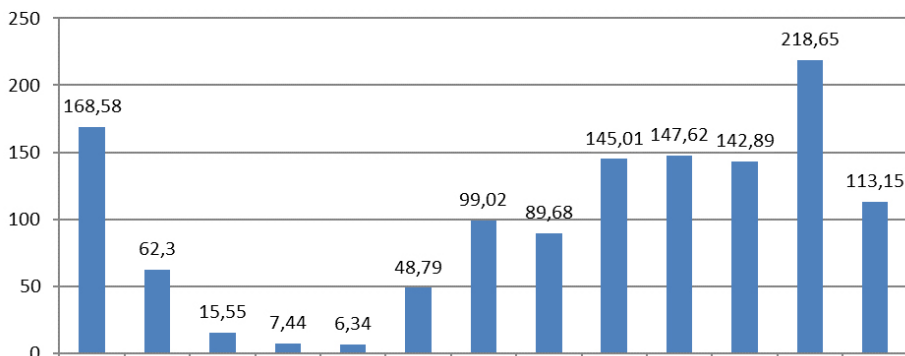
## Annotatsioon

Käesolevas artiklis kirjeldatakse Eesti Maaülikooli Tehnikainstituudi katusel asuva tasapinnalise päikesepaneeli töötulemusi 2014. aasta sügistalvisel ning 2015. aasta kevadsuvisel perioodil. Esitatu alusel saab teha järeldusi päikeseenergia salvestussüsteemi töö paremaks korraldamiseks.

Märksõnad: taastuvad energiaallikad, päikesepaneel, päikeseenergia akumuleerimine.

Vaadeldaval perioodil salvestati akupaaki kokku 1265 kW·h. Energia salvestuse jagunemine kuude lõikes on esitatud joonisel 1. Salvestatud energia päevade lõikes on esitatud joonisel 2.

**Energia salvestamine akupaaki sept. 2014 kuni okt. 2015, kW·h**

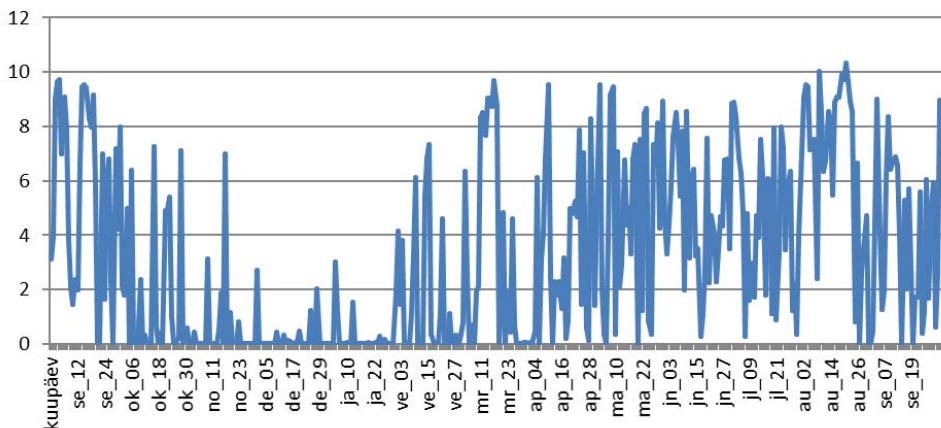


Joonis 1. Tehnikainstituudi katusel olevas 2,5 m<sup>2</sup> päikesepaneelis neeldunud energia salvestus akupaaki 1. sept 2014 kuni 30. sept 2015 kuude lõikes

Figure 1. Monthly accumulation of solar energy on the solar panel located on the roof of the Technical Institute of Estonian University of Life Sciences in the time period from 1st September 2014 to 30th September 2015

Vaadeldava perioodi kestel on esinenud kestvamad päikeselised perioodid septembris 2014, 2015. aasta veebruari esimesel poolel, märtsis, aprilli teisest poolest vahelduvalt kuni septembri teise pooleni. Eriti soodsad ilmad olid augustis. Päikesevaesed ajad olid

## Salvestatud energia päevas 01. sept 2014... 01. okt 2015, kW·h



Joonis 2. Tehnikainstituudi katusel olevas 2,5 m<sup>2</sup> päikesepaneelis neeldunud energia salvestus akupaaki 1. sept 2014 kuni 30. sept 2015, arvestatuna päevakaupa

Figure 2. Daily accumulation of solar energy on the solar panel located on the roof of the Technical Institute of Estonian University of Life Sciences in the time period from 1st September 2014 to 30th September 2015

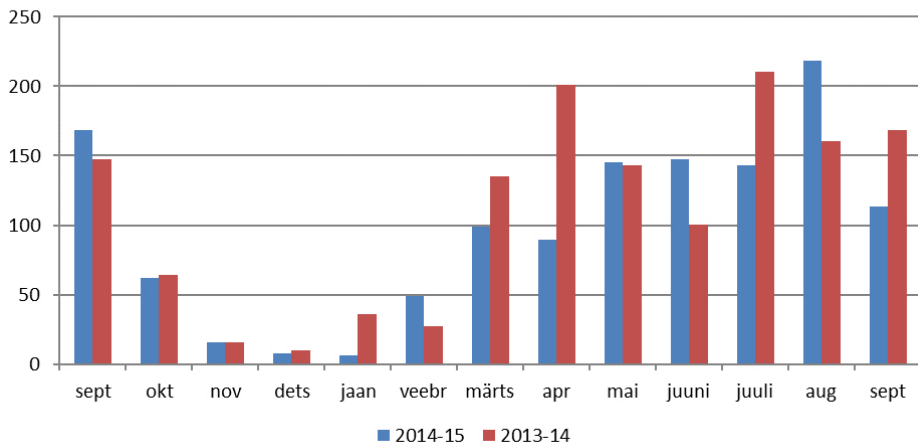
2014 novembris ja detsembris, 2015 jaanuaris, veebruari lõpus, märtsi lõpus ja aprilli alguses. Ka 2015 septembris on taevast esinevate pilvede tõttu olnud päikesepaistet vähem kui 2014 septembris

Eelmise vaatlusaluse perioodiga pakuvad võrdlemise võimalust joonised 3 ja 4.

Jooniselt 4 on näha, et vaatlusalustel aastatel on energiasalvestus kuude lõikes oluliselt erinev, positiivsed numbrid iseloomustavad, kui palju vahemikus 2014–2015 salvestati eelnevast perioodist rohkem. Jooniselt on näha, et negatiivsete väärtuste summa on positiivsetest suurem. Kui ajavahemikul september 2014 kuni oktoober 2015 salvestati 1265 kW·h, siis eelneval perioodil salvestati 1419 kW·h, ehk 154 kW·h rohkem. Põhiline osa sellest vahest (111,5 kW·h) moodustas 2014. aasta aprilli arvel, mil energiat salvestati ligikaudu 2 korda rohkem (vastavalt 2015 apr 89,7 ja 2014 apr 201,2 kW·h). 1. oktoober 2012 kuni 30. september 2013 salvestati 1124 kW·h. Ajavahemikul 1. oktoober 2014 kuni 30. september 2015 salvestati 1096,4 kW·h ja sellest tuleneb, et perioodil 2014–2015 oli päikesega tunde samuti vähem kui 2012–2013.

Kuna energia kogutakse akupaaki sooja vee näol ja energia salvestamine ning sooja vee tarbimine on ajas nihkes, siis on olulisem vaadelda nädala kestel päeva kohta keskmisi

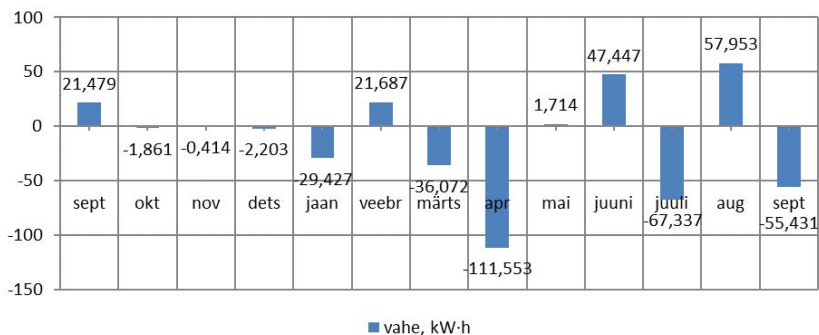
### Energia salvestamine sept. 2013 kuni okt. 2015, kW-h



Joonis 3. Tehnikainstituudi katusel olevas 2,5 m<sup>2</sup> päikesepaneelis neeldunud energia salvestus akupaaki 1. sept 2013 kuni 30. sept 2015 kuude lõikes

Figure 3. Monthly accumulation of solar energy on the solar panel located on the roof of the Technical Institute of Estonian University of Life Sciences in the time period from 1st September 2013 to 30th September 2015

### Kahe vaatlusaluse perioodi energiasalvestuse erinevus, kW-h

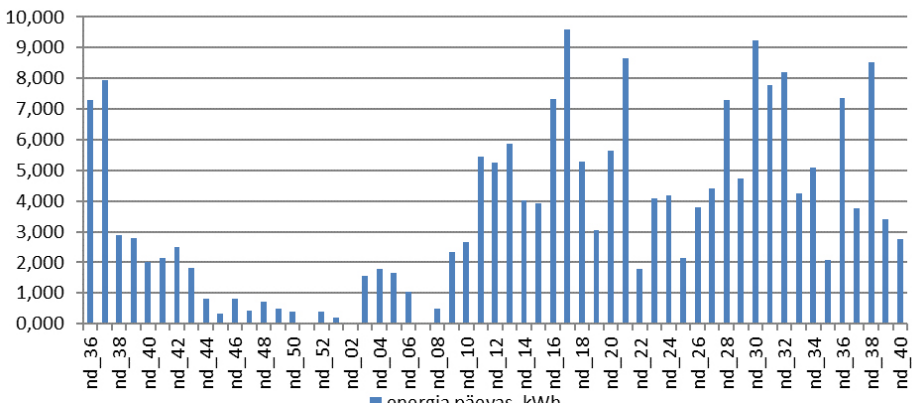


Joonis 4. Tehnikainstituudi katusel olevas 2,5 m<sup>2</sup> päikesepaneelis neeldunud energia akupaaki salvestuste erinevus kuude lõikes ajavahemikel 1. sept 2013 kuni 30. sept 2014 ja 1. sept 2014 kuni 30. sept 2015

Figure 4. Monthly accumulation difference of solar energy on the solar panel located on the roof of the Technical Institute of Estonian University of Life Sciences in the time period from 1st September 2013 to 30th September 2014 and 1st September 2014 to 30th September 2015

salvestunud energiad. Need numbrid saadi nädala kestel salvestatud energia kokkuliitmisel ja selle summa nädalapäevade arvuga jagamisel. Andmed eelneva vaatlusperioodi kohta on esitatud joonisel 5 ja viimase vaatlusperioodi kohta joonisel 6. Graafikutelt on näha, et talvine vähese päikeseenergiaga periood esineb mõlemal vaatlusvahemikul, kuid need talvised vähese päikeseenergiaga perioodid ei ole samal ajavahemikul. Intensiivsem päikeseenergia salvestamine algas 9.–10. nädalal (ajavahemikus 10.–15. märts). Pole välistatud, et see aeg muutub aastate lõikes oluliselt. Sellise arvamuse tõestuseks on salvestatud energiakoguste suur erinevus aprillis, aga ka juunis ja juulis (vt joonis 4).

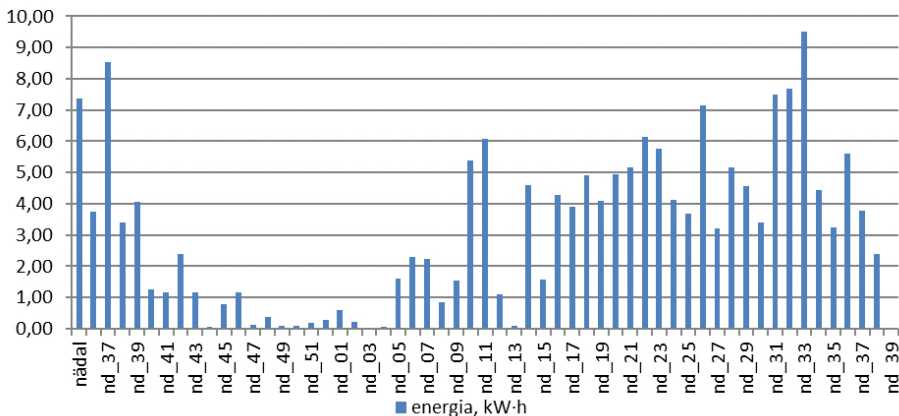
**Keskmine päevasaagis 2013 sept - 2014 okt nädalakaupa, kW-h**



Joonis 5. Tehnikainstituudi katusel olevas 2,5 m<sup>2</sup> päikesepaneelis neeldunud energia päeva keskmine salvestus akupaaki 1. sept 2013 kuni 30. sept 2014, arvestatuna nädalakaupa  
 Figure 5. Average weekly accumulation of solar energy on the solar panel located on the roof of the Technical Institute of Estonian University of Life Sciences in the time period from 1st September 2013 to 30th September 2014

Kui ilmastik on muutlik ja aastate päikesepaisteline aeg varieerub, siis päikesepaneeli ja akupaagi konstruktsioon ning paneeli soojuskandja tsirkulatsioonipumba juhtimisüsteem on osutunud väga töökindlateks. Vaatlusaluste aastate kogemuse järgi võimaldab paneeli 60-kraadine seadenurk horisondi suhtes saada tarbimiseks arvestataval või piisaval kogusel sooja vett päikesepaistelistel ilmade olemasolul, alates 10. nädalast (märtsi esimene pool) kuni 38. nädalani incl (septembri lõpp). Seega on kogu sooja vee saamise perioodi tõenäoline pikkus 28 nädalat ehk 7 kuud. Mõnel aastal on päikeseline olnud ka veebruar, kasutatava paneeli asendi korral tuleb siis arvesse ka vähemalt veebruari teine pool. Näiteks 15.–17. veebruaril 2015 salvestus akupaaki 5,5–7,3 kW-h päevas. Kuid ka 2014. aasta oktoobris salvestus akupaaki arvestataval määral energiat

Keskmine päevasaagis 2014 sept - 2015 okt nädalakaupa, kW·h



Joonis 6. Tehnikainstituudi katusel olevas 2,5 m<sup>2</sup> päikesepaneelis neeldunud energia päeva keskmine salvestus akupaaki 1. sept 2014 kuni 30. sept 2015, arvestatuna nädalakaupa

Figure 6. Average weekly accumulation of solar energy on the solar panel located on the roof of the Technical Institute of Estonian University of Life Sciences in the time period from 1st September 2014 to 30th September 2015

– 62,3 kW·h – sealjuures 17. oktoobril 2014 salvestus akupaaki 7,2 kW·h. See on kahjuks erand, mitte reegel, ka 21. oktoobril salvestus 7,12 kW·h ja isegi 18. novembril salvestus 6,99 kW·h. Üldreeglina on meil taevas oktoobris, novembris ja detsembris kaetud paksude pilvedega.

### Kokkuvõte

Artiklis on esitatud Eesti Maaülikooli Tehnikainstituudi katusele paigaldatud 2,5 m<sup>2</sup> tasapinnalise päikesekollektori töötulemuste kokkuvõtte ajavahemiku 1. sept 2014 kuni 30. sept 2015 kohta. Kokku salvestus vaatlusalusel perioodil 1265 kW·h. Ajavahemikul 1. sept 2013 kuni 30. sept 2014 (13 kuud) salvestus akupaaki 1419 kW·h ja seda on 154 kW·h rohkem, kui salvestus viimasel vaatlusperioodil. Artiklis esitatud juhtumitest saab järeldada:

- Erinevatel aastatel salvestunud energia ja eriti salvestamise ajavahemikud sõltuvad oluliselt meteoroloogilistest tingimustest, mis mõjutavad pilvisuse olemasolu.
- Soodsa pilvitusel olukorras salvestub akupaaki arvestataval määral energiat, alates veebruari algusest kuni novembri keskpaigani.
- Tuleb ära märkida akupaagi, päikesepaneeli ja soojuskandja tsirkulatsiooni juhtimissüsteemi suur töökindlus.
- Ennast on õigustanud kohtkindlalt paigaldatud paneeli kaldenurk 60 nurgakraadi. See tagab suure energiasalvestuse nii varakevadel kui ka hilissügisel.



**OPERATION OF THE SOLAR PANEL LOCATED ON THE ROOF OF  
THE ESTONIAN UNIVERSITY OF LIFE SCIENCES FROM 1 SEPT 2014  
TO 30 SEPT 2015**

Veli Palge, Margus Arak, Erkki Jõgi

In this paper we present data that summarises the operation of the solar panel located on the roof of the Institute of Technology of the Estonian University of Life Sciences in the time period between 1 September 2014 to 30 September 2015. Total energy recorded over the period is 1265 kW·h. However in the period from 1 Sept 2013 to 30 Sept 2014 (13 months) the energy recorded was 1419 kW·h which is 154 kW·h more than in the last measurement period.

We conclude that

- The energy recorded in different years and the periods over which they have been recorded significantly depends on the meteorological conditions, especially the presence of clouds.
- When meteorological conditions are good, considerable amount of energy is recorded in the period from the beginning of February to mid November.
- We note that the operation of the storage system, the solar panel and the circulation control system is highly reliable.
- The installation of the solar panel at 60 degrees seems justified because this ensures high energy recordings from early spring to late autumn.

# KURENURME PÄIKESEELEKTRIJAAMAS ASUTAKSE ENERGIAT SALVESTAMA VESINIKUNA

Viido Polikarpus<sup>1</sup>, Tiit Kallaste<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Energy Smart OÜ, viido.polikarpus@energysmart.ee

<sup>2</sup>SEI Tallinn, tiit.kallaste@seit.ee

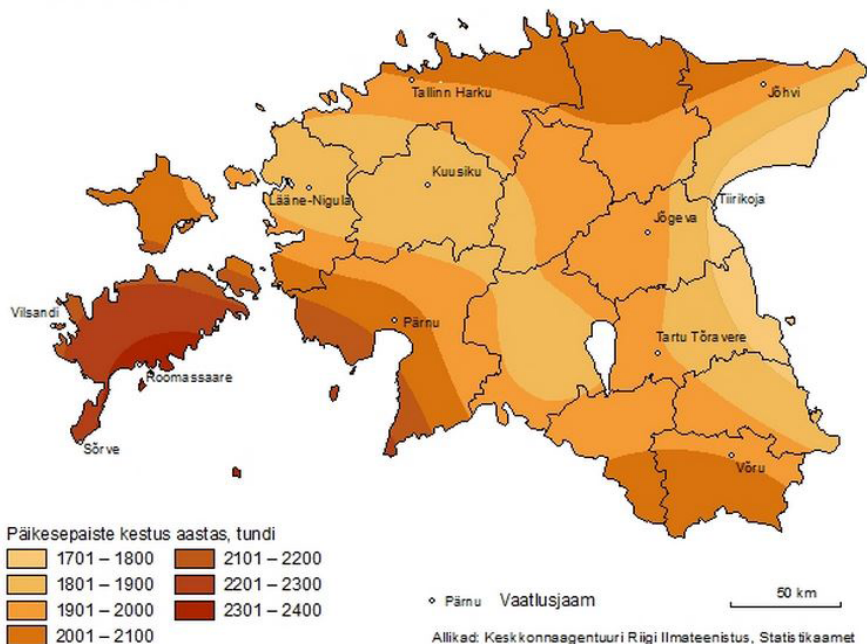
## **Annotatsioon**

Käesolev artikkel esitab idee tasandil lahenduse, kuidas päikeseenergiast elektri muundamine võiks rakendust leida juhul, kui jaotusvõrk mingitel põhjustel toodetud energiat ei ole võimeline vastu võtma, või juhul, kui majandusanalüüs näitab mõneks muuks rakenduseks paremat tasuvust võrreldes võrgu poolt makstava tasu ja taastuenergia-toetusega. Kurenurmes Sõmerpalu lähedal Keema külas rajas OÜ EnergySmart meie oludes uudse päikeseelektrijaama aastatel 2011–2013. Eksperimentaalne päikese-elektrijaam ühendati elektrivõrguga alles 2015. aasta kevadel. Arendaja peamiseks eesmärgiks oli ja on mitte suure kasumi tootmine, vaid eelkõige uudse lahenduse demonstreerimine ja katsetamine Eesti maapiirkondade elu elavdamiseks ning keskkonnasõbraliku energiaallika –päikesekiirguse – kasutuselevõtmiseks eesmärgiga uurida sellise ettevõtmise mõttekust lokaalseks elektrivarustuseks. Kuna vajaliku võrguühenduse loomine on seni läinud arusaamatuste ja ebakindluse tähe all, siis leiti, et toodetavale elektrile võiks üheks rakenduseks olla vesiniku tootmine vee elektrolüüsil. Vesinikku võib siis kasutada kas auto- ja bussikütusena, võrguühenduseta majade elektriga varustamisel või universaalse energiakandjana mujalgi. Käesolev artikkel kujutab üksnes uudse rakendusidee empiirilist kirjeldust ja on põgusaks sissejuhatuseks päikeseenergia ühele tavapärasest erinevale rakendusvõimalusele.

Märksõnad: päikeseenergia muundamine, päikeseelektrijaam, energiatorn, PV-paneelid, MLD-tehnoloogia, DEGERtraker, vesinik.

## **Eesti võimalus päikeseenergia kasutamiseks**

Eesti territooriumil jaguneb päikese energeetiline ressurss suhteliselt ühtlaselt – suurimaks erinevuseks võib ligikaudselt hinnata vaid 10%. Aastane aktinomeetriline päikeseenergia ressurss on Eestis 890–990 kWh/m<sup>2</sup>/a (Tomson 2000). Keskeltläbi võib päikeseliste päevade arvuks lugeda 2000 tundi aastas. Joonisel 1 on seda sõltuvalt geograafilisest asukohast kirjeldatud eri värvitoonidega (Statistikaamet 2014). Ülaltoodud kaart näitab väikesi erinevusi päikeseliste päevade geograafilises paiknemises. Eriti palju on päikesepaistet Saaremaal, Edela-Eestis ja ka Põhjarannikul. Võib vaid oletada, et tõenäoliselt on merealadel võrreldes sisemaaga päikesekiirgust paremini läbilaskev Maa-lähedane atmosfäärikiht.



Joonis 1. Päikesepaiste kestus Eestis aastal 2013 (Statistikaamet 2014)  
 Figure 1. Duration of solar radiation in Estonia in 2013

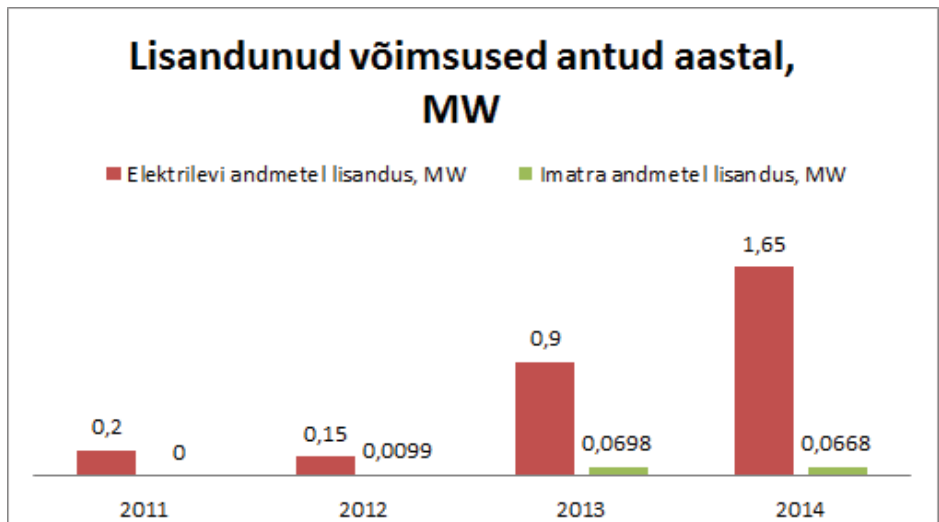
Päikesekiirgust iseloomustavad juhuslikkus ja perioodilisus, mistõttu on seni arvatud, et päikeseenergia baasil elektritootmine on enam kui küsitava väärtusega. Viimaste aastate arengud selles sektoris näitavad teistsugust perspektiivi. Küsimus seisneb peamiselt selles, kuidas seda ebahütlaselt Maale langevat kiirgust siiski kinni püüda ja salvestada. Üheks lahenduseks on fotoelektriliste päikesepaneelide ehk PV-paneelide (ingl k *photovoltaic solar panels*) abil päikeseenergia muundamine elektriks ja/või soojusteks. Päikesekollektorite (soojust tootvad päikesepaneelid) abil on soojust toodetud juba kaua, sellega algas ka Eestis päikeseenergia praktiline kasutamine. Käesoleval ajal on lisanud PV-paneelide abil elektri tootmine kohapeal tarvitamiseks või elektrivõrku ülekandmiseks.

### Päikeseenergia kasutamise areng Eestis

Üldlevinud klassifikatsiooni alusel loetakse taastuvateks energiaallikateks vesi, tuul, päike, laine, tõus-mõõn, maasoojus, prügilagaas, heitvee puhastamisel eralduv gaas, biogaas ja biomass, kusjuures biomassiks loetakse põllumajanduse (sealhulgas taimsete ja loomsete ainete) ja metsanduse ning nendega seonduva tööstuse toodete, jäätmete ja jääkide bioloogiliselt lagunev osa ning tööstus- ja olmejäätmete bioloogiliselt la-

gunevad komponendid. Nendest allikatest toodetud elektrienergiat loetakse taastuenergiaks. Toetusi taastuvate energiaallikate kasutuselevõtuks, energiasektori efektiivsemaks muutmiseks ning sisemaise varustuskindluse ja võimsuse piisavuse tagamiseks jagatakse Elektriturseaduse §59 alusel (Riigi Teataja 2003). Seda teeb range arvestuse alusel põhivõrguettevõtte AS Elering. Toetuse rahastamisest tekkiva kulu kannab tarbija vastavalt võrguteenuse tarbimise mahule ning otseliini kaudu tarbitud elektrienergia kogusele (Taastuenergia toetus... 2015).

Eestis on viimase kümnendi jooksul taastuvatest energiaallikatest enim arendatud tuuleenergiat – on püstitatud tuulikuparke, ettevalmistused käivad esimese meretuulepargi rajamiseks, eraisikud on püstitanud omal initsiatiivil ja Kredexi toetuste abil väiketuulikuid. Tuulikute installeeritud koguvõimsus ületas Eesti Taastuenergia Koja andmetel juba 2014. a lõpuks 300 MW (Taastuenergia aastaraamat... 2015). Päikesekiirgust on kuni viimase ajani kasutatud päikesekollektorite ülesseadmiseks. PV-paneelide kasutuselevõtmine on teinud hüppelise tõusu just viimase kolme-nelja aasta jooksul, vt joonis 2.



Joonis 2. Lisandunud võrguga liitunud võimsused aastate lõikes Elektrilevi ja Imatra Voima andmetel perioodil 2011–2014, MW. (Taastuenergia aastaraamat... 2015)

Figure 2. Cumulative installed solar electricity capacity in 2011–2014

2014. aasta seisuga oli Eestis installeeritud PV-paneelide koguvõimsusega juba enam kui 3 MW, kuid see statistika on koostatud vaid võrguettevõtete Imatra Voima ja AS-i Elering andmelao baasil ning näitab vaid võrguga liitunud päikeseelektri tootjate seis (Taastuenergia Koda 2015).

2014. aastaks suurenesid ka tootjatele väljamakstud toetussummad samas tempos päikeseenergia koguvõimsuse kasvuga, ulatudes aasta kokkuvõttes enam kui 28 000 euroni (Taastuvenergia tootjatele... 2015). Nagu eelnevalt selgitatud, moodustab see summa vastavalt installeeritud PV-paneelide võimsuse näitajale kogu päikeseenergia muundamisest saadavast tulust vaid marginaalse osa. Viimastel aastatel on rajatud mitmeid uusi päikeseenergia baasil elektritootmise üksuseid, mida võib õigustatult nimetada päikeseelektrijaamadeks.

Suurimaks päikesepaneelide müüjaks ning paigaldajaks erineva võimsusega objektidel Eestis on firma Solar4you OÜ, kes on hinnanguliselt installeerinud 1,5 MW PV-paneeli. See firma paistab eelkõige silma meie oludes suuremate, üle 100 kW päikeseelektrijaamade ehitamisega. Tihedalt järgnevad Energogen OÜ (~1 MW) ning Taastuvenergia OÜ (~0,3 MW). Kui palju erinevad ettevõtted, eraisikud ja professionaalsed PV-paneelide paigaldajad on PV-paneelide elektrilist võimsust installeerinud, on keeruline tuvastada, mistõttu käesolevas artiklis hinnatud koguvõimsus on kindlasti märksa suurem kui 3 MW. Erinevate paigaldajate-firmade hinnangul ulatub installeeritud koguvõimsus vähemalt 4 MW-ni. Seletusena võib märkida, et nii mõnedki suured elektritarbijad tarbivad ära kogu nende poolt toodetud elektri, mis võrgust tarbituga võrreldes on märksa soodsam, hinnanguliselt 11%. Need on PV-paneelide omanikud, kel ühendus võrguga küll olemas, kuid energia võrkumüümise näitajad on vaid marginaalsed. Nii ei saagi võrguettevõtte teada (samuti juhul, kui paigaldaja ei soovi seda avalikustada), kui palju on päikeseenergiat elektriks muundatud. Teatud osa eratarbijaid on soovinud, et paigaldaja-firma nende andmeid ei avalikusta.

### **Päikeseenergia võimalused energeetikas**

Päikeseenergia muundamisega elektrienergiaks alustati Eestis laiemalt alles mõned aastad tagasi, nagu selgub ülaltoodud diagrammist. Seniajani on ennaktempos arendatud tuuleparke, ettevalmistused käivad meretuuleparkide rajamiseks läänesaartest avamere poole. Päikese- ja tuulenergia kooskasutamise osas meil veel kogemused puuduvad. Nende kahe elektritootmise viisi kombineerimine elektritootmises ja toodetud energia akumuleerimiseks vesiniku näol võib aga Eesti jaoks avada põhimõtteliselt uue perspektiivi, pakkudes ühtlasi häid võimalusi elektrienergia hajutatud tootmiseks. Päikeseelektrijaamade kiire juurdekasv tähendab fossiilkütuste baasil elektri genereerimise järjekindlat vähenemist, millega kaasneb kliima soojenemist põhjustavate kasvuhuonegaaside heite vähenemine. Päikeseelektrijaamade rajamine omakorda annab võimaluse energiasalvestamiseks vesinikuna, mida saadakse vee elektrolüüsil ja mida on võimalik vajadust mööda kasutada ka siis, kui taevas pilves on.

Näited tuulejõu abil toodetud elektri salvestamiseks vesinikuna on Euroopas juba olemas. Saksamaal on loodud Vesiniku ja Kütuseelementide Tehnoloogia Riiklik Innovatsioonifond, mis on rahastanud mitmeid tulevikku suunatud elektritootmise innovaatiivseid projekte. 2013. a septembris alustas Mecklenburg-Vorpommerni rajoonis 140 MW tuulepark ja sellega koos energiasalvestiplokk, mis kasutab 1 MW võimsusega seadet „Elekter gaasiks“. See on võimeline tootma 210 normaalkuupmeetrit vesinikku tunnis. Vesinikku võib kasutada sealsamas sise põlemismootorites elektritootmiseks (mis tõstab oluliselt tuulepargi kasutegurit) või siis sõltuvalt vajadusest suunata otse maagaasi võrku kasutamiseks autokütusena või majade kütmiseks. Nii kasutatakse täielikult ära kogu tuulepargi elektritoodang – suunates päevase ja öise tarbimise ülejäägid vesiniku tootmiseks ning selle järgneva akumulatsiooniks. Tuuleelektrijaama 28 turbiini toodang varustab elektriga 125 000 kohalikku majapidamist, akumulatsioon vesinikku ja kõigele lisaks väldib 250 tuhat tonni CO<sub>2</sub>-heidet aastas (Hydrogenics News 2013). Eestis on taastuvenergia entusiastid astumas esimesi samme analoogiliste lahenduste suunas, tuginedes päikeseenergia elektriks muundamisele.

### **Eesti esimene päikese liikumist jälgiv elektrijaam**

Kurenurmes Sõmerpalu lähedal, Keema külas rajati aastatel 2011–2013 eksperimentaalne päikeseelektrijaam, kus traditsioonilise, raamidele fikseeritud fotoelektriliste päikesepaneelide kinnitamise asemel on kasutatud päikese liikumist taevakaarel jälgivat lahendust. Sellisel lahendusel on mitmeid eeliseid, eelkõige tootluses, võrreldes staatiliselt fikseeritud paneelidega.

Nn energiatorn on raudbetoonist silinder, mille külge on kinnitatud terastorst tugisambas. Sellele kinnitatud raamistikul paiknevad 40 päikesepaneeli koguvõimsusega 9,8 kW ja inverter, mis muundab genereeritud elektri võrku andmiseks sobivaks, vt joonis 3.

Kaasaegse tehnoloogia alusel rajatud päikeseelektrijaamas jälgivad PV-päikesepaneelid päikese asendit taevakaarel, st kõige heledamini kiirgavat punkti, ja seadistuvad vastavalt sellele, et püüda valguskiirgust optimaalsel režiimil. Antud juhul tähendab see pooljuhtseadiste poolt maksimaalset valguskiirguse muundamist elektriks. Vastavalt sellele, kuidas sõltuvalt aastaajast Maa orientatsioon Päikese suhtes kujuneb, muudavad energiatornidel paiknevad PV-paneelide raamid automaatselt oma suunda ja kaldenurka. Nii hoitakse need nt talvel lumest vabana ja samas salvestatakse täiendav kiirgus ümbruskonna lumikattelt.

Vaatamata sellele, et fotoelektriliste moodulite efektiivsus on viimase dekaadi jooksul märkimisväärselt tõusnud, ollakse juba saavutamas füüsilist maksimumi. Et siiski



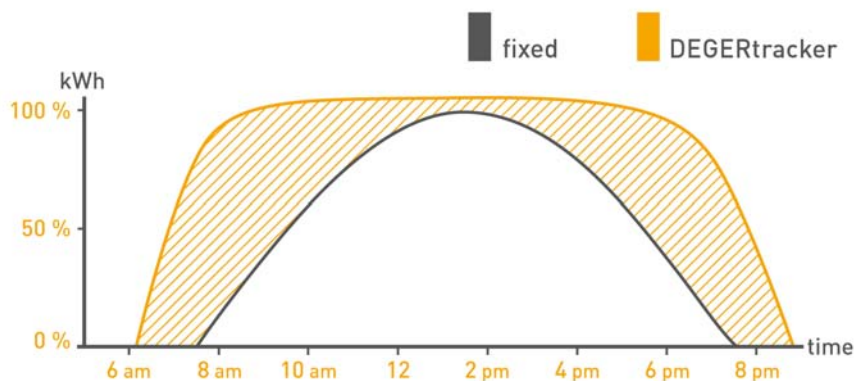
Joonis 3. Kurenurme päikeselektrijaam Keema külas Võrumaal (foto Tiit Kallaste)  
Figure 3. Kurenurme Solar Park in Keema village in Võru county (photograph by Tiit Kallaste)

PV- paneelide tootlikkust jätkuvalt suurendada, arendati Saksamaal välja seade, mis orienteerib paneelid alati maksimaalse valguskiirguse suunas. Sellega saavutati süsteemi efektiivsuse hüppeline suurenemine sõltumata sellest, milliste paneelide või materjalidega on tegemist, vt joonis 4. DEGER-tracker seadmed rakendatud koos MLD-tehnoloogiaga (ingl k Maximum Light Detection), mis fikseerib suurima valguskiirguse suuna, viivad päikesepaneelide tootlikkuse kuni 45% kõrgemaks võrreldes liikumatule raamile toetatud paneelidega (Solar tracking 2015).

Niisugused valgusekiirguse jälgijad paiknevad raamistiku servas ja optimeerivad efektiivselt kogu suure paneeli asendit selliselt, et saavutada maksimaalne päikeseenergia muundamine elektriliseks, vt joonis 5.

Kirjeldatau on Eestis esimene suurem päikeselektrijaam, mis maksimeerib paneelide asendimuutusega genereeritava elektri kogust. Võrreldes staatiliselt paiknevate PV-paneelidega on elektritootmise efektiivsus 45% kõrgem. Talvel lisab efektiivsust madal temperatuur, mis suurendab fotoelektriliste seadiste efektiivsust, ning lume pealt valgu-

## Rating chart using a sunny summer day as an example



### Yield benefit by DEGERtracker

Joonis 4. MLD-tehnoloogial põhineva maksimaalse valguskiirguse jälgija DEGER-trackeriga varustatud energiatorni keskmiselt kuni 45% oodatav kõrgem elektritootlus – joonisel on viirutatud alana märgitud fikseeritud alusel ja DEGER-trackeri (seadistataval alusel) kasutamisel saadud tootluste vahe

Figure 4. 45% increased yield using MLD Technology DEGER-tracker compared to fixed frame of PV solar panels (Solar tracking 2015)



Joonis 5. Energiatorni maksimaalse radiatsiooni suunale juhtiv seadis DEGER-traker MLD- tehnoloogia võimaldab 45% enamat tootlust võrreldes fikseeritud asendiga paneelidega (foto Tiit Kallaste)

Figure 5. DEGERtracker's yield in conjunction with the MLD Technology shows an average increase of up to 45 percent over fixed systems (photo by Tiit Kallaste)



se peegeldumine albedo-efekti tõttu. Albedo on arv, mis näitab, mitu protsenti Maale langenud kiirgusest peegeldub hajusalt tagasi. Tema arvuline väärtus kõigub laias vahemikus, nt Päikese suurtel kõrgustel ja värskel koheval lume puhul ulatudes kuni 90–95%-ni (Eesti kiirguskliima ... 2003).

Kurenurme päikeseelektrijaama ehitamist toetas KIK poole ja Kredex viiendikuga selle üldmaksumusest. Toetuse andmise eesmärk oli välja arendada eksperimentaalne projekt, mille pealt õppida päikeseenergiat maksimaalselt kasutama ja levitada saadud teadmisi järgmiste projektide juures nii Võrumaal ja ka mujal Eestis. Kahjuks on võrguühendusega tekkinud probleemide tõttu esmane eesmärk jäänud saavutamata.

Kurenurme päikeseelektrijaama avamiseks võib lugeda 2015. a maikuud. Siis ühendati elektrivõrku eksperimentaalne päikeseelektrijaam, kuhu kuulub 11 energiatorni, vt joonist 6. Kirjeldatu on Eestis esimene suurem päikeseelektrijaam, mis maksimeerib paneelide asendimuutusega MLD-tehnoloogiat kasutades genereeritava elektri kogust. Arendajale halva üllatusena selgus, et projektijärgset võimsust piirab arendajale Elektrilevi poolt esialgu suuliselt lubatud hiljem väiksemaks osutunud trafo-alajaama sisendvõimsus. Seetõttu on 11-st energiatornist neli tänaseni välja lülitatud. Kurenurme päikesejaama projekteeritud arvutuslik elektriline võimsus on 107 kW, kuid elektrit saavad genereerida nendest vaid 7, mis tähendab ligikaudu vaid kahte kolmandikku (64%) võimalikust toodangust. Maikuust alates on võrku saadetud juba enam kui 42 MWh



Joonis 6. 11-st energiatornist on alajaama võimsuspiirangu tõttu töös vaid 7 (foto Tiit Kallaste)  
Figure 6. Out of 11 energy towers 7 only are switched to transformer station due to its' limited capacity (photo by Tiit Kallaste)

elektrit. Kui kõik energiatornid oleks võrku ühendatud, võinuks suvine elektritoodang olla märksa kõrgem.

Käesoleval juhul on tegemist olukorraga, kus täiendavate kulutuste tegemine võimsama trafo-alajaama soetamiseks käib arendajale üle jõu, sellepärast otsib ta lahendusi kogu installeeritud elektrilise võimsuse ära kasutamiseks. Tulevikuplaanides on genereeritud elektri kasutamine elektrolüüsi abil vesiniku ja hapniku tootmiseks. Vesinik on tänuväärne energiasalvesti, mida saab kasutada mitmel moel. Hapnikku saab kasutada raviasutustes, tööstuses, reoveepuhastis, jms. vabaneva soojuse saab samuti ära kasutada. Energia salvestamine vesinikuna ja soovikohane rakendamine ka elektri tootmiseks on üks paremaid võimalusi muutliku iseloomuga otsese päikesekiirguse ning tuulejõu ulatuslikuks kasutamiseks. EL-i riikides on vesinik kütuseelementides kasutatava energiaallikana leidnud kõige mitmekesisemat rakendust, eelkõige tarnspordivahendites ja hajutatud elektritootmises. Ka Eesti jaoks on vesinikuenergeetika perspektiiv ahvatlev, sest toodab elektrit reostusvabalt, hajutab elektritootmist üle kogu maa, vähendab tsentraalsete võrkude haldamisega kaasnevat riski jne. Kaugemas plaanis on 30–50kW võimsusega väiketuliku püstitamise, eesmärgiga selgitada maakohtadesse sobivat taastuvate energiaallikate kooskasutamist ja ühtlasi elavdada talumajapidamistes lokaalset null-saastega energia tootmist.

Kurenurme eksperimentaalse päikeselektrijaama juurde plaanitakse luua katsebaas, kus saab reaalses tingimustes sooritada eksperimente juba suuremate energiaprojektide teostamiseks. Plaanis on katsetada vesiniku tootmist ja selle salvestamist kahel viisil toodetud elektri abil. Koostöös ülikoolide ja teadusasutustega saab Kurenurme olema üliõpilastele hea baas taastuvenergia kasutuselevõtmise edendamiseks. Plaanide realiseerimiseks on loomisel töörühm Tartu ülikooli, Eesti maaülikooli, Säätva Eesti Instituudi ja Tallinna tehnikaülikooli entusiastidest. Kõik see aitaks oluliselt kaasa uusimate tehnoloogiate rakendamisele päikese- ja tuuleenergia kasutamisel nii elektri võrkutootmisel kui ka vesinikuna salvestamisel.

## **Kokkuvõte**

Päikeseenergia kui ühe perspektiivikama ammendamatu energiaallika rakendused on maailmas laialt tuntud. Euroopa Liidu riikides on vesinikuenergeetika omandanud juba käesoleval ajal kindla positsiooni, aidates seega vähendada sõltuvust fossiilsetest energiakandjatest. Kliimamuutuste seisukohalt on need uudsed lahendused heaks täienduseks olemasolevatele elektritootmise viisidele. Lähikümnendite jooksul muutub Eesti elektritootmine tugevasti. Fossiilsetel kütustel elektri genereerimine asendub taastuvate energiakandjate energia muundamisega, käiku võetakse uued energiakandjad, nt

vesinik. Päikese- ja tuuleenergia kombineerimisel saadava vesinikkütuse kasutamine lokaalsetes kütuseelementides, mille töö tulemusena genereeritakse elektrit kas statsionaarsete (elamud) või mobiilsete (liiklusvahendid, laotõstukid, laevajõuseadmed jms) kütuseks. Vesinikkütuse kasutuselevõtmine vähendab oluliselt ka võimalikke negatiivsete kliimategurite poolt tekitatavaid riske, mis võivad häirida suurte elektrijaamad tööd või ülekandeliinide talitlust.

### **Kasutatud kirjandus**

- Eesti kiirguskliima teatmik. Russak, V. Kallis, A. 2003. Toim. Tooming H. Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut. [http://www.ilmateenistus.ee/wp-content/uploads/2013/01/eesti\\_kiirguskliima\\_teatmik.pdf](http://www.ilmateenistus.ee/wp-content/uploads/2013/01/eesti_kiirguskliima_teatmik.pdf). Viimati 16.10.2015.
- Hydrogenics News Update. 2013. 140 MW Wind Park officially opens in Germany with Energy Storage facility using 1 MW Power-to-Gas System from Hydrogenics. <http://www.hydrogenics.com/about-the-company/news-updates/2013/10/01/140-mw-wind-park-officially-opens-in-germany-with-energy-storage-facility-using-1-mw-power-to-gas-system-from-hydrogenics>. Viimati: 24.08.2015.
- Solar Tracking. DEGERenergie. <http://www.degerenergie.de/en/solar-tracking.html>. Viimati 12.10.2015.
- Riigi Teataja. RT I 2003, 25, 153. <https://www.riigiteataja.ee/akt/ELTS>. Viimati 15.10.2015.
- Russak, V., Kallis, A. 2003. Toim. Tooming H. Eesti kiirguskliima teatmik. Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut. [http://www.ilmateenistus.ee/wp-content/uploads/2013/01/eesti\\_kiirguskliima\\_teatmik.pdf](http://www.ilmateenistus.ee/wp-content/uploads/2013/01/eesti_kiirguskliima_teatmik.pdf). Viimati 16.10.2015.
- Statistikaamet. 2014. Päikesepaiste kestus Eestis aastal 2013. – Eesti statistika aastaraamat. [http://rahvatervis.ut.ee/bitstream/1/5805/1/Stat\\_aastaraamat2014.pdf](http://rahvatervis.ut.ee/bitstream/1/5805/1/Stat_aastaraamat2014.pdf). Viimati 18.10.2015.
- Taastuenergia. <http://elering.ee/taastuenergia-5/>. Viimati 16.10.2015.
- Taastuenergia aastaraamat 2014. 2015. Eesti Taastuenergia Koda. [https://www.dropbox.com/s/xfhlugdahwd364s/TE\\_aastaraamat\\_210x297mm\\_bleed\\_5mm.pdf?dl=0](https://www.dropbox.com/s/xfhlugdahwd364s/TE_aastaraamat_210x297mm_bleed_5mm.pdf?dl=0). Viimati 16.10.2015.
- Taastuenergia toetus. AS Eleringi veebileht; <http://elering.ee/taastuenergia-toetus/>. Viimati 15.10.2015.
- Taastuenergia tootjatele väljamakstud toetused, [http://elering.ee/public/Taastuenergia/Valjamakstud\\_toetused.xls](http://elering.ee/public/Taastuenergia/Valjamakstud_toetused.xls), 15.10.2015.
- Tomson, T. 2000. Solar energy: technological utilization of solar energy. Humare. Tallinn. 136 lk.

## THE KURENURME SOLAR PARK COULD PRODUCE HYDROGEN

Viido Polikarpus, Tiit Kallaste

This past spring, in southern Estonia near Sõmerpalu, close to the tiny railroad Kurenume crossing, an experimental solar park comprised of 11 DEGER NT9000 tracker towers (each tower holds 9.8kW (40 Solet 245W PV-panels) and 1 Aurora Power One string inverter), went on line having a maximum capacity of 107kW. Since the start in May till September 2015 the output calculates roughly 42 MWh of clean solar energy fed into the grid. The 11 DEGERtracker towers are constructed of galvanized frames atop a reinforced concrete base. This advanced solar technology enables each tower's 40 photovoltaic panels to seek out, follow and maximize the greatest possible light sources during the day from dawn to dusk.

Because 85% of the solar energy coming onto the panels is given off as heat (15% electricity), there is little concern for snow and ice accumulation during the winter months, the panels get quite warm even in winter. In addition, a special sensor will lift all the 440 panels in the park into a vertical position should snow or ice begin to form during the hours of darkness when they are normally in the horizontal state. All 11 towers will immediately assume the horizontal position whenever there are excessive winds.

In Estonia it is not unusual to have snow on the ground from November to April. During this time, the panels will draw their light energy directly from the snow cover instead of the normally cloud covered sky. The sun travels, year round 300 degrees across the Estonian sky. Consequently, fixed panel arrays will not benefit from direct sunlight or profit from the albedo effect from the ground snow cover for most of the year. This should be a major concern for all future solar projects, especially at this latitude. Even the modest Kurenurme 107kW solar park is capable of producing 226 MWh per year.

Because the Kurenurme Solar Park is 70% government funded (50% supported by KIK, and an additional 20% by Kredex), we are continuing in our "proof of concept" mode and will develop Estonia's solar potential further by moving the solar based electricity production to generation of hydrogen and oxygen. Hydrogen is considered one of the best ways to store the sun's energy for later use. Hydrogen is regarded universally as the ideal future fuel substitute for fossil fuels. Pure oxygen, also a byproduct of electrolysis, can be used in many ways such as recycling waste water or direct sales to hospitals. Another feature of electrolysis, the heat released could be captured in water for such applications as heating greenhouses in the agricultural sector.

Storage of excess electricity generated by solar and wind energy via hydrogen production is the wave of the future. In the European Union, hydrogen fuel cells are finding more and more practical applications, especially in public transport and local energy generation. Already 5 buses in Tartu are using compressed natural gas as a fuel. Hydrogen as a green fuel can be easily substituted resulting in zero exhaust fumes. Improved urban air quality is a high priority issue concerning directly the health of our citizens. Hydrogen fuel cells are powering mass transport in Germany, Japan, the United States and our neighbours in Sweden. It is sure Estonia follows these best practices in the near future!

The Kurenurme experimental solar park will add on a research facility with the capabilities of studying and applying solar, wind, hydrogen, electrolysis solutions. There is a plan to erect a 30-50kW wind turbine in order to compare solar to wind, any significant gains to add to solar from normal local wind activities year round.

Today, an active group of energy enthusiasts from Tartu University, Estonian University of Life Sciences, Stockholm Environment Institute Tallinn, and The Tallinn Technical University are planning to work together towards the goal of assuring maximum considerations and applications of the latest Technologies. The hope is to develop Estonia's solar and wind energies in an environmentally friendly, locally oriented green energy production, use, and storage.

# KAHE FOTOELEKTRILISE PÄIKESEENERGIA KASUTAMISE SÜSTEEMI (PS) ANALÜÜS ESIMISE TÖÖTAMISAASTA ANDMETE ALUSEL. RAKENDUSLIKUD SOOVITUSED PS-I KASUTAMISEKS

Valeri Saikovski

TTÜ Elektrotehnika Instituut, AS Caverion Eesti  
valeri.saikovski@gmail.com

## **Annotatsioon**

Artikkel sisaldab uuringute tulemusi kahe päikesepaneelidega objekti kohta, mis on ehitatud 2014. aasta kevadel. Üks neist on kõige suurema võimsusega päikesepaneelidega objektidest käesoleval ajal Eestis. Artikkel sisaldab nende planeeritud tasuvuse andmeid, maksimaalse võimsuse saavutamise tulemusi ja tootlikkuse andmeid kuude kaupa. Artikkel sisaldab ka soovitusi PS-süsteemide projekteerijatele ja TEA valiku ja arvutuste algorüümi.

Märksõnad: taastuvenergia allikad, fotoelektrilised päikese-süsteemid, päikesepaneelide kaldenurk, akumuleeritud tulud, tasuvus.

## **Sissejuhatus**

Autor esitas eelmisel konverentsil suulise ettekande ja avaldas kogumikus artikli kahe suure objekti PS-i töötamise esimese 6 kuu tehniliste näitajate kohta (töötamise algus aprillis 2014). Käesolev artikkel sisaldab PSde töötamise kogu esimese aasta tehnilisi näitajaid (aprill 2014 – märts 2015).

Nurmevälja Logistikakeskuse PS-i näitajad on esitatud üksikasjalikumalt, sealhulgas on toodud ka tariifide prognoosimise protsessi kirjeldus. Agali Kinnisvarade hoone PS on kõige suurema võimsusega fotoelektriline päikeseenergia kasutamise süsteem Eestis käesoleval momendil.

Artikkel sisaldab kahe süsteemi võrdlust ja hoone parameetrite ning päikesepaneelide paigaldusviisi mõju PS-i tootlikkusele ja maksimumvõimsusele. Autor pakub välja ka TEA kasutamise süstematiseerimise variandi ja arvutuste võimaliku algoritmi kirjelduse.

**Nurmevälja logistikakeskuse PS-i töötamise üksikasjalik analüüs ajavahemikul  
aprill 2014 – märts 2015**

## Uurimisobjekti kirjeldus

Uurimisobjektiks on Nurmevälja logistikakeskuse (NVL) fotoelektrilise päikeseenergia kasutamise süsteem (PS). Antud hoone asub Iru SEJ läheduses, aadressil Välja tee 1, Jõelähtme vald. Nii märkimisväärse suurusega süsteem, milles on 368 päikesepaneeli, loob fassaadil võimsa mulje. Paneelide asukoht on projekteeritud vastavalt hoone ehitusprojektile: hoone lõunapoolsel küljel 70° nurga all horisondi suhtes suunaga 10° lõunast ida poole. PS-i seadeparameetreid ja ühendust tavahoone elektrisüsteemiga (ES) on üksikasjalikult kirjeldatud minu artiklis (TEUK XVI) ja tutvustatud eelmisel konverentsil suulises ettekandes. PS töötab alates 2014. aasta märtsist. Eelmine ja käesolev artikkel sisaldavad infosüsteemi andmeid reaajas (<https://sunnyportal.com>).

## Tootlikkuse ja võimsuse andmed

Vastavalt autori nägemusele oleks otstarbekas PS-i töötamise tulemused vormistada tabelis 1 kirjeldatud viisil. Elektrienergia tarbimine kuude lõikes annab võimaluse hinnata PS-energia jagunemist üldtarbimises. Võimsuse analüüs tundide fikseerimisega on vajalik selleks, et hinnata objekti asukoha, hoone orientatsiooni ja jahutuse efektiivsust.

*Tabel 1. Nurmevälja logistikakeskuse PS-i tootlikkus ja võimsus*

*Table 1. Productivity of the solar system and the maximum power of the Nurmevälja logistics centre*

	<b>Tootlikkus</b>	<b>Maksimaalne võimsus</b>	<b>Päev</b>	<b>Aeg</b>
	kWh	kW		
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
aprill 2014	7 908	78,1	25. aprill	12.00
mai	8 366	78,5	2. mai	12.00
juuni	7 301	70	28. juuni	13.00
juuli	<b>10 732</b>	<b>64</b>	<b>26. juuli</b>	<b>13.00</b>
august	9 321	69	17. august	14.00
september	9 175	72,2	17. september	14.00
oktoober	5 124	79,4	22. oktoober	13.00
november	1 038	67	19. november	12.15
detsember	759	48,8	9. detsember	12.00
jaanuar 2015	<b>922</b>	10,2	6. jaanuar	9.00
veebruar	4 113	79,9	16. veebruar	13.00
märts	7 237	79,7	13. märts	13.00
<b>Kokku</b>	<b>71 996</b>			

### Tootlikkuse tulemused

PS-i aastatootlikkuse hindamiseks kasutatakse süsteemi Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). See on interaktiivne süsteem päikeseenergia ressurssidest ja fotomeetristest võimalustest Euroopa riikides (<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>).

Lähtudes Nurmevälja logistikakeskuse asukohast on PS-i tootlikkus 919 kWh PS-i võimsuse 1 kW kohta. Lähtudes PS-i nimivõimsusest, peaks 80 kW planeeritud tootlikkus olema  $919 \times 80 = 73\,520$  kWh aastas. Tabeli 1 andmed näitavad, et uuritav PS saavutas edukalt tulemuse 71 996 kWh, s.o 98% nominaalist.

### Nimivõimsuse saavutamise tulemused

Infosüsteem fikseeris 16. veebruaril 2015 PS-i võimsuse 79,9 kW, mis on 99,88% nimivõimsusest. Sellelähedane oli võimsus ka 22. oktoobril 2014 (79,4 kW) ja 2. mail 2014 (78,5 kW) (98,13 %).

## **Nurmevälja logistikakeskuse PS-i majanduslikud parameetrid**

### Ehitus- ja genereeritud energia maksumus

Vastavalt paigaldaja Energogen OÜ andmetele on PS-i ehitusmaksumus 104 213 eurot. Tasuvuse arvutuse nurgakiviks on tariifide realistlik prognoos. Perioodil 2008–2013 tehti mitmed arvutused, lähtudes liiga optimistlikust nägemusest. Energiatariifid ja taastuvenergia hind tõusevad pidevalt. Investeeringud tasuvad ära umbes 5–8 aasta jooksul.

Praegune olukord on teistsugune. Tariifide tõus ei ole stabiilne ja lähiajal tekivad vältimatult ka muud probleemid energiaturgudel: makroökoonoomiline stagnatsioon, toorainete hinna kõikumine mõlemas suunas, madala naftahinna pikk periood (2–3 aastat). Lähtudes kirjeldatud asjaoludest, oleks otstarbekas kasutada arvutustes 3 varianti: positiivne, negatiivne, keskmine. TEA uuringute jaoks on positiivne stsenaarium tariifide pidev tõusmine, sealhulgas ka võrgutasu ja taastuvenergia hinna tõus. Positiivne stsenaarium vastab artiklis (Saikovski 2014) kasutatud tariifidele. Tabelis 2 on esitatud autori nägemus kõikide kirjeldatud variandide kohta. Tabel 3 sisaldab tabeli 2 tariifide alusel arvutatud toodetud elektrienergia maksumuse koos akumulieeritud kokkuhoiu kaudu saadud tuludega (igal aastal summaarne kokkuhoid PS-i kasutamise algusest).

Alltoodud tariifide muutused (positiivne variant) on arvutatud, lähtudes alljärgnevatest eeltingimustest:

- taastuvenergia hind tõuseb 0,01116 kuni 0,03216 €/kWh,
- elektrienergia aktsiis võrdub 0,00447 €/ kWh,
- võrgutasu muutub 0,056–0,070 €/ kWh,



- päikeseenergiastüsteemi tootlikkus aastas on 72 000 kWh.

Negatiivne ja keskmine tariifide muutuse variant sisaldab taastuvenergia hinna ja võrgutasu väiksemat tõusu.

Tabel 2. Tariifide muutuse variandid, euro/kWh

Table 2. Tariffs change options, euro/kWh

Aastat	Stsenaariumid		
	Positiivne	Negatiivne	Keskmine
2015	0,106	0,106	0,106
2016	0,124	0,112	0,118
2017	0,13	0,118	0,124
2018	0,142	0,124	0,133
2019	0,154	0,13	0,142
2020	0,166	0,136	0,146
2021	0,178	0,142	0,16
2022	0,19	0,148	0,167
2023	0,202	0,154	0,178
2024	0,214	0,16	0,187
2025	0,216	0,165	0,19

Tabel 3. Nurmevälja logistikakeskuse toodetud energia maksumus ja kokkuhoiu kaudu akumulieeritud tulud eurodes

Table 3. Nurmevalya logistics centre - the cost of energy produced by the accumulated savings income

Aasta	Toodetud elektrienergia maksumus			Akumuleeritud tulud		
	P	N	K	P	N	K
2015	7 632	7 632	7 632	7 632	7 632	7 632
2016	8 928	8 064	8 496	16 560	15 696	16 128
2017	9 360	8 496	8 928	25 920	24 192	25 056
2018	10 224	8 928	9 576	36 144	33 120	34 632
2019	11 088	9 360	10 224	47 232	42 480	44 856
2020	11 952	9 792	10 512	59 184	52 272	55 368
2021	12 816	10 224	11 520	72 000	62 496	66 888
2022	13 680	10 656	12 024	85 680	73 152	78 912
2023	14 544	11 088	12 816	100 224	84 240	91 728
2024	15 408	11 520	13 464	115 632	95 760	105 192
2025	15 552	11 880	13 680	131 184	107 640	118 872

### Tasuvuse täitmise analüüs ja perspektiivid

Tabel 3 näitab, et tasuvus 8 aasta jooksul on võimalik ainult väga positiivsete tariifide korral. Lähtudes infost, mis meil on 2015. aasta kohta, on sellise stsenaariumi realiseerumine vähetõenäoline. Isegi keskmise variandi tariifide tõus on problemaatiline. Oletan, et reaalne tasuvus vastab negatiivsele variandile. Investeeringute tasuvusajaks on 10 aastat.

### Mõju tavaelektrisüsteemile ja muud PS-i kasutamisega kaasnevad tehnilised aspektid.

Tasuvuse tähtaja täitmine on oluliselt seotud tootja poolt deklareeritud tehniliste parameetrite stabiilsusega ja tootlikkuse langusega lubatu piires. Oluline kõikumine või tootlikkuse langus üle lubatud piiri kaasneb tasuvuse tähtaja probleemiga. Ka tuleb jälgida PS-i mõju tavaelektrisüsteemile (ES). See mõju on seotud võrguinverteri töö kvaliteediga. Võimalik negatiivne mõju: reaktiivenergia genereerimine, harmoonikute olemasolu ja muud energia kvaliteedi kõrvalekalded normist. Kirjeldatud probleemid on sarnased sagedusmuunduri kasutamisel tekkivate probleemidega.

Oleks otstarbekas teha kohustuslikuks võrguanalüsaatori paigaldus, sest peab olema reaalne võimalus kohe fikseerida PS-i negatiivne mõju ja kõrvaldada selle allikas.

## **Firma Agal Kinnisvarad PS-i lühikirjeldus ja tulemused ajavahemikul aprill 2014 – märts 2015**

### Üldkirjeldus ning tootlikkuse ja võimsuse tulemused

Firma Agal Kinnisvarad (AgKV) tootmis- ja laohoonele, mis asub Pärnus Riia mnt 233a, on paigaldatud päikeseenergia kasutamise süsteem (PS), mis on käesoleval ajal kõige suurema võimsusega selline süsteem Eestis: süsteemi koguvõimsus 176,25 kW (705 paneeli), kasutatavad paneelid ZIP6-60-250P, katuseraamistik Renusol MetaSole. Objekti PS-i infosüsteemi andmeid reaalajas näeb <https://www.sunnyportal.com>.

Järgnevas tabelis 4 on esitatud AgKV PS-i kasutamise esimese aasta tulemused.

Tabel 4. Firma Agal KV tootlikkus ja võimsus

Table 4. Agal KV building productivity of the solar system, and the maximum power

Kuu	Tootlikkus	Maksimaalne võimsus	Päev	Aeg
	kWh	kW		
1	2	3	6	7
aprill 2014	16 602	119	23. apr	14.00
mai	21 380	115	15. mai	12.00
juuni	20 863	119	7. juuni	14.00
juuli	<b>26 671</b>	<b>123</b>	<b>11. juuli</b>	<b>13.00</b>
august	19 906	100	1. aug	14.00
september	14 380	96,3	5. sept	13.00
oktoober	6 091	70,6	5. oktoober	12.00
november	1 054	33,7	12. november	12.00
detsember	408	17,8	9. detsember	12.00
Jaanuar 2015	615	6,2	20. jaanuar	13.00
veebruar	1 641	67,7	25. veebruar	13.00
märts	10 106	71,6	19. märts	13.00
	<b>139 717</b>			

Lähtudes PVGIS-i andmetest, peab firma AgKV PS-paneeli 1 kW teoreetiline aasta-tootlikkus olema 935 kWh. PS-i summaarne tootlikkus aastas on  $140 \times 935 = 130\,900$  kWh. Tabelis 4 esitatud tulemused (139 717) näitavad, et tootlikkuse osas uuritav PS töötab isegi paremini, võrreldes PVGIS-i poolt ennustatuga. Tasuvuse arvutuses lähtuti aastatootlikkusest 134 500 kWh. Objekti PS-i on üksikasjalikult kirjeldatud (Saikovski 2014). Süsteemi nimivõimsus on 140 kW. Infosüsteem fikseeris 22.10.2014 võimsuse 123 kW, mis on 88% nimivõimsusest. Maksimaalne tootlikkus saavutati ka juulis.

#### Majanduslikud parameetrid ja tasuvuse täitmise analüüs ning perspektiivid

Sama meetodit ja tariife kasutades arvutati AgKV päikesesüsteemi tulemused (tabel 5).

Tabel 5. AgKV toodetud energia maksumus ja kokkuhoiu kaudu akumulieeritud tulud eurodes  
 Table 5. Agal building - the cost of energy produced by the accumulated savings

Aasta	Toodetud elektrienergia maksumus			Akumuleeritavad tulud		
	P	N	K	P	N	K
2015	14 257	14 257	14 257	14 257	14 257	14 257
2016	16 678	15 064	15 871	30 935	29 321	30 128
2017	17 485	15 871	16 678	48 420	45 192	46 806
2018	19 099	16 678	17 888,5	67 519	61 870	64694,5
2019	20 713	17 485	19 099	88 232	79 355	83793,5
2020	22 327	18 292	19 637	110 559	97 647	103 431
2021	23 941	19 099	21 520	134 500	116 746	124 951
2022	25 555	19 906	22 461,5	160 055	136 652	147 412
2023	27 169	20 713	23 941	187 224	157 365	171 353
2024	28 783	21 520	25 151,5	216 007	178 885	196 505
2025	29 052	22 193	25 555	245 059	201 078	222 060

PS-i ehitusmaksumus on 190 000 eurot. Esitatud tulemused näitavad, et tasuvus on erinevate tariifide puhul selline:

positiivne stsenaarium – 8,2 aastat,

negatiivne stsenaarium – 9,5 aastat,

keskmine stsenaarium – 8,8 aastat.

## Kahe PS-i töötulemuste võrdlemine. Rakenduslikud soovitusel PS-i kasutamiseks

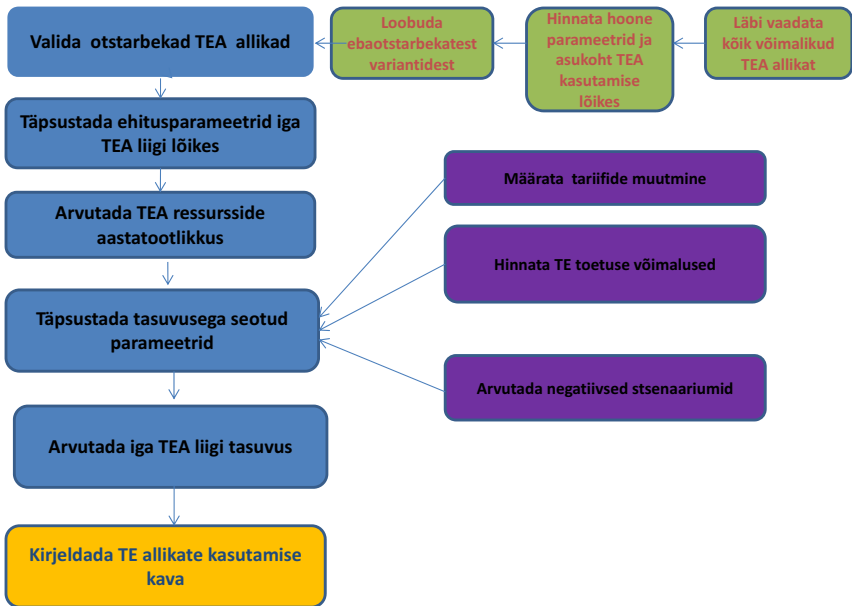
### Kahe objekti võrdlemine

Kahe esitatud objekti esmane analüüs näitab, et Nurmevälja objektil on väga head tulemused võimsuse saavutamisel, kuid tootlikkus on Pärnu objektil oluliselt parem. Tasuvusplaani täitmise seos tootlikkusega ja täitmise perspektiiv on samuti Pärnu objektil parem. Seda oli võimalik oletada, sest minimaalse nurgaga (10 kraadi) kagusuund toob kaasa päikesekiirguse maksimaalse kasutamise. Nurmeväljal on soodsad tingimused paneelide jahutamiseks, samal ajal asub Pärnu regioon paremates tingimustes summaarse päikesekiirguse osas. Paneelide väikese kaldenurgaga paigaldusviis katusel tagab võrdse kiirguse päeva esimesel ja teisel poolel. Nurmeväljal ja Pärnus on tootlikkus sarnane ajavahemikul 7.00–14.00. Nurmeväljal langeb tootlikkus kuni 10% juba kell 17.00, kuid Pärnus on sarnane tootlikkus kl 20.00–21.00.

## Soovitused PS-i projekteerijatele

Pärast põhimõttelist otsust TEA kasutamiseks tuleb analüüsida hoone parameetreid, mis mõjutavad PS-i efektiivsust.

- Hoone geograafiline orientatsioon (GO): PS-i paigaldamiseks sobib lõunapoolne suund, käesoleva uuringu tulemused näitavad, et ka väike idapoolne nurk ei ole probleemiks; uue hoone ehitamise korral on võib-olla võimalik korrigeerida hoone orientatsiooni PS-süsteemide kasutamiseks sobivas suunas.
- Fassaadi konstruktsioon: PS-i paigaldamiseks sobivad ilma akendeta ja muude takistusteta seinad; ka on tähtis, et fassaad oleks sobiva geograafilise orientatsiooniga.
- Tuleb analüüsida katuse kasutusvõimalusi: arvestada GO, vabade pindade olemasolu ja katusele paigaldatud muid tehnosüsteeme, välja selgitada katuse pind, mida on võimalik kasutada PS-i paigaldamiseks; määrata maksimaalne võimalik paneelide kogus.
- Arvutada eelnevalt PS-i üldtootlikkus ja tasuvus.
- Analüüsida objekti elektrienergia vajadust aasta ja ööpäeva lõikes.
- Lähtudes rahalistest võimalustest ja kirjeldatud asjaoludest, määrata lõplikult vajalik paneelide kogus.
- Määrata lõplikult PS-i maht hoone eripära ja elektrienergia vajaduse alusel.



Joonis 1. TEA valiku ja arvutuste algoritm

Figure 1. Renewable energy type selection algorithm

- Täpsustada tehnilised parameetrid: inverterid, paneelide tüüp, ühendus tavavõrguga.
- Arvutada lõplikult tasuvus ja muud majanduslikud parameetrid tariifide optimistliku, pessimistliku ja keskmise variandi jaoks.

### TEA uuringute süstematiseerimine ja otstarbeka paigalduse kriteeriumite määramine

Esitatud joonis 1 sisaldab universaalset taastuvenergia allikate kasutamise algoritmi. Vastavalt TEA liigile (päikese-, tuule-, hüdroenergia jne) tuleb kasutada erinevaid infoallikaid objekti energiaressursi kohta (PVGIS, tuuleatlas jne). Ka esitatud algoritm sisaldab mitme TEA samaaegse arvutuse võimalust.

Autori doktoritöös ning tavahoone ES jaoks arvutati ka TEA kasutamise tasuvus sama tariifide prognoosi ja hoone ES-i ühtse mudeli alusel.

### **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. 2014. Uuendused hoone elektrisüsteemis: mudel, klassifikatsioon ja kasutamise tulemuse prognoosimine. Päikesepaneelide kasutamine Nurmevälja Logistikakeskuses (80 kW) ja firma Agal Kinnisvara tootmishoones (140 kW) – esmane analüüs. TEUK XVI, 67–79.
- Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) – interaktiivne süsteem päikeseenergia ressurssidest ja fotomeetristest võimalustest Euroopa riikides. <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>.
- Nurmevälja logistikakeskuse PS-i infosüsteemi andmed reaajas. <https://www.sunnyportal.com/Templates/PublicPage.aspx?page=cd0fe8a9-1a7b-44bd-a286-e42d18b533b3>, <https://www.sunnyportal.com/Templates/PublicPage.aspx?page=245dc795-46aa-449f-b078-8bcbec826f94>.
- Firma Agal Kinnisvarad PS-i infosüsteemi andmed reaajas. <https://www.sunnyportal.com/Templates/PublicPage.aspx?page=b7a4871a-d5f8-49b3-9f0d-0917ff2e744e>, <https://www.sunnyportal.com/Templates/PublicPage.aspx?page=495c2f8a-af5a-4ad0-9ab3-62adfb427847>.
- OÜ Energogen poolt esitatud andmed paigaldatud päikese-süsteemide kohta.

# **ANALYSIS OF THE FIRST YEAR OF OPERATION OF THE PHOTOVOLTAIC SOLAR PANELS SYSTEM. PRACTICAL RECOMMENDATIONS FOR THE USE OF SUCH SYSTEM.**

Valeri Saikovski

Article contains the results of the research object with solar panels, which have been built in the spring 2014. One of them is the highest powered solar panels items currently in Estonia. The article includes the planned return on these data, the capacity for achieving maximum performance and productivity data on a monthly basis. Article also contains recommendations for solar systems designers, and the selection and calculation algorithm for using renewable energy.

# HOONE ELEKTRISÜSTEEMI PARAMEETRID, MIS SOBIVAD UUENDUSTEKS (DRAIVERID). NEGATIIVSED ERIPÄRAD, MILLELE TULEB TÄHELEPANU PÖÖRATA, ET VÄLTIDA UUENDUSTE REALISEERIMISE EBAPIISAVA TASUVUSE JA MITTESOBIVA TEHNILISE KÕRVALMÕJU TEKET

Valeri Saikovski, Raivo Teemets

TTÜ Elektrotehnika instituudi doktorant, Caverion Eesti AS käidujuht, [valeri.saikovski@caverion.ee](mailto:valeri.saikovski@caverion.ee)

TTÜ Elektrotehnika instituudi dotsent, [raivo.teemets@ttu.ee](mailto:raivo.teemets@ttu.ee)

## Annotatsioon

Artikkel on hoone elektrisüsteemi (ES) uuenduste uuringute kokkuvõte, mis sisaldab ettepanekuid, kuidas võiks lihtsalt arvutada olulisi parameetreid või leida hoone eripärasid, mis mõjutavad positiivselt uuenduste realiseerimist (draiverid). Draiverid on kirjeldatud ka taastuvenergiaallikate (TEA) kasutamise korral ning esitatud ettepanekud arvutiprogrammi loomiseks.

Märksõnad: tarbimisrežiimid, tehnoloogiline tasand, hoone elektrisüsteem, uuendused, draiver, antidraiver, taastuvenergia, süstematiseerimine.

## Sissejuhatus

Artiklis „Makroökoonoomika meetodite kohandamine hoone elektrisüsteemi uuenduste prognoosimisel. Prognoosimisprotsessi kirjeldus. Konkreetse elektripaigaldise uuenduse analüüs“ (Saikovski ja Teemets 2013) on kirjeldatud, kuidas hoone elektrisüsteemi uuringutes oleks võimalik kasutada makroökoonoomika meetodit. Makroökoonoomikas uuritakse riigi ökonomika proportsioone, eesmärgiga ennustada valmisolekut innovatsioonide rakendamiseks või vajalike struktuurimuutuste soovitamiseks. Antud artikkel on lisa varem esitatud ettepanekutele ES-i uuringute korraldamise kohta sarnaste meetoditega. Üksikasjalikult on kirjeldatud, kuidas leida uuendusteks sobivaid elektrisüsteemi eripärasid. Uus esitatud visioon, mis ei ole seotud keeruliste arvutustega, on kirjeldatud ka taastuvate energiaallikate kasutamise korral.

## 1 Hoone elektrisüsteemi uuenduste efektiivsuse olulised eripärad

### 1.1 Hoone kirjeldus uuenduste rakendamise lõikes

Hoone elektrisüsteemi uuendamise planeerimine on seotud arusaamisega sellest, millised on olemasoleva süsteemi nõrgad kohad, sealhulgas omaniku probleemid käidutegevuses ja elektriseadmete reaalne tarbimisrežiim. Peab olema selge, missugune on ES-i



tehnoloogiline tasand. Käesoleva artikli ja autori doktoritöö kontekstis on elektrisüsteemi tehnoloogiline tasand vastavuses aruka võrgu (*smart-grid*) põhimõtetega. Üksikasjaliku kirjelduse leiab artiklist (Saikovski ja Teemets 2013). Praktikast tähendab see ES-i struktuuri eripärasid (käidu teostamise mugavus), automatiseerimise/juhtimise tasandit (sõltumatus personali subjektiivsetest otsustest) ja minimaalset personalihulka. Kirjeldatud eripäradest lähtudes on hoone omanikul vaja kätte saada süstematiseeritud info elektrisüsteemi tehnoloogilisest tasandist, et oleks võimalik langetada otsus, millises suunas hoone ES-i parendada.

Oluline on, et sisepaigaldise tehnoloogiline tasand oleks sama kvaliteediga kui toitevõrgu tasand. Vastasel juhul ei saa hoone omanik kasutada toitevõrgu võimalusi. Soovituslik ei ole ka olukord, kus hoone tehnoloogiline tasand oleks oluliselt parem võrreldes toitevõrguga, sest võrguprobleemide tõttu ei saa efektiivselt kasutada mahukaid ehitusinvesteeringuid hoonesse. Selliste probleemide hulka kuuluvad näiteks elektrivarustuse katkestused, reservtoiteallika puudumine, ülekoormatud toiteliinid, pinge kvaliteediprobleemid.

## **1.2 Uuenduseks sobivad eripärad (draiverid) ja nende positiivse mõju kirjeldus**

Hoone ESi parameetreid või eripärasid, mis tagavad positiivse tulemuse uuenduste realiseerimisel, nimetatakse **draiveriteks** (ingl k *drivers*). Draiveriks võib nimetada kergesti arvatava, visuaalselt fikseeritava, mõõtmisseadme abiga saadava parameetri või mitme parameetri proportsiooni. Sarnases tähenduses kasutatakse seda terminit ka makroökonoomikas. Üksikasjalikult on seda käsitletud artiklis (Saikovski ja Teemets 2013).

Ühe seadmeliigi oluline osa elektritarbimises on draiver, milles praegune tehnika tasand loob võimaluse need seadmed vahetada uue põlvkonna seadmete vastu. Kuna hoonetes on palju elektriseadete liike ja nende energiatarbimine on juhuslik (nt pistikupesade kasutamine), teeb see keeruliseks uuenduste realiseerimise. Praegu on juba võimalik leida mitmete valgustuslahendustele leedasadused. Oletame, et mingis hoonetes on suur osa elektritarbimisest seotud valgustusega. Kirjeldatud olukorras oleks põhiuuenduseks otstarbekas valida valgustite asendus leedvalgustitega. Tasuvuse ja muude näitajate arvutused on lihtsad. Alltoodud näited kirjeldavad hoone ESi võimalikke konkreetseid draivereid.

*Näide 1.* Valgustuse tarbimine moodustab 64% hoone elektritarbimisest, mis on suurem osa ja tekitab võimaluse parendada ESi väga hea tasuvusega valgustussüsteemi uuenduse kaudu.

Analoogiliselt **draiveriga** võib mõned elektrisüsteemi negatiivse mõjuga eripärad nimetada **antidraiveriteks** (ingl k *anti-drivers*).

*Näide 2.* TTÜ energeetikateaduskonna hoones moodustavad elektrisüsteemi suurema osa laboratooriumite ja töökodade elektripaigaldised ja -seadmed – kokku 1050 kW, mis on 57,3% hoonesse paigaldatud elektrivõimsusest. Seda elektrisüsteemi osa kasutatakse suhteliselt madala intensiivsusega, kuid ta on ehitatud suure maksumusega elektripaigaldise osana, millest on omakorda tingitud olulised raskused ES-i uuenduste kasutamiseks. Määrame kirjeldatud eripära antidraiveriks.

### **1.3 Mittetehniliste parameetrite positiivne mõju**

Uuenduse realiseerimiseks peab olema võimalus lisakaablite paigaldamiseks, juhtmes-tiku lisamiseks või uue elektriseadme paigaldamiseks (nt vaba ruum elektrikilpides ja tehno ruumides).

Intensiivne töörežiim sobib hästi uuenduste kasutamiseks, kui uuenduse eesmärk on väiksema võimsusega seadme paigaldus ja energia kokkuhoid. Intensiivne kasutamine garanteerib minimaalse tasuvusperioodi.

*Näide 3.* Kilpides on piisavalt vaba ruumi reservseadme paigaldamiseks. See ei ole konkreetne parameeter, kuid kirjeldatud eripära võimaldab uuenduse realiseerimisel minimaalseid kulutusi ja sobiva tasuvuse.

Elektrisüsteemi mugav struktuur, üldtoitepunktiga peakilbis (radiaaltopoloogia), loob võimaluse minimaalsete lisakuludega jälgida, juhtida ja reguleerida seadmeid.

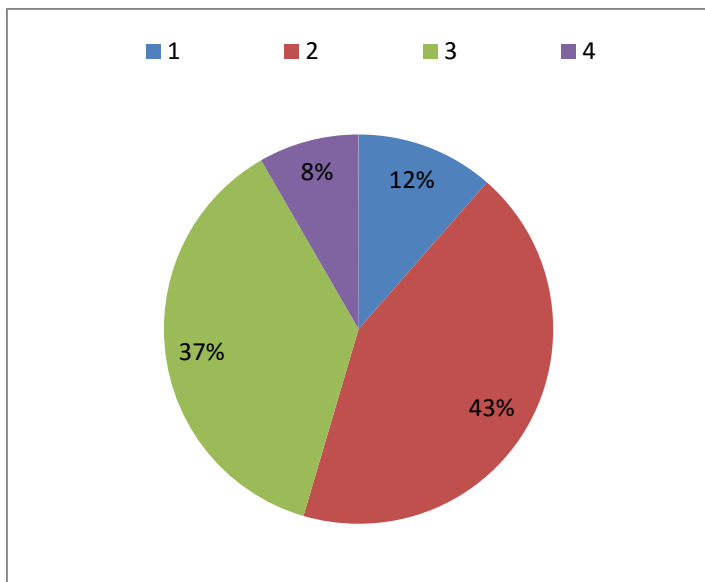
Võimalik ootamatu draiver uuenduse realiseerimiseks on tariifide tormiline tõus. See on suur probleem elektrienergia tavatarbijale, kuid uuenduste realiseerimise jaoks positiivse mõjuga, sest tasuvusperiood väheneb.

### **1.4 Lihtsad meetodid draiverite fikseerimiseks ja kontrollimiseks**

Draiverite leidmine ei ole tihti seotud keeruliste arvutustega. Piisab õigest arusaamisest, kuidas mõjub konkreetne uuendus hoone elektrisüsteemi parameetritele. Tuleb ka analüüsida, millises suunas võiks parenda konkreetse hoone ES-i, et eesmärk saavutada

mõistlike kulutustega.

Esimesel etapil oleks otstarbekas analüüsida mittetehnilisi eripärasid – struktuur, töörežiim, erinevate hooneosade elektritarbimine ja uuendatud osa kogu hoone elektrisüsteemi maksumusest. Artiklis (Saikovski ja Teemets 2013) on toodud Tallinnas aadressil Punane 73 asuva logistikakeskuse (PLK) erinevate ESi osade osamaksumuste arvutus kogu hoone elektrisüsteemis.



1 – jaotusseade, 2 – kaablid, 3 – valgustus, 4 – tarbija installatsioon

Joonis 1. Hoone elektrisüsteemi osade maksumuse diagramm

Figure 1. Building ES cost pie

Diagramm näitab, et elektrisüsteemist moodustab olulise osa (37%) valgustus. Oletame, et see on võimalik draiver ES-i parendamiseks. Analüüsiti ka sama hoone mittetehnilisi parameetreid. Elektrisüsteemi struktuur on mugav, radiaalse topoloogiaga (kilpide toited lähtuvad üldisest peakeskusest). See sobib reguleerimis- ja juhtimisseadmete kasutamiseks, kuid kahjuks ei ole mitmetes kilpides piisavalt vaba ruumi reservseadmete jaoks. See on PLK elektrisüsteemi väike antidraiver.

Vastavalt artikli (Saikovski 2011) andmetele on laomajandis seadmete kasutamine oluliselt intensiivsem võrreldes bürooga – aastane elektritarbimine büroos oli 217 517 kWh, laomajandis 485 713 kWh.

Samas on büroo arvutuslik elektrivõimsus (180 kW) suurem laomajandi arvutuslikust võimsusest (157,2 kW). Kirjeldatud analüüs näitab, et otstarbekas oleks alustada ESI parendamist laomajandist. Ka PLK-kompleksi eripära seisneb selles, et on olemas suhteliselt suure mahuga parkla ja olulise elektritarbimisega hoone välisvalgustus (aastane tarbimine 41 610 kWh). See on ka elektrisüsteemi parendamise suund ja otstarbekas valgustuse uuendamise esimene etapp. ES-i osade töörežiimide täpne analüüs näitab, et esimesel etapil on mõistlik uuendada trepikodade valgustust. See asub büroo-osas, kuid on ööpäevaringses kasutuses.

Ülalkirjeldatud analüüs on koostatud hoone ehitusperioodi maksumuse ja seadmete töörežiimi lihtsate andmete alusel. Tasuvusarvutuse jaoks on vaja põhjalikumalt kirjeldada töörežiimi. Üks võimalik variant on esitatud artiklis (Saikovski 2011, tabel 4).

Elektrisüsteemi majanduslike parameetrite arvutuse jaoks on otstarbekas arvestada ainult oluliselt muutuvaid ES-i osi (nt tava- ja uuendatud valgustuse maksumus). Kilpide või juhtmestiku maksumust ei ole otstarbekas üksikasjalikult arvutada, kuna nende maksumus uuenduse käigus oluliselt ei muutu.

Hoone ES-i parendamise draiverite ja antidraiverite fikseerimine loob võimaluse osadest uuendustest loobuda, kui nende kasutamine ei too kaasa positiivset mõju või on seotud liiga pika tasuvusperioodiga.

## **2. Hoone eripärad, millega tuleb arvestada taastuvate energiaallikate kasutamise korral**

### **2.1 Asukoha ja hoone ehitusparameetrite analüüs**

Analoogiliselt tavahoone elektrisüsteemi parendamise draiveritele/antidraiveritele on võimalik nimetada draiveriks/antidraiveriks ka taastuvate energiaallikate kasutamise korral mõned päikesest energia tootmise süsteemi (PS) või hoone parameetrid juhul, kui nad toovad kaasa kas positiivse või negatiivse mõju.

Lähtudes Euroopa riikide interaktiivsest päikeseenergia-ressursside ja fotomeetriliste võimaluste süsteemist (PVGIS), on tabelis 1 esitatud andmed päikesest energia tootmise 1 kW tootlikkuse kohta Eesti erinevates paikades. Tabelist nähtub, et hoone asukoht Kuresaares, Valgas või Haapsalus on kindel draiver taastuvate energiaallikate kasutamiseks.

Tabel 1. PS-i patarei 1 kW tootlikkus Eestimaa erinevates paikades, kWh aastas  
 Tabel 1. Various 1 kW battery productivity for different Estonian places, kWh per year

	Tallinn (Kesklinn)	TTÜ	Põhja-Eesti		Virumaa			Lõuna-Eesti	
			Loksa	Võsu	Rakvere	Jõhvi	Narva	Mustvee	Tartu
Tootlikkus aastas KWh 1kW PS-i									
	<b>921</b>	<b>964</b>	<b>912</b>	905	856	886	890	864	849
	Pirita	Iru küla	Pärnu	Haapsalu	Kuressaare	Kärdla	Padise	Valga	Viljandi
	<b>974</b>	<b>919</b>	<b>935</b>	<b>1030</b>	<b>1050</b>	<b>1020</b>	<b>943</b>	<b>1310</b>	891

Lisaks ülaltoodud andmetele tuleb eelneval etapil hinnata hoone paiknemist päikese liikumise suunas. Iru külas oleva objekti PS-i andmed artiklis (Saikovski 2014) näitavad, et päikesest energia tootmise süsteemi paigaldamiseks sobib väga hästi lõunapoolne suund. Täpsem paigutus objektil oli hoone lõunapoolisel küljel 70° nurga all horisondi suhtes suunaga 10° lõunast ida poole. Kirjeldatud hoone asukoht tagab 99% PS-i maksimumvõimsuse ja 97% tootlikkuse (PVGIS-tootlikkus) saavutamise.

Sarnaseid infosüsteeme on olemas ka teiste taastuvenergialiikide jaoks, nt Tartu ülikooli Eesti tuuleatlas.

## 2.2. Erinevate parameetrite mõju tootlikkusele ja tasuvusele

PS paigaldatakse katusele tihti minimaalse kaldenurgaga (10–15 kraadi). Artiklis (Saikovski 2014) on esitatud Iru külas asuva hoone (lõunapoolne orientatsioon ja paneelid seinapeal) ning Pärnu Agal Kinnisarvade objektide võrdluse tulemused (paneelid katusel, väike kaldenurk).

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

Pärnu objektil on ka suurepärased tulemused tootlikkuse osas – 139 717 kWh aastas. See on isegi parem kui PVGIS-i objekti tootlikkus (130 900).

Maksimumvõimsuste võrdlus näitas, et paneelide katusele paigaldamine ei sobi hea maksimumvõimsuse saavutamiseks. Pärnu objekti esimese aasta maksimumvõimsus oli 123 kW (nimivõimsus 140 kW). Tasuvusaja lühendamiseks on aga tootlikkus kõige olulisem.

TEA kasutamise üksikasjalik algoritm ja ülaltoodud kahe objekti PS-i töötamise tulemused sisalduvad käesoleva kogumiku teises Valeri Saikovski artiklis (Saikovski 2015).

### **3. Hoone elektrisüsteemi uuendustegevuse arendamine**

#### **3.1 Tulemuste süstematiseerimise ja kasutamise põhimõte. Realiseeritud uuenduste tulemuste andmebaasi loomine**

Valeri Saikovski TEUKi konverentside artiklites 2011–2015 on hoonete elektrisüsteemide uuendamise katsetused püütud süstematiseerida – elektrisüsteemi mudelid, tehniliste ja majanduslike parameetrite arvutusmeetodid ning uuenduste realiseerimise algoritmid. See loob võimaluse kasutada ühe hoone arvutustulemusi ning prognoosida sarnaste hoonete jaoks ka konkreetse uuenduse tulemusi vastavalt hoone tüübile. Hoonete ja uuenduste klassifikatsioon on leitav artiklites (Saikovski ja Teemets 2012) ning (Saikovski 2014).

Käesolevas artiklis kirjeldatud hoone elektrisüsteemi uuenduste draiverite uuringut oleks võimalik perspektiivis kasutada mitte ainult konkreetse hoone jaoks, vaid kõiki-des sama tüüpi hoonetes. See on universaalne meetod hoone ES-i uuenduste tulemuste vormistamiseks ja analüüsimiseks, mis loob võimaluse tulevikus alustada uuenduste planeerimist varem uuendatud sarnaste hoonete tulemuste läbivaatamisest.

#### **3.2 Arvutusprogrammi koostamise kirjeldus ja kasutamise võimalused hoone elektrisüsteemi uuendamisel**

Pärast universaalse kirjelduse koostamist on võimalik kirjeldada ka seadmete töörežiimi. Elektrisüsteemi mudeli ja meie varasemates TEUK-i artiklites kirjeldatud arvutusmeetodite ning algoritmide abil saab moodustada arvutiprogrammi nurgakivi. Arvutiprogrammi loomise eesmärk on ühendada kõik hoone elektrisüsteemi olulised ning tehnilised ja majanduslikud parameetrid, et konkreetse hoone ES-i jaoks oleks võimalik arvutada iga uuenduse mõju. Arvutuste käigus võiks programm näidata elektrisüsteemi osade proportsioone ja draivereid, jälgida, et uuenduse tasuvusaeg ja maksumus ei üle-

taks mõistlikku piiri. Ka on võimalik aeg-ajalt täpsustada ja korrigeerida tariifide prognoose ja muid parameetreid (paigaldustööde ühikhind, elektriseadmete ja materjalide hinnad), mis oluliselt mõjutavad uuenduse maksumust ja tasuvust.

Nimetame selle elektriuuenduste kalkulaatoriks. Lihtsama variandi loodab Valeri Saikovski esitada oma doktoritöös aastal 2016.

## **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. Makroökoonoomika meetodite kohandamine hoone elektrisüsteemi uuenduste prognoosimisel. Prognoosimisprotsessi kirjeldus. Konkreetse elektripaigaldise uuenduse analüüs. – Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine, XV. Tartu 77–87.

Saikovski, V. 2014. Uuendused hoone elektrisüsteemis: mudel, klassifikatsioon ja kasutamise tulemuse prognoosimine. Päikesepaneelide kasutamine Nurmevälja Logistikakeskuses (80kW) ja Agal Kinnisvara tootmishoones (140 kW) – esmane analüüs. – Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine, XVI. Tartu, 67–79.

Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) – interaktiivne süsteem päikeseenergia ressurssidest ja fotomeetrilistest võimalustest Euroopa riikides. – Kättesaadav: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>.

OÜ EnergoGen esitatud andmed paigaldatud päikeseenergiasüsteemide kohta.

## **ELECTRICAL SYSTEM PARAMETERS SUITABLE FOR INNOVATIONS (DRIVERS). NEGATIVE NOTEWORTHY CHARACTERISTICS TO PAY ATTENTION TO TO AVOID INEFFICIENT PROFITABILITY AND UNSUITABLE TECHNICAL COLLATERAL EFFECT**

Valeri Saikovski, Raivo Teemets

This is a summary of research innovations for building's electrical systems, which contains proposals to easily calculate important parameters of a building, or to find traits, which positively affect the realisation of innovations (drivers). The article also describes the used drivers of renewable energy sources. Article contains proposals for use in the computing program developed by Valeri Saikovski's doctoral thesis.

# BIOENERGIA KASUTUS PÕLLUMAJANDUS- JA METSANDUSETTEVÕTETES INVESTEERINGUTOETUSE SAAJATE NÄITEL

Jaana Prants

Eesti Maaülikooli majandus- ja sotsiaalinstituut, Kreutzwaldi 1a, Tartu 51014

[jaana.prants@emu.ee](mailto:jaana.prants@emu.ee)

## **Annotatsioon**

Põllumajandus- ja metsandusettevõtjad pööravad üha enam tähelepanu energiakasutuse arengusuundadele ja keskkonnasõbralikuma energiatootmise võimalustele, et leida uusi väljundeid oma ettevõtte tootmisprotsessist tulenevate jäätmete kasutuseks ja efektiivsemaks energiakasutuseks.

Käesolev artikkel kirjeldab maaeluministeeriumi tellitud uuringu „Energiakasutus ja bioenergia osakaalu muutused investeeringutoetuse saajate näitel“ (Prants 2015) põhitulemusi. Uuringu eesmärgiks oli hinnata Eesti maaelu arengukava 2007–2013 (MAK 2007–2013) meetmete 1.4.3. (investeeringud bioenergia tootmisesse) ja 1.5.2. (metsandussaadustele lisandväärtuse andmine) toetuse saajate biomassi tootmise ja töötlemise ahelat, energiakasutuse struktuuri ja selle muutust bioenergia ja biomassi tootmisel ning kasutamisel.

Märksõnad: biomass, bioenergia, keskkond, energia säästmine, investeeringud.

## **Sissejuhatus**

Euroopa Parlamendi põllumajanduse ja maaelu arengu komisjoni hinnangul suurenesid põllumajandusliku tootmise energiakulud (kütus, gaas, elekter) aastatel 2000–2010 umbkaudu 60%, samas kui tootjahinnad kasvasid ainult 25%. Selleks, et põllumajandusettevõtte oleks majanduslikult elujõuline, soovitatakse säästa energiat hoonetes, põllumajandustegevuses ja transpordis ning investeerida taastuvenergia tootmisse. (Põllumajanduslike sisendite.. 2011)

MAK 2007–2013 raames pöörati põllu- ja metsamajanduse konkurentsivõime tõstmisel senisest enam tähelepanu kõrgema lisandväärtusega toodangu osakaalu suurendamisele läbi tootearenduse ja stabiilse kvaliteedi tagamise (näiteks investeeringud taastuvate mittetoidutoorainete (sh bioenergia toorainete) ning omatoodetud toorainest bioenergia tootmine). Toetati ka teaduse ja tootmis- ning töötlemissektori koostööd uute turujõuliste toodete (sh bioenergia) arendamisel, et hoogustada uute tehnoloogiate levi-



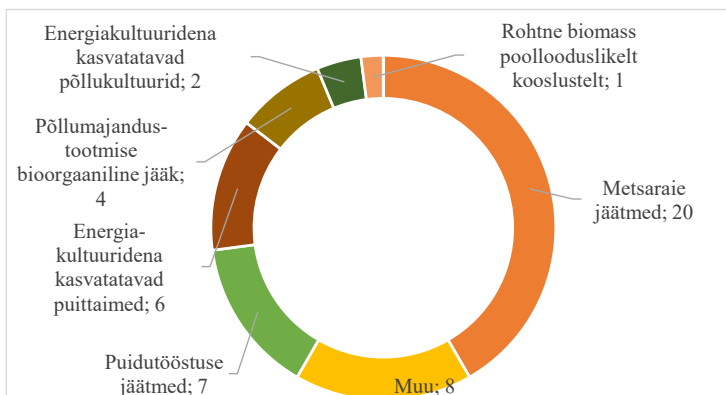
kut, taastuvate energiaallikate kasutamist ning eelkõige uute toodete ja säästlikumate tehnoloogiate rakendamist nii põllu- kui metsamajandussaaduste tootmisahelas. (Eesti maaelu arengukava 2007–2013). Põllumajandusettevõtetes taastuenergia tootmise ja kasutamise osakaalu suurendamisele aitasid kaasa MAK 2007–2013 meetmed 1.4.3. ja 1.5.2., mille raames on PRIA 31.12.2014 seisuga bioenergia valdkonna edendamiseks ettevõtjatele välja maksnud 13,6 mln eurot. Meetme 1.4.3. raames välja makstud 8,9 mln eurost suurem osa (52%) maksti energiakultuuri kasvatamiseks, biomassi töötlemiseks ja bioenergia tootmiseks vajaliku masina või seadme soetamiseks. Meetme 1.5.2. raames välja makstud 4,7 mln eurost suurem osa (47%) kasutati biokütuste tootmiseks vajalike masinate ja seadmete ostmiseks.

### Uuringu meetodika ja vastajate üldiseloomustus

Biomassi ja -energia tootmisahela hetkeolukorra ning energia kasutamise võimaluste ja takistuste kaardistamiseks korraldati meetmetest 1.4.3. ja 1.5.2. toetust saanud 117 ettevõtja seas veebiküsitlus. Täidetud ankeedi tagastas 30 küsitletut (26%), kellest 16 tegutsesid metsanduse ja 14 põllumajanduse valdkonnas. Küsitletutest olid 56% osaühingud, 32% füüsilisest isikust ettevõtjad ja 12% aktsiaseltsid. Maakondade lõikes oli enamik ettevõtjaid pärit Tartu, Viljandi, Harju ja Võru maakonnast.

### Biomassi ressurss ja kasutamine

Bioenergia tootmisel hinnatakse perspektiivsemaks ressursiliigiks metsaraie ning puidutööstuse jäätmeid, sest neid on võimalik kasutada energia tootmiseks peaaegu 100%-liselt ilma lisatöötlemiseta, nad ei nõua liiga suuri lisakulutusi ning nende kasutamise osas on Eestis olemas ka kogemused (Prants 2011). Küsitletud ettevõtjad on biomassina varunud peamiselt metsaraie ja puidutööstuse jäätmeid (joonis 1).



Joonis 1. Ettevõtjate varutud biomass liikide lõikes, vastuste arv (n=48)

Figure 1. Types of biomass stockpiled by respondents, number of responses (n=48)

Põllumajandusettevõtjad varusid biomassi eelkõige tulenevalt oma ettevõtte tootmisprotsessist (84% ettevõtjaid) ning omatarbeks (73% ettevõtjaid). Metsandusettevõtted eelkõige edasimüügi eesmärgil (83% ettevõtjaid), kuid ka oma ettevõtte tootmisprotsessist tulenevalt (61% ettevõtjaid).

Vastajate hinnangul mõjutab enim biomassi varumise ja bioenergia tootmise tasuvust transpordi kulu ja biomassi toorme hind. Mida kõrgemaks muutuvad transpordi ja toorme kulud, seda vähemtasuvaks bioenergia tootmine ja kasutamine muutub. Biomassi liikidest olid ettevõtjad sunnitud kõige kaugemalt nii omatarbeks kui ka edasimüügiks varuma puidutööstuse jäätmeid. Kõige lähemalt varuti põllumajandustootmise bioorgaanilisi jäätmeid (sõnnik, põhk) (tabel 1).

*Tabel 1. Ettevõtjate hinnanguil kaugeim koht biomassi varumiseks, keskmiselt km*  
*Table 1. The farthest place for procuring biomass, average in km*

<b>Biomassi liik</b>	<b>Omatarbeks</b>	<b>Edasimüügiks</b>
Energiakultuuridena kasvatatavad puittaimed	25	74
Energiakultuuridena kasvatatavad põllukultuurid	43	50
Rohtne biomass poollooduslikelt kooslustelt	15	-
Metsaraie jäätmed	38	73
Puidutööstuse jäätmed	61	91
Biolagunevad tööstusjäätmed	-	-
Biolagunevad olmejäätmed	-	-
Põllumajandustootmise bioorgaaniline jääk	8	0,2
<b>Kokku keskmine</b>	<b>32</b>	<b>58</b>

### **Bioenergia tootmine ja kasutamine**

Bioenergia tootmist ja kasutamist mõjutavad mitmed majanduslikud, sotsiaalsed, poliitilised ja ökoloogilised aspektid. Vastanud ettevõtjad lähtusid bioenergia investeerimiste kaalumisel eelkõige majanduslikest aspektidest, nagu konkurentsivõime säilitamine või selle parandamine ja tootmiskulude vähendamine. Oluline oli ka olla energeetiliselt sõltumatu, tootes ise energiat, ja elavdada uusi töökohti luues maapiirkonnas majandustegevust. Mõnevõrra vähem tähtsaks peeti ökoloogilisi ja poliitilisi aspekte. Ligi poolte (48%) ettevõtjate hinnangul sõltus bioenergia tootmise ja kasutamise investeerimise otsus ka sellest, et bioenergia arendamist eelistatakse teiste taastuvate energialiikide arendamisele, ning poolte (50%) ettevõtjate hinnangul seisnes investeerimise põhjus riigipoolsete toetusvõimaluse kasutamises.

Peamiseks biomassi muundamise viisiks märgiti biomassi põletamist biosoojuse tootmiseks (tabel 2). Ettevõtjate hinnangul oli nimetatud tehnoloogia madalama investeringute mahukusega ning suhteliselt lühikese tasuvusega, võrreldes teiste tehnoloogiatega. Seda kasutatakse peamiselt ka seetõttu, et antud tehnoloogia on kättesaadav ning selle kasutamiseks on olemas piisavad kogemused ning teadmised (Prants 2011).

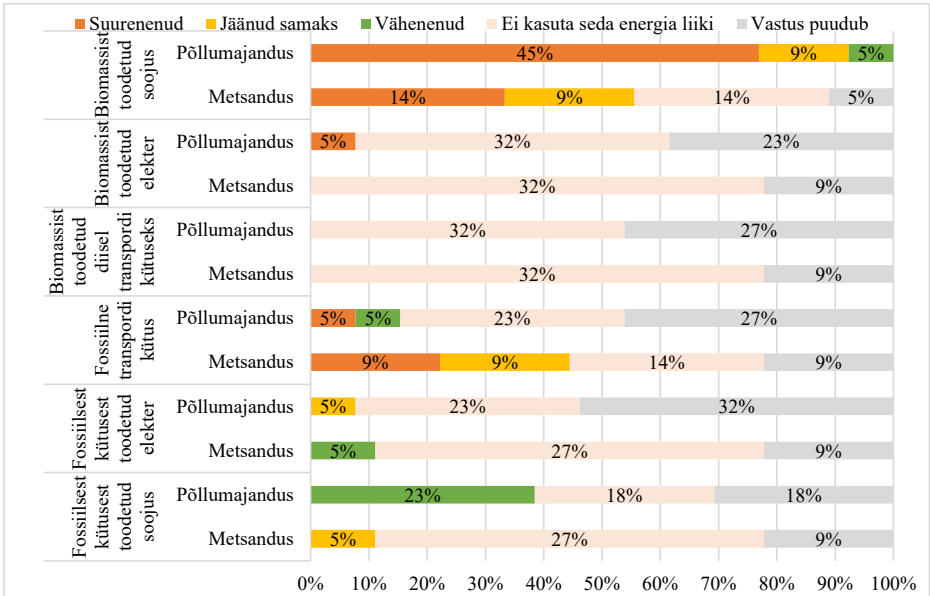
*Tabel 2. Ettevõtjate peamine biomassi bioenergiaks muundamise viis, vastanute osakaal tegevusalade lõikes, %*

*Table 2. Main methods for converting biomass to bionergy, share of respondents by enterprise type, %*

<b>Energiaks muundamise viis</b>	<b>Metsandus</b>	<b>Põllumajandus</b>
Anaeroobne kääritamine (biogaas)	-	5%
Põletamine (soojus)	27%	50%
Põletamine (soojuse ja elektri koostootmine)	9%	-
Esterdamine (biodiiseli)	-	-
Fermentatsioon (bioetanool)	5%	-
Pürolüüs (bioõli, söegaas)	5%	-

Ettevõtjate hinnangul oli nende ettevõtetes viimase viie aasta jooksul fossiilsest kütusest toodetud energia tarve vähenenud või ei kasutatud seda oma tootmisprotsessides üldse. Märkimisväärselt erinesid teistest küsimustikule vastajatest põllumajanduse tegevusala ettevõtjad, kelle puhul biomassist toodetud soojusenergia tarbe osakaal suurenes ning fossiilsest kütusest toodetud soojusenergia tarve vähenes. See oli ka oodatav tulemus, kuna enamik küsimustikule vastajaid kasutasid just biomassi põletamise viisi soojusenergia tootmiseks. Metsandusettevõtjatel suurenes bioenergia kasutusele võtuga lisaks biomassist toodetud soojusenergia tarbele ka fossiilse transpordikütuse kasutamine toodangu ühiku kohta (joonis 2). Samas ei näe ettevõtjad tulevikus märkimisväärtset bioenergia osatähtsuse suurenemist kogu tarbitavas energias.

Takistused bioenergia tootmisel ja kasutamisel on seotud mitmete aspektidega, nagu seadus, poliitilised vaated, finantsiline teostatavus, tehnoloogiline innovatsioon ning energiakultuuri hinna ja energia hinna suhe (McCromick 2007). Vastajate hinnangul takistavad nende ettevõtetes biomassi varumist oluliselt selle liigne kulukus, biomassi ebapiisav turg ning biomassi ladustamise võimaluste puudumine. Biomassi varumise kulu võib seisneda nii biomassi transpordis kui ka ladustamises. Metsandusettevõtjaid takistas biomassi varumisel oluliselt biomassi varumise kulu. Põllumajandusettevõtjaid takistas biomassi varumisel pigem biomassi ladustamise võimaluste puudumine ning biomassi pakkumise hooajalisus.



Joonis 2. Ettevõtjate hinnangud energia tarbimisele tootmisühiku kohta bioenergia tarbimisel, %  
 Figure 2. Estimates on changes in energy consumption per unit of production in bioenergy consumption, %

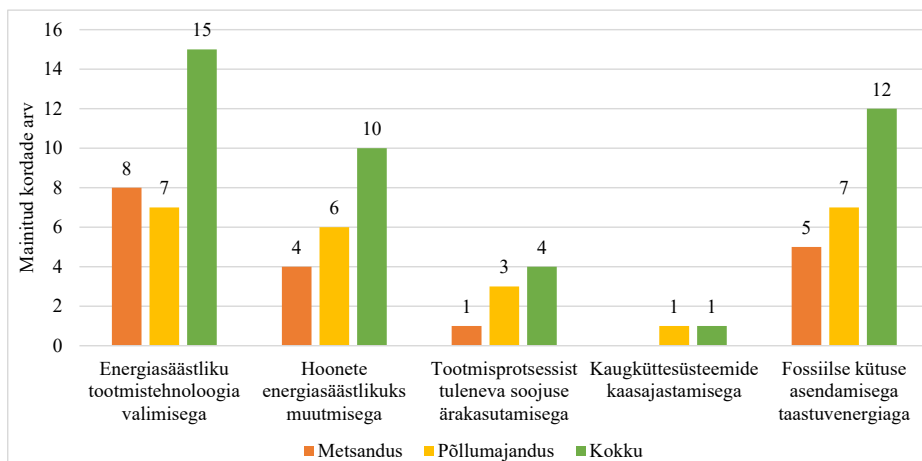
Mitmete probleemide vältimiseks on oluline ettevõtjatevaheline koostöö. Suurem osa vastajaid teevad biomassi varumisel koostööd bioenergia tootjatega ja sarnase valdkonnaga ettevõtjatega. Koostöö oli mõnevõrra olulisem põllumajandusettevõtjatele, aitades neil muuhulgas oluliselt kokku hoida ka tootmisega seotud kulusid.

Küsimustikule vastanud ettevõtjate hinnangud majanduslike näitajate muutuste osas viimase viie aasta jooksul (perioodil 2009–2014) olid üsna lünklikud, kusjuures tegu oli perioodiga, mil ettevõtjad seoses toetusega biomassi edasimüügiks ja/või omatarbeks varusid ning omakorda sellest bioenergiat edasimüügiks ja/või omatarbeks tootsid. See-ga võib öelda, et majanduslike näitajate muutuseid bioenergia tootmisel ja kasutamisel oli ettevõtjatel keeruline hinnata. Olemasolevate hinnangute põhjal nähtus, et tegevusalade lõikes suurenesid põllumajandusettevõtjatel (majandusnäitajate muutusele võisid mõju avaldada ka muud aspektid) seoses bioenergia tootmise ja kasutamisega muuhulgas peamiselt laenukohustused, põllumajandusmaa suurus ja töötajate arv. Oluliselt oli vähenenud fossiilsest kütusest toodetud soojuse kulu. Metsandusettevõtjate hinnangud eristusid põllumajandusettevõtjate hinnangutest selle poolest, et pigem oli suurenenud fossiilse transpordikütuse kulu ja vähenenud fossiilsest kütusest toodetud elektrikulu. Samas oli põllumajandusettevõtjatel mõnevõrra raskem viimase kulu muutust vaadeldaval perioodil hinnata.

Bioenergiatoodete kogu elutsükli keskseks majanduslikuks probleemiks on lõpptoodangu kõrge omahind, mis on siiani olnud peamiseks takistuseks biokütuste laialdasel tööstuslikul tootmisel ja kasutuselevõtul (Biomassi tehnoloogiauuringud.. 2008). Ka vastanud ettevõtjate hinnangul sõltub bioenergia tootmise ja kasutamise tasuvus peamiselt bioenergia madalast omahinnast. Kui põllumajandusettevõtjatel sõltus bioenergia tootmise ja kasutamise tasuvus pigem bioenergia madalast omahinnast ja biomassi väärindamisest ning selle kvaliteedist, siis metsandusettevõtjate hinnangul mõjutas tasuvust rohkemal määral tootmise maht ja tööjõu efektiivsus.

### Keskkonna ja energia säästmine

Energiakasutuse tõhustamine põllumajandus- ja metsandus(sh puidutöötlemis)ettevõtete tasandil on kasvav trend, arvestades võimalust, et ettevõtjad saavad oma tootmisteguvust ise energiaga (bioenergiaga) varustada ja viimast ka säästa. Küsitlusele vastanud ettevõtjad olid oma ettevõtetes energiakasutust tõhustanud peamiselt energiasäästliku tehnoloogia valimisega. Metsandusettevõtjad rõhutasid peamiselt energiasäästliku tehnoloogia valimist ning kõige vähem või (või üldse mitte) kasutati selliseid võimalusi, nagu tootmisprotsessist tuleneva soojuse ärakasutamine oma tootmisprotsessis ning kaugküttesüsteemide kaasajastamine. Põllumajandusettevõtjad kasutasid lisaks energiasäästliku tehnoloogia valimisele ka fossiilse kütuse asendamist taastuvenergiaga. (Joonis 3)



Joonis 3. Ettevõtjate teostatud tegevused energiakasutuse tõhustamiseks tegevusalade lõikes, vastuste arv n=42

Figure 3. Activities carried out to improve energy efficiency in enterprises, number of responses n=42

Tulevikus nähti suurimat potentsiaali bioenergia kasutamises ning metsanduses ka päikeseenergiast. Kõige vähem potentsiaalseks peeti tuuleenergiat ja hüdroenergiat.

Taastuvate energiaallikate (sh bioenergia) ja vastavate tehnoloogiate kasutuselevõtt ning investeringud nõuavad reeglina suuri rahalisi väljaminekuid. Ettevõtjad pidasid teistesse taastuvenergiaallika liikidesse investeerimisel takistavateks teguriteks peamiselt investeringute liigset mahukust ning liiga pikka tasuvusaega. Metsandusettevõtjad tunnetasid ka, et riik on loobunud senisest aktiivsest taastuvenergiapoliitikast, mis omakorda pärsib investeringuid teistesse taastuvenergialiikide kasutamisse. Kõige vähem takistavad ettevõtjate hinnangul investeringuid teiste taastuvenergiaallika liikide kasutamiseks koostööst tingitud probleemid ning tehnoloogia kättesaadavus.

### **Kokkuvõte**

Seni on ettevõtjad biomassina varunud pigem edasimüügi eesmärgil peamiselt metsaraie ja puidutööstuse jäätmeid, mis tuleneb nende ettevõtte tootmisprotsessist. Biomassi varumise ja bioenergia tootmise tasuvust mõjutas ettevõtjate hinnangul enim transpordi kulu ja biomassi toorme hind.

Küsimustikule vastanud ettevõtjate puhul tulenes bioenergiasse investeerimise otsus esmalt majanduslikest kaalutlustest, vähem mõju oli keskkonnavalgetest kaalutlustest. Peamiseks biomassi bioenergiaks muundamise viisiks kasutati biomassi põletamist biosoojuse tootmiseks, mis valiti lähtuvalt olemasolevast biomassi ressursist.

Põllumajandusettevõtjad varusid biomassi ja tootsid sellest bioenergiat peamiselt omatarbeks ning metsanduse tegevusala ettevõtjad varusid biomassi pigem edasimüügiks või siis varutud biomassist toodetud bioenergiat pigem edasimüügiks. Märkimisväärset bioenergia osatähtsuse suurenemist kogu tarbitavast energiast ettevõtjad ei prognoosinud.

Ettevõtjate hinnangul takistavad biomassi varumist selle liigne kulukus, biomassi ebaabiisav turg ning biomassi ladustamise võimaluste puudumine. Samas teeb suurem osa vastanud ettevõtjatest koostööd, mis aitab oluliselt kokku hoida tootmisega seotud kulusid.

Keskkonna ja energia säästmise osas pidasid ettevõtjad mõnevõrra suurema potentsiaaliga energiakasutuse tõhustamise viisideks energiasäästliku tootmistehnoloogia valimist ning fossiilse kütuse asendamist taastuvenergiaga. Enim potentsiaali nägid

ettevõtjad oma ettevõttes tootmise seisukohalt lähima viie aasta jooksul bioenergias, metsandusettevõtjad ka päikeseenergias. Tuule- ja hüdroenergia potentsiaali hinnati madalaks. Teistesse taastuvenergiaallika liikidesse investeerimist takistavateks teguriteks olid ettevõtjate hinnangul peamiselt investeeringute liigne mahukus ning liiga pikk investeeringu tasuvusaeg.

### **Kasutatud kirjandus**

- V. Vares, V.; Kask, Ü.; Kruus, R.; Ehrlich, Ü.; Roos, I.; Habicht, M.; Nurk, A.; Soosaar, S.; Poobus, A.; Kask, L.; Link, S.; Lomunov, S. (koost). 2008. Biomassi tehnoloogiauuringud ja tehnoloogiate rakendamine Eestis. Projekti 2008. aasta lõpparuanne, lk 117.
- Põllumajandusministeerium. 2013. Eesti maaelu arengukava 2007–2013, lk 59–60.
- McCormick, K.; Kaberger, T. 2007. Key barriers for bioenergy in Europe: Economic conditions, know-how and institutional capacity, and supply chain co-ordination. – Biomass and Bioenergy, pp. 446-449.
- Prants, J. 2011. Bioenergia tootmise ja kasutamise võimalused ning takistused Eestis. Magistritöö. Eesti Maaülikooli majandus- ja sotsiaalinstituut. Lk 46.
- Põllumajanduslike sisendite tarneahel: struktuur ja mõjud. Põllumajanduse ja maaelu arengu komisjon, 2011/2114(INI).

## **BIOENERGY USAGE IN AGRICULTURAL AND FORESTRY ENTERPRISES: THE EXAMPLE OF BENEFICIARIES OF INVESTMENT SUPPORTS**

Jaana Prants

The paper presents the main results from the study „Investment support beneficiaries’ energy use and share of bioenergy“. The study was carried out to evaluate biomass production and processing chain, and the change in the structure of energy use and bioenergy production and use of biomass of beneficiaries of the Estonian Rural Development Plan 2007-2013 (RDP 2007-2013) measures 1.4.3 (investments in bioenergy production) and 1.5.2 (adding value to forestry products).

# MILLISEKS BIOKÜTUSEKS VÄÄRINDADA LOODUSKAITSELISTEL EESMÄRKIDEL HOOLDATUD LAMMINIITUDE ROHTSET BIOMASSI?

Indrek Melts<sup>1</sup>, Marti Tutt<sup>2</sup>, Katrin Heinsoo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Eesti Maaülikooli Põllumajandus- ja keskkonnainstituut, Kreutzwaldi 5, 51014 Tartu  
e-post: indrek.melts@emu.ee

<sup>2</sup>Eesti Maaülikooli Tehnikainstituut, Kreutzwaldi 56, 51014 Tartu

## Annotatsioon

Käesoleva töö eesmärgiks oli välja selgitada looduskaitselistel eesmärkidel hooldatavate lamminiitude rohtse biomassi energeetiline potentsiaal biometaaniks ja bioetanooliks väärindamisel. Eesti lamminiitude rohtse biomassi kütteväärtus on 18,4 MJ kg<sup>-1</sup> ja seega on põletamisel saadav maksimaalne energiahulk 6,6 tonni kuiva heina puhul hektaril 121 GJ. Laboritingimustes toodeti lamminiidu rohtsest biomassist metaani 269 l IN kg<sup>-1</sup> orgaanilise aine kohta ja etanooli 115,7 g kg<sup>-1</sup> ehk energia potentsiaal oli vastavalt 66 GJ ha<sup>-1</sup> ja 20 GJ ha<sup>-1</sup>. Seega on biometaanii tootmisel võimalik kätte saada 54% teoreetilisest võimalikust põletamisel saadavast energiast. Bioetanooli puhul on vastav efektiivsus alla 20%. Tegelikult energiatootmise kasutegurit hindamiseks mõlemal juhul on vaja täpsemalt hinnata erinevateks konversioonimeetoditeks kuluvat energiahulka. Saadud tulemused on oluliseks aluseks lamminiitude rohtsest biomassist biokütuste tootmise energeetilise efektiivsuse ja keskkonnasõbralikkuse hindamisel.

Märksõnad: bioenergia, energeetiline potentsiaal, etanool, metaan, poollooduslikud rohumaad.

## Sissejuhatus

Taastuenergia direktiiviga 2009/28/EÜ (Euroopa Komisjon 2009) on aastaks 2020 seatud eesmärgiks tõsta biokütuste osakaalu transpordisektoris 10%. Eestis on selle eesmärgi täitmiseks plaanis suurendada biometaanii ja taastuvelektri kasutust (Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium 2013). Samas toodetakse maailmas laialdasemalt ka bioetanooli (International Energy Agency 2010), kasutades tootmisefektiivsust tõstva eeltötlusmeetodina biomassi aurlõhkamist (Ballesteros jt 2006). Kõrge temperatuur koos plahvatusliku rõhulangetusega lõhub taimerakkude struktuuri ning muudab tselluloosi kiud paremini mikroobidele kättesaadavaks (Chen ja Zhang 2012).

Üks võimalikest kasutamata bioenergia ressursidest on poollooduslike rohumaade biomass (Tonn jt 2010; Corton jt 2013; Melts 2014; Tutt 2015). Hinnanguliselt on käes-



oleval ajal Eestis nende hulgas kõige rohkem lamminiite, 26 000 ha (Klein ja Hermet 2012), mis on Eesti tingimustes suurima biomassi ja -energia potentsiaaliga (Melts 2014). Lisaks poolloodusliku rohumaa tüübile sõltub nende biomass ka regionaalsetest tingimustest (Steubing jt 2010; Van Meerbeek jt 2015). Biomassist realselt kättesaadav energiahulk sõltub lisaks biomassi omadustele ka kasutatavast konversioonitehnoloogiast (Pakarinen jt 2011; Melts 2014; Van Meerbeek jt 2015).

Käesoleva töö peamine eesmärk on välja selgitada lamminiitude rohtse biomassi energetiline potentsiaal biometaaniks ja bioetanooliks väärdamisel.

### **Materjal ja meetodika**

Lamminiidu rohtse biomassi ja energetilise potentsiaali määramiseks viidi välitööd läbi juuli esimesel poolel, järgides looduskaitse piiranguid ja imiteerides tüüpilist koristusaega: 2007. aastal üheksal, 2008. aastal viiel ja 2010. aastal neljal lamminiidul nii Matsalu ja Soomaa rahvuspargis kui Alam-Pedja looduskaitsealal. Piki transekti asetsevatest prooviringidest ( $n=264$ ) lõigati rohtne biomass kääridega võimalikult maapinna lähedalt ja kogutud biomassi proovid kuivatati kuivatuskapis temperatuuril 80 °C 48 tundi. Lamminiidu rohtse biomassi kütteväärtuse aluseks on Meltsi (2014) avaldatud andmed.

Rohtse biomassi metaani saagise määramiseks viidi EMÜ Bio- ja Keskkonnakeemia laboris läbi biokeemilise metaanitootlikkuse potentsiaali (BMP) eksperiment (Melts 2014). Laboris segati kokku võrdses koguses kahe Alam-Pedja looduskaitseala lamminiidu biomass, mis oli kogutud juulikuus 2010. aastal, ning saadud segust võeti 50 g proov, mida kuivatati kuivatuskapis temperatuuril 60 °C ja hoiustati hiljem paberkotis toatemperatuuril. Ligikaudu 0,3 g sellest ca 1 mm suurusteks osadeks jahvatatud biomassist ( $n=6$ ) lisati destilleeritud vee (50 ml) ja inokulaadi (150 ml) segusse. Inokulaat pärines Tallinna Vee Paljassaare reoveepuhastusjaama kääritist. Hermeetiliselt suletud proovipudeleid (575 ml) hoiustati 36 °C temperatuuri juures 46 päeva isothermilises kapis ning gaasi mahtu mõõdeti kümme korda pärast igakordset pudelites rõhu mõõtmist ja substraadi käsitsi segamist. Gaasi koostise analüüsimiseks kasutati gaaskromatograafi. Metaani energiasaagise arvutamisel kasutati metaani kütteväärtusena 39,7 MJ m<sup>-3</sup>.

Rohtse biomassi etanooli saagise määramiseks koguti 2012. aastal rohtse biomassi proovid Emajõe lamminiidult Tartumaal (Tutt 2015). Proovid kuivatati ja jahvatati osakeste suuruseni 1–3 mm ning hoiustati toatemperatuuril. Aurlõhkamise eeltötluseks

võeti 900 g eelnevalt kuivatatud ja jahvatatud biomassi, mida niisutati enne reaktorisse sisestamist 900 g destilleeritud veega. Aurlõhkamine toimus temperatuuril 200 °C ning inkubatsioonijaga 10–30 minutit. Aurlõhkamisele järgnes hüdrolüüs, milleks kasutati ensüümkompleksi Accellerase 1500. Ensüümlahust lisati proovidele suhtega 0,3 ml grammi biomassi kuivaine kohta. Hüdrolüüsilahuse kuivainesisaldus oli 10% ning pH=5. Hüdrolüüsi protsess toimus loksutil pideval segamisel kiirusega 2,5 p s<sup>-1</sup>, temperatuuril 50 °C ja kestusega 72 h. Fermentatsioon toimus üheliitrites klaaspuudelites, mis suleti pealt kääritud storuga. Fermentatsioonilahuse kogus kääritusanumas oli 500 ml ja pH=4,6. Fermentatsioonilahusele lisati 2 ml CaCl<sub>2</sub>•2H<sub>2</sub>O, 2 ml KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 2 ml MgSO<sub>4</sub>•7H<sub>2</sub>O, 0,44 g (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> ja 2 ml pärmilahust *Saccharomyces cerevisiae*. Fermentatsioon toimus temperatuuril 30 °C kestusega 120 h. Sahhariidide ja etanooli kontsentratsioone määrati proovides kõrgsurve-vedelikkromatograafiaga. Energia saagise arvutamisel kasutati etanooli kütteväärtusena 29,7 MJ kg<sup>-1</sup>.

### Tulemused ja arutelu

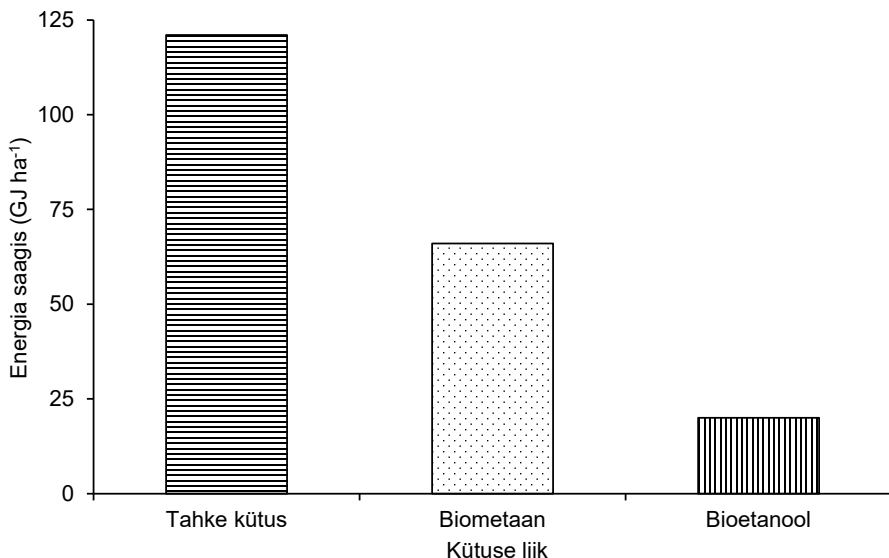
Lamminiidu keskmine biomassi hulk hektarilt on 6,6 tonni. Suur saagikus lamminiidul on tingitud suuremast toitainete sisaldusest alluviaalsetes setetes ja ka konkreetsetest niidul kasvavatest funktsionaalsetest gruppidest. Sarnast biomassi hulka on saanud Eesti pillirooga (*Phragmites australis*) domineerival rannaniidul (Sammul jt 2012). Uuritavate lamminiitude rohtse biomassi potentsiaal varieerus (standardviga ±0,2) ja seega tuleb konkreetse ala energeetilise potentsiaali täpsemaks hindamiseks teha kohapealseid mõõtmisi.

Lamminiidu rohtse biomassi metaani saagis oli ligikaudu 270 l<sub>N</sub> kg<sup>-1</sup> orgaanilise aine kohta ning sellest rohkem kui 50% toodeti juba eksperimendi esimese nädala jooksul ja 90% oli toodetud kolmanda nädala lõpuks. Selline metaani saagis on küll väiksem kui teistel poollooduslike rohumaal tüüpidel (Melts jt 2013), mille üheks põhjuseks võib olla rohumaal taimestiku erinev liigiline koosseis (Herrmann jt 2014; Melts jt 2014). Lisaks erinevustele taimeliikides mõjutab metaanipotentsiaali biomassi niitmisaeg (Herrmann jt 2014). Mõlemad nimetatud faktorid võivad olla ka teineteisest sõltuvad.

Antud katsetingimustes saadi lamminiidu rohtse biomassi keskmiseks etanooli saagiseks 115,7 g kg<sup>-1</sup> biomassi kuivaine kohta. Etanooli saagis sõltub nii kasutatavast eeltötlusmeetodist ja tingimustest kui ka biomassi biokeemilisest koostisest. Võrreldes antud eksperimendis kasutatud geneetiliselt modifitseerimata pärmiga, mis suudab fermenteerida ainult tselluloosi lagundamisel vabanevaid C<sub>6</sub>-suhkruid, on võimalik toota kaks korda rohkem etanooli geneetiliselt muundatud pärmide ja bakterite abil, mis ka-

sutavad etanooli tootmiseks nii tselluloosi kui hemitselluloosi lagundamisel vabanenud suhkruid (Shleser 1994; Dwivedi jt 2009).

Lamminiidu rohtse biomassi keskmine kütteväärtus kalorimeetris oli 18,4 MJ kg<sup>-1</sup> ja seega teoreetiline energeetiline potentsiaal, arvestades lamminiidu keskmist produktiooni, on 120 GJ ha<sup>-1</sup> (joonis 1). See potentsiaal on küll väiksem kui suurema saagikusega energiakultuuridel (nt *Panicum virgatum* ja *Miscanthus* sp.) (McKendry 2002), aga on samas suurusjärgus sarnaste Saksamaa ja Belgia poollooduslike rohumaadega (Tonn jt 2010; Van Meerbeek jt 2015). Seega on lamminiitudel energeetilist potentsiaali, mida vajadusel väärintada biokütuseks.



Joonis 1. Lamminiidu rohtse biomassi erinevate kütuste energeetiline potentsiaal  
Figure 1. Energy potential of herbaceous biomass from floodplain meadow

Eksperimentaalselt toodetud metaani energiasaagiseks sama niiduproduktiooni puhul on ligikaudu 66 GJ ha<sup>-1</sup> (joonis 1) ehk 54% teoreetilisest potentsiaalist, mida oleks võimalik saada, kui seda biomassi oleks võimalik absoluutselt kuivana põletada. Etanooli energiasaagiseks on 20 GJ ha<sup>-1</sup> (joonis 1), sh energiakulu eeltöötusele, ja selle tehnoloogia konversiooni efektiivsus on alla 20%. Efektiivsuse suurendamine oleks ilmselt võimalik, kasutades etanooli tootmisel geneetiliselt modifitseeritud pärmi või baktereid, mis kasutavad paremini ära nii tselluloosi kui ka hemitselluloosi lagundamisel vabanenud suhkruid (ksüloos, arabiinoois jms) (Shleser 1994; Dwivedi et al. 2009), tõstes

seeläbi Eesti lamminiitude etanooli energiasaagise ligikaudu 40 GJ ha-1.

Lisaks erinevate konversioonimeetodite energiasaagisele on nende efektiivsuse hindamiseks kindlasti vaja teada ka tootmiskulusid. Lisaks stabiilsele niitmiskulule on põletustehnoloogia puhul suurimaks probleemiks heina kuivana säilitamine, biometaani tootmise puhul lisaks säilitamisele ka peenestamine. Bioetanooli puhul lisandub kulusid eeltötluse käigus veel rohkem. Samas on bioetanool paremini lõpptarbijani viidav kui biogaas või soojus. Seega tuleks enne konkreetse meetodi eelistamist kindlasti paremini määrata kõikide loetletud aspektide energeetiline hind. Kindlasti tuleks seda teha, imiteerides maksimaalselt reaalselt tootmissituatsiooni, sest mastaabiefekt hõlmab kindlasti nii reaalseid kulusid kui tulusid.

Eesti 26 000 ha lamminiidult oleks biometaani energeetiline teoreetiline saagis 1,7 PJ ning bioetanoolil 0,5 PJ. Arvestades, et 2013. aastal tarbiti Eestis kokku diislikütust ja autobensiini 810 000 tonni ehk ligikaudu 35 PJ (Eesti Statistika 2015), siis (arvestamata energiasisendit hooldamisele, transpordile, eeltötlusele vms) oleks võimalik teoreetiliselt lamminiidu rohtsest biomassist toodetud biometaaniga asendada ligikaudu 5% tarbitavast diislikütusest ja autobensiinist. Sellest samast ressursist toodetud bioetanooliga oleks osakaal 1,4%.

### **Kokkuvõte**

Lamminiidu suur biomassi hulk tagab pindalaühikul suure energiapotentsiaali (121 GJ ha-1), mida vajadusel biokütusteks väärindada. Metaani energiasaagiseks saadi rohkem kui 60 GJ ha-1 ehk konversioonimeetodi efektiivsuseks on rohkem kui 50% kogu soojushulgast. Etanooli energiasaagiseks aurlõhkamise eeltötlusega on 20 GJ ha-1 ehk efektiivsuseks on alla 20%. Teoreetiliselt on võimalik lamminiidu rohtsest biomassist toodetud biometaaniga asendada ligikaudu 5% või bioetanooliga 1,4% tarbitavatest transpordikütustest.

### **Tänuavaldused**

Teadusuuringuid on rahastatud Eesti Teadusfondi uurimistoetuse (ETF9375) ja HTM institutsionaalse uurimistoetuse (IUT 21-1) abil. Artikli valmimisele aitasid kaasa Tartu Ülikooli Sihtasutuse ja Baltic Agro stipendiumid noortele teadusdoktoritele.

### **Kasutatud kirjandus**

Ballesteros, I., Negro, M. J., Oliva, J.M., Cabanas, A., Manzanares, P., Ballesteros, M.

2006. Ethanol production from steam-explosion pretreated wheat straw. – *Applied Biochemistry and Biotechnology* 129–132, 496–508.
- Chen, H., Zhang, Y. 2012. Multiscale modeling of biomass pretreatment for optimization of steam explosion conditions, – *Chemical Engineering Science* 75, 177–182.
- Corton, J., Bühle, L., Wachendorf, M., Donnison, I. S., Fraser, M. D. 2013. Bioenergy as a biodiversity management tool and the potential of a mixed species feedstock for bioenergy production in Wales. – *Bioresource Technology* 129, 142–149.
- Dwivedi, P., Alavalapati, J. R. R., Lal, P. 2009. Cellulosic ethanol production in the United States: Conversion technologies, current production status, economics and emerging developments. – *Energy for Sustainable Development* 13, 174–182.
- Eesti Statistika. 2015. Statistika andmebaas: Majandus – Energeetika – Energia tarbimine ja tootmine. <http://pub.stat.ee/>.
- Euroopa Komisjon. 2009. Directive 2009/28/EC On the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC.2009.04.23. – *Official Journal of European Union* 140, 16–62.
- Herrmann, C., Prochnow, A., Heiermann, M., Idler, C. 2014. Biomass from landscape management of grassland used for biogas production: Effects of harvest date and silage additives on feedstock quality and methane yield. – *Grass and Forage Science* 69, 549–566.
- International Energy Agency. 2010. Medium Term Oil and Gas Markets 2010. OECD/IEA, Paris, 276 p. <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/mtogm2010.pdf>.
- Klein, L., Hermet, I. (toim.). 2012. Eesti looduse kaitse aastal 2011. Keskkonnateabe Keskus, Tallinn.
- Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium. 2013. Transpordi arengukava aastateks 2014–2020. Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, Tallinn. [https://www.mkm.ee/sites/default/files/transpordi\\_arengukava.pdf](https://www.mkm.ee/sites/default/files/transpordi_arengukava.pdf).
- McKendry, P. 2002. Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass. – *Bioresource Technology* 83, 37–46.
- Melts, I., Heinsoo, K., Nurk, L., Pärn, L. 2013. Comparison of two different bioenergy production options from late harvested biomass of Estonian semi-natural grasslands. – *Energy* 61, 6–12.
- Melts, I. 2014. Biomass from semi-natural grasslands for bioenergy. Doctoral thesis of Estonian University of Life Sciences, Tartu.
- Melts, I., Heinsoo, K., Ivask, M. 2014. Herbage production and chemical characteris-

- tics for bioenergy production by functional groups in semi-natural grasslands. – *Biomass and Bioenergy* 67, 160-166.
- Pakarinen, A., Majjala, P., Stoddard, F. L., Santanen, A., Tuomainen, P., Kymäläinen, M., Viikari, L. 2011. Evaluation of annual bioenergy crops in the boreal zone for biogas and ethanol production. – *Biomass and Bioenergy* 35, 3071–3078.
- Sammul, M., Kauer, K., Köster, T. 2012. Biomass accumulation during reed encroachment reduces efficiency of restoration of Baltic coastal grasslands. – *Applied Vegetation Science* 15, 219–230.
- Shleser, R. 1994. Ethanol production in Hawaii: processes, feedstocks and current economic feasibility of fuel grade ethanol production in Hawaii. Final Report. Department of Business, Economic Development & Tourism, Hawaii.
- Steubing, B., Zah, R., Waeger, P., Ludwig, C. 2010. Bioenergy in Switzerland: Assessing the domestic sustainable biomass potential. – *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 2256–2265.
- Tonn B., Thumm U., Claupen W. 2010. Semi-natural grassland biomass for combustion, influence of botanical composition, harvest date and site conditions on fuel composition. – *Grass and Forage Science* 65, 383–397.
- Tutt, M. 2015. Factors affecting biochemical composition of lignocellulosic biomass and its effect on selection of pretreatment method and on bioethanol production potential. Doctoral thesis of Estonian University of Life Sciences, Tartu.
- Van Meerbeek, K., Appels, L., Dewil, R., Van Beek, J., Bellings, L., Liebert, K., Muys, B. and Hermy, M. 2015. Energy potential for combustion and anaerobic digestion of biomass from low-input high-diversity systems in conservation areas. – *GCB Bioenergy* 7, 888–898.

## **WHICH BIOFUEL CONVERSION METHOD IS SUITABLE FOR BIOMASS FROM FLOODPLAIN MEADOWS MANAGED FOR NATURE CONSERVATION?**

Indrek Melts, Marti Tutt, Katrin Heinsoo

In the current paper we analyse the energy potential of biomass from floodplain meadows continuously managed for nature conservation in Estonia via different biofuel production chains. The average calorific value of this biomass was 18.4 kJ g<sup>-1</sup> and the average yield was more than 6.6 t ha<sup>-1</sup> that results in energy potential 121 GJ ha<sup>-1</sup> for combustion. The experimentally determined feedstock-specific biofuel yields were 269 l<sub>N</sub> kg<sup>-1</sup> VS and 116 g kg<sup>-1</sup> for methane and ethanol, respectively. These values correspond to area-specific biofuel energy yields of appr 66 GJ ha<sup>-1</sup> and 20 GJ ha<sup>-1</sup>, respectively. Hence, more than 54% of the energy potential of biomass from floodplain meadows could be achieved with studied methane conversion method. For ethanol production this value was less than 20%. An alternative usage of biomass from floodplain meadows for biofuel is a good option for both continuous sustainable management to archive nature conservation goals and to meet the target of renewable energy policies without competition of food production.

# EESTI SMEAR-JAAMA ANDMETE KASUTUS JÄTKUSUUTLIKU BIOMASSI TOOTMISE JÄLGIMISEL

Steffen M. Noe<sup>1</sup>, Alisa Krasnova<sup>1</sup>, Dmitrii Krasnov<sup>1</sup>, Ahto Kangur<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Põllumajandus- ja keskkonnainstituut, Eesti Maaülikool, Kreutzwaldi 1, 51014 Tartu

<sup>2</sup> Metsandus- ja maaehitusinstituut, Eesti Maaülikool, Kreutzwaldi 1, 51014 Tartu

## Annotatsioon

Viimase kümnendi jooksul on investeeringud jätkusuutliku energia tootmisesse ülemaailmselt kasvanud ligi kuus korda. Sealhulgas katab tänapäeva Eestis jätkusuutlikest allikatest energia tootmine neljandiku kogu energia tootmisest. Siinjuures on biomassipõhine energia tootmine oma 300 miljoni euro suuruse investeeringuga tuuleenergia järel teisel kohal. Selleks, et saada biomassist energiat, on vaja läbida mitmeid etappe, alates süsiniku sidumisest taimede poolt kuni selle uuesti vabanemiseni atmosfääri. Alates 2014. aastast mõõdab Eesti SMEAR-jaam Järveljal muuhulgas süsiniku ja ka biomassi dünaamikat ja seda nii loodusmetsa kui ka majandusmetsa tingimustes. Pikaajalised ökosüsteemi ainevoogusid detailselt kirjeldavad andmed võimaldavad hinnata süsiniku hulka looduslikes ressurssides, mis omakorda võimaldab tulevikus prognoosida süsiniku ringlust sõltuvalt muutustest keskkonnatingimustes ja metsamajandamises. Eesti SMEAR-jaama andmete unikaalsus seisneb andmete rakendatavuses, andmaks hinnanguid erinevate reaktsioonigaaside (näiteks süsinik ja osoon) ringluse ja mõju kohta ökosüsteemi tootlikkusele ja seda erinevatel ökosüsteemi tasanditel puudest kuni maastikeni.

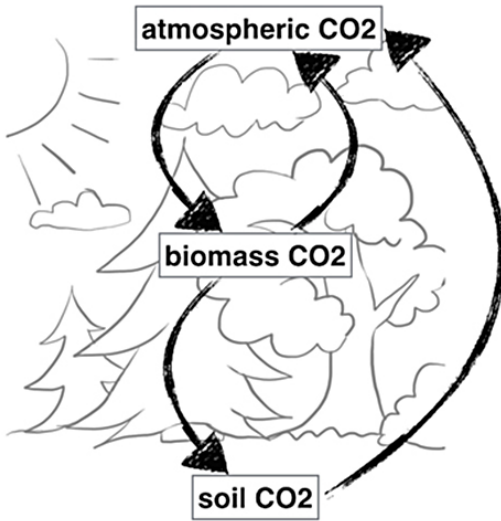
Märksõnad: Eesti SMEAR-jaam, ainevoogude mõõtmine.

## Sissejuhatus

Taastuva biomassi kasutamisel energia tootmiseks on seatud eesmärgiks jõuda töötlemisprotsessi juures süsiniku muutumiseni neutraalseks või isegi negatiivseks (Kraxner et al. 2003; Mathews 2008). Neutraalse stsenaariumi korral on vajalik, et kasutatud biomassi allikas oleks võimeline siduma lisaks kasvuprotsessile ka kasvatamiseks, saagi koristamiseks ning kuni energia tootmiseni käitlemiseks kuluva süsiniku hulga. Süsiniku negatiivse stsenaariumi korral peab lisaks neutraalse stsenaariumi nõuetele lisanduma atmosfääri süsinikdioksiidi (CO<sub>2</sub>) kasvava kontsentratsiooni vähendavate meetmete rakendamine, mis omakorda eeldab biomassi allikalt oluliselt suuremat süsiniku sidumise potentsiaali kui neutraalse stsenaariumi korral. Eelnevast tulenevalt on metsad üks tõenäolisim allikas süsiniku negatiivse biomassi tootmiseks. Kui atmosfääris kasvav CO<sub>2</sub> kontsentratsioon mõjub lühikese perioodi jooksul positiivselt puude



biomassi produktioonivõimele (Calfapietra et al. 2003; Sun et al. 2013), siis pikema perioodi, nagu dekaadide või sajandite korral ei ole kõrgendatud taseme positiivne mõju teada (Hyvönen et al. 2007). Metsaökosüsteemid on oma ülesehituselt keerukad, kuna muld-metsaökosüsteem-atmosfäär-kontiinum sisaldub mitmeid olulisi tagasisiiteid (joonis 1). Selleks, et tagada jätkusuutliku biomassi produktiooni protsessis adekvaatset ülevaadet kasutatavate kliimamuutuste leevendusmeetmete (metsamajanduslikud jt.) mõju üle, on vajalik hinnata ja mõõta süsiniku voogu ja selle tagasimõju terves kontiinumis ja seda pikema ajaperioodi jooksul kui ainult meetmete kasutuselevõtu ajal.



Joonis 1. Muld-taim-atmosfäär-kontiinumi süsinikuringe suuremate tagasimõjude skemaatiline joonis. Eesti SMEAR-jaam võimaldab mõõta nii energia voogu (päikeseenergia) kui ka erinevaid ainevoogusid (nagu näiteks CO<sub>2</sub>). Joonisel viitavad nooled erinevatele metsaökosüsteemis toimivatele ja SMEAR-jaamas mõõdetavatele protsessidele, nagu fotosüntees, hingamine ja varise teke

Figure 1. Major feedbacks of the carbon cycle in the soil-plant-atmosphere continuum. The SMEAR Estonia station measures fluxes from energy as sunlight and matter like CO<sub>2</sub>. The arrows denote processes like photosynthesis, respiration and litter production that are all assessed by the SMEAR station

### Eesti SMEAR-mõõtejaam

Vabas looduses metsaökosüsteemis toimuva energiavoo ja ainevoo (sealhulgas ka süsinikuvoo) põhjalikuks jälgimiseks on Helsingi Ülikooli teadlaste poolt välja ehitatud SMEAR-(Station for Measuring forest Ecosystem-Atmosphere Relations)mõõtejaamad (Hari & Kulmala 2005). SMEARi põhimõtteid järgivaid ökosüsteem-atmosfäär-terviku mõõtmisi on Eestis Järveljal läbi viidud 2008. aastast alates (Noe et al. 2011; Bourtsoukidis et al. 2014). 2014. aastal sai Eesti SMEAR-mõõtejaama ehitus ja seadmestamine valmis ning enamik tehtavatest mõõtmistest toimuvad pidevalt.

Eesti SMEAR-mõõtejaam (58,2714 N, 27,2703 E, 36 m a.s.l.), mis asub Eesti Maaülikooli Järvelja Õppe- ja Katsemetskonnas, paikneb hemiboreaalses segametsade piirkonnas. Jaama ümbritseval neelualal esinevad peamiste puuliikidena harilik mänd (*Pinus sylvestris* L.), harilik kuusk (*Picea abies* (L.) Karst.), arukask (*Betula pendula*

*Roth.*), sookask (*Betula pubescens Ehrh.*), sanglepp (*Alnus glutinosa (L.) Gaertn.*) ja harilik haab (*Populus tremula L.*). Metsale on omane struktuuri ja liigilise koosseisu suur heterogeensus, kusjuures valitsevas puurindes on domineerivaks puuliigiks harilik mänd ning harilik kuusk ja lehtpuud esinevad kaaspuuliikidena või madalamates rinetes. Mõõtejaama ümbruse puistud on valdavalt olnud majandatavad ning seetõttu puistute keskmised vanused varieeruvad, alates kolmest aastast hilistel lageraiealadel kuni rohkem kui 200 aastani lähedal asuvates vanades loodusemetsades. Keskmise peamise puurinde kõrgus jaama vahetus läheduses on 21 meetrit, kuid 300 meetri raadiuses jaama ümber ulatub vanemate puistute keskmine kõrgus ka üle 30 meetri. Sarnaselt metsale on väga vahelduv ja varieeruv ka jaama ümbritsev muldkate, leidub erinevaid gleimuldi, leet- ja leetunud muldi ning turbamuldi.

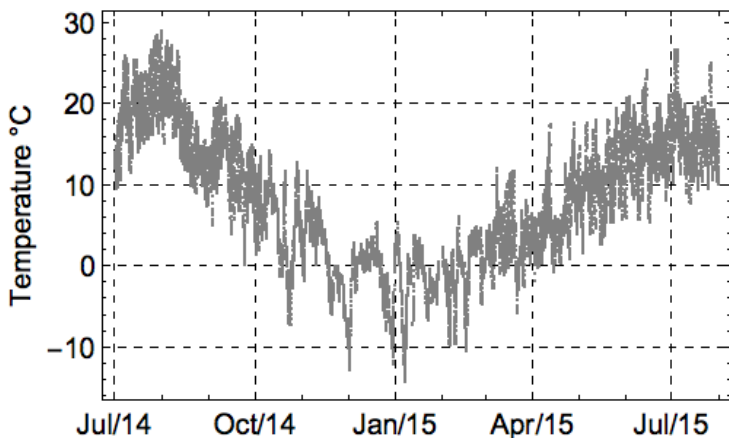
Aasta keskmine temperatuur on 4–6 °C ja aastas tuleb 500–750 mm sademeid, millest 40–80 mm sajab lumena. Keskmise kasvuperioodi pikkus on 170–180 päeva ning jaama õhukvaliteet vastab tüüpilisele puhta õhuga tausttingimusele (*clean air background condition*) (Noe et al. 2011, 2012).

### **Näiteid Eesti SMEAR-mõõtejaama andmetest**

Atmosfääri süsinikdioksiidi, veeauru, kasvuhooenergia kontsentratsioonid ja ilmastikutunnuste väärtused on mõõdetud kõrge täpsuse ja mõõtesagedusega 1 sekundist kuni 10 Hz. Andmehalduse käigus andmed keskmistatakse poole tunnise sageduse peale (joonis 2).

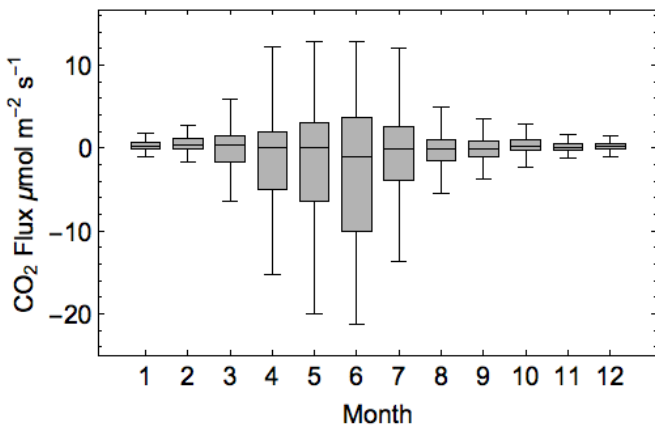
Süsinikdioksiidi voogu mõõdetakse ökosüsteemi tasandil, kasutades turbulentsse kovariatsiooni meetodit (Baldocchi 2003) ning mõõtmised tehakse 10 Hz sagedusega 30 m ja 70 m kõrgusel maapinnast. Ökosüsteemi poolt süsiniku omastamist ja vabastamist (joonis 3) hinnatakse, kasutades selleks kuude mediaani, kvantiile ja variatsioonid. On selgesti jälgitav, et kevade- ja suveperioodil biomass kasvab ning CO<sub>2</sub> neeldumine on ilmne (negatiivne voog, nagu CO<sub>2</sub>, liigub atmosfäärist biomassi), samas sügise ja talve jooksul vabaneb CO<sub>2</sub> ökosüsteemist uuesti atmosfääri.

Sidumaks energia- ja ainevoogude mõõtmisandmeid kindla metsaökosüsteemiga, on oluline saada detailne ülevaade neelualal kasvavast metsast. Kirjeldus on loodud proovitükkide võrgustikuga, kus on kirjeldatud üksikpuude tunnused (puu kõrgus, läbimõõt rinnakõrguselt ja asukoht), aga ka proovitükil kasvava alustaimestiku kirjeldustega (joonis 4). Selline andmestik võimaldab hinnata üksikpuu tasemel nii kasvavat elusat, püsti seisvat surnud kui ka maha langenud biomassi.



Joonis 2. Eesti SMEAR-mõõtejaamas 30 meetrit maapinnast mõõdetud kolmeteistkümne kuu (1. juuli 2014 kuni 31. juuli 2015) pooltunniste intervallidega esitatud keskmise temperatuuri mõõteandmed

Figure 2. Example of 13 months, from 1. July 2014 to 31. July 2015, half hourly mean temperature data measured at the SMEAR Estonia station on a height of 30 m above ground level

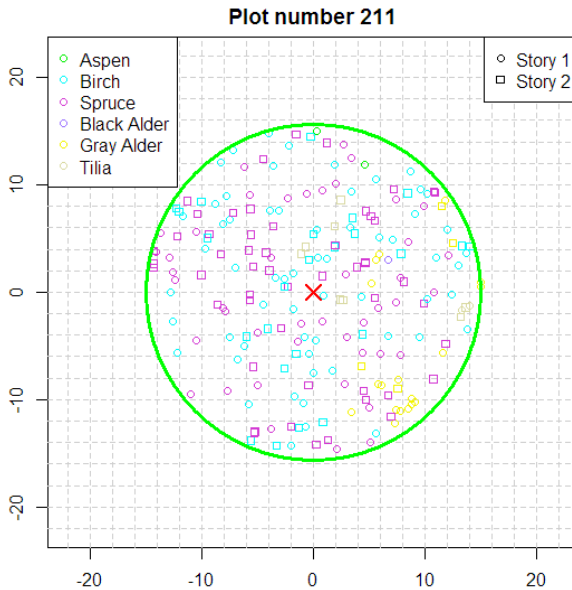


Joonis 3. CO<sub>2</sub> voog kuude lõikes karpdiagrammina esitatult samaajalise intervalli kohta, mis esitatud joonisel 2. Karpide ulatus esitab andmed 25% kvantiilist kuni 75% kvantiilini, mediaan ja vuntsid iseloomustavad andmete varieeruvust

Figure 3. Monthly Box-Whisker chart of CO<sub>2</sub> fluxes calculated by combining data from the same time interval as given in Figure 2. The boxes denote the data covering 25 to 75 % quantiles, the central line the median and the whiskers the variability of the data

## Kokkuvõte

Taastuva biomassi jätkusuutlikuks tootmiseks on vajalik teadmistepõhine, kõrgekvaliteedilisi andmeid kasutav ning teaduslikke tulemusi rakendav majandamine. Eesti



Joonis 4. Eesti SMEAR-mõõtejaama Liispõllu neelualale rajatud ringproovitükk  
 Figure 4. An example of forest circular sample plot established on the footprint area of SMEAR Estonia Liispõllu study site

SMEAR-mõõtejaam pakub võimaluse seirata ja pikaajaliselt koguda andmeid metsa-ökosüsteemi süsinikuringet mõjutavate tunnuste kohta erinevatel ökosüsteemi tasanditel ja suure mõõtesagedusega. Kombineerides ainevoogude mõõtemetodeid kõikide toetavate meteoroloogiliste, õhukvaliteedi ja metsanduslike andmetega, panustab Eesti SMEAR-jaam oluliselt tulemuslikku energiamajanduse ja kliimamuutuste leevendusmeetmete mõju analüüsimiseks olulise andmestiku kogumisse ning võimaldab töötada tulevikus välja veel mõjuvamaid leevendusmeetmete rakendusi ja poliitikat.

### Tänuavaldused

Täname rahalise toetuse eest Euroopa Komisjoni Euroopa Regionaalarengu Fondi ( “Centre of Excellence in Environmental Adaptation”, “Environmental Conservation and Environmental Technology R&D Programme” project BioAtmos (3.2.0802.11-0043), “Internationalization of Science Programme” project INSMEARIN (10.1-6/13/1028), “Estonian Research Infrastructures Roadmap” project Estonian Environmental Observatory (3.2.0304.11-0395)).

## Kasutatud kirjandus

- Baldocchi D. D. 2003. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. – *Global Change Biology* 9: 479–492.
- Bourtsoukidis E., Bonn B. & Noe S. M. 2014. On-line field measurements of BVOC emissions from Norway spruce (*Picea abies*) at the hemiboreal SMEAR-Estonia site under autumn conditions. – *Boreal Env. Res.* 19: 1–15.
- Calfapietra C., Gielen B., Galema A. N. J., Lukac M., Angelis P. De, Moscatelli M. C., Ceulemans R. & Scarascia-Mugnozza G. 2003. Free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) enhances biomass production in a short-rotation poplar plantation. – *Tree Physiology* 23: 805–814.
- Hari P. & Kulmala M. 2005. Station for Measuring Ecosystem–Atmosphere Relations (SMEAR II). – *Boreal Env. Res.* 10: 315–322.
- Hyvönen R., Agren G. I., Linder S., Persson T., Cotrufo M. F., Ekblad A., Freeman M., Grelle A., Janssens I.A., Jarvis P.G., Kellomäki S., Lindroth A., Loustau D., Lundmark T., Norby R. J., Oren R., Pilegaard K., Ryan M. G., Sigurdsson B. D., Strömgren M., Oijen M. van & Wallin G. 2007. The likely impact of elevated [CO<sub>2</sub>], nitrogen deposition, increased temperature and management on carbon sequestration in temperate and boreal forest ecosystems: a literature review. – *The New phytologist* 173: 463–480.
- Kraxner F., Nilsson S. & Obersteiner M. 2003. Negative emissions from BioEnergy use, carbon capture and sequestration (BECS) – the case of biomass production by sustainable forest management from semi-natural temperate forests. – *Biomass and Bioenergy* 24: 285–296.
- Mathews J. A. 2008. Carbon-negative biofuels. – *Energy Policy* 36: 940–945.
- Noe S. M., Hüve K., Niinemets Ü. & Copolovici L. 2012. Seasonal variation in vertical volatile compounds air concentrations within a remote hemiboreal mixed forest. – *Atmos. Chem. Phys.* 12: 3909–3926.
- Noe S. M., Kimmel V., Hüve K., Copolovici L., Portillo-Estrada M., Püttsepp Ü., Jõgis-te K., Niinemets Ü., Hörtnagl L. & Wohlfahrt G. 2011. Ecosystem-scale biosphere–atmosphere interactions of a hemiboreal mixed forest stand at Järvselja, Estonia. – *Forest Ecology and Management* 262: 71–81.
- Sun Z., Niinemets U., Hüve K., Rasulov B. & Noe S. M. 2013. Elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration leads to increased whole-plant isoprene emission in hybrid aspen (*Populus tremula* × *Populus tremuloides*). – *The New Phytologist*: 1–13.

## **EVALUATING THE SUSTAINABLE BIOMASS PRODUCTION USING THE DATA FROM THE ESTONIAN SMEAR-STATION**

Steffen M. Noe, Alisa Krasnova, Dmitrii Krasnov, Ahto Kangur

Over the past decade worldwide investments into sustainable energy sources have grown by a factor of six. Estonian energy production from sustainable resources covers nowadays about a quarter of the total energy production. Biomass bound energy production is with investments of 300 million Euro on the second rank after wind energy in Estonia. The total process starting from growth of biomass to the energy production includes several steps where atmospheric carbon is captured but also carbon is released back to the atmosphere. The SMEAR Estonia station measures since 2014 continuously carbon and biomass dynamics of managed forest areas. The long-term comprehensive data allows assessing carbon budgets of the natural resource forest and enables future projections and risk analysis depending on environmental drivers and forest management actions. A unique feature of the SMEAR Estonia data is the possibility to assess measures on different scales ranging from trees to ecosystems.

# MASTIMÕÕTMISED VÕIMALDAVAD HINNATA TUULEENERGIA RESSURSSI

Marko Kaasik<sup>1</sup>, Steffen M. Noe<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TÜ füüsikainstituut, Ravila 14c, Tartu, marko.kaasik@ut.ee

<sup>2</sup>EMÜ põllumajandus- ja keskkonnainstituut, Kreutzwaldi 5, 51014 Tartu, steffen.noe@emu.ee

## Annotatsioon

Täpsem viis tuuleenergia ressursi hindamiseks on otsemõõtmine suurte tuulikute kõrgusel. Alates 2014. aastast viib Eesti Maaülikool mõõtmisi läbi ultrahelianemomeetriega Järvelseljal spetsiaalselt ehitatud mõõtemastis ja Tartu Ülikool Valgjärve telemastis. Mõõtmised annavad tuule suuna ja kiiruse ajalise muutlikkuse sekundi mürdosa täpsusega (mõõtesagedus 10–40 Hz), mida saab vajadusel keskmistada mistahes ajavahemikule. Mõõdetakse ka tuule vertikaalkomponenti ehk tõusvaid ja laskuvaid õhuvoole. Mõõtmised toimuvad Valgjärvel kõrgustel 30, 50, 110 ja 200 meetrit ning Järvelseljal kõrgustel 30, 50, 70, 90 ja 110 meetrit maapinnast. Valgjärve ja Järvelselja mastimõõtmised võimaldavad täpselt hinnata siiani vähe kasutatud tuuleenergia ressursi Kagu-Eestis. Nõudmise ja rahastuse olemasolul saab samalaadseid mõõtmisi läbi viia ka teistes AS Levira mastides üle Eesti.

## Sissejuhatus

Sellest, et täpsed teadmised mitte üksnes ilmajaamades standardselt mõõdetava tuule kiiruse, vaid ka tuule lühiajalise muutlikkuse (puhangute) kohta on olulised tuulikute konstrueerimisel ja tuuleparkide kavandamisel, saadi aru juba kaasaegse tuuleenergeetika algusaegadel (Verheij 1988). Täppismõõtmisi kõrgetes mastides koos atmosfäärimudelitega kasutatakse tänapäeval laialdaselt tuuleenergia ressursside kaardistamiseks (Devis jt 2013).

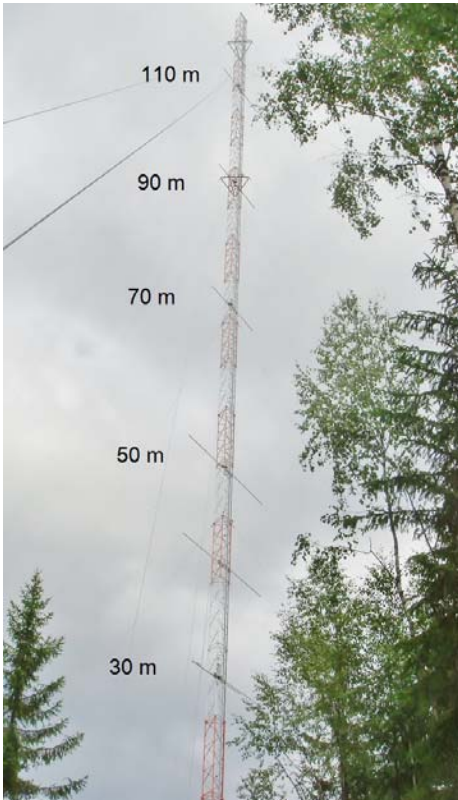
Alates 2014. aastast toimuvad niisugused mõõtmised Eesti teaduse infrastruktuuri teekaardi projekti „Eesti Keskkonnaobservatoorium“ raames spetsiaalselt püstitatud mastis Järvelseljal ja Valgjärve telemastis ning seda viivad läbi vastavalt Eesti Maaülikooli põllumajandus- ja keskkonnainstituut ja Tartu Ülikooli füüsikainstituut. See artikkel tutvustab nende mõõtmiste korraldust, väljundit ja annab ülevaate seni saadud andmetest tuuleressursi kohta.

## Mõõtmised

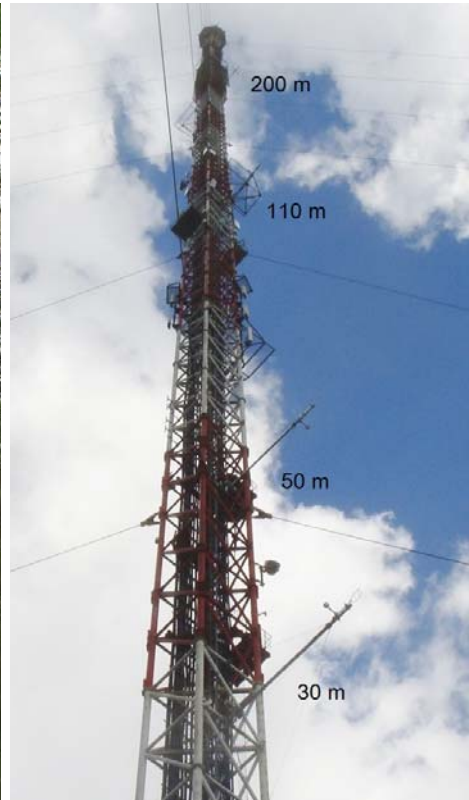
Järvelselja mõõtemast (joonis 1) paikneb Tartumaa kaguservas Järvelselja küla lähedal tasasel ja valdavalt metsasel maastikul. Masti koordinaadid on 58°16'38" põhjalaiust ja

27°18'35" idapikkust, masti jalam on 40 m üle merepinna. Mast on 130 meetrit kõrge, kõrgustel 30, 50, 70, 90 ja 110 meetrit maapinnast paiknevad ultrahelianemomeetrid Metek Class A, temperatuuriandurid ning 50 m kõrgusel ka niiskuseandur.

Valgjärve telemast (joonis 2) asub Põlvamaal Valgjärve vallas kuppelmaastikul, kus haritav maa vaheldub metsatukkadega. Masti koordinaadid on 58°16'38" põhjalaiust ja 27°18'35" idapikkust, masti jalam on 180 m üle merepinna. Valgjärve mast on 347 meetrit kõrge, kuid ülemine osa on kasutusel üksnes televisiooni- ja mobiilsidelevi seadmete jaoks. Kõrgustel 30, 50, 110 ja 200 meetrit maapinnast paiknevad ultrahelianemomeetrid Metek Class A, temperatuuri- ja niiskuseandurid Rotronic ning kõrgusel 200 meetrit veel radiomeeter Kipp & Zonen CNR4, mis mõõdab maapinna kiirgusbilanssi, mõistmaks paremini atmosfääri maalähedases kihis toimuvat soojusülekannet, millest sõltuvad ka tuulepuhangud.

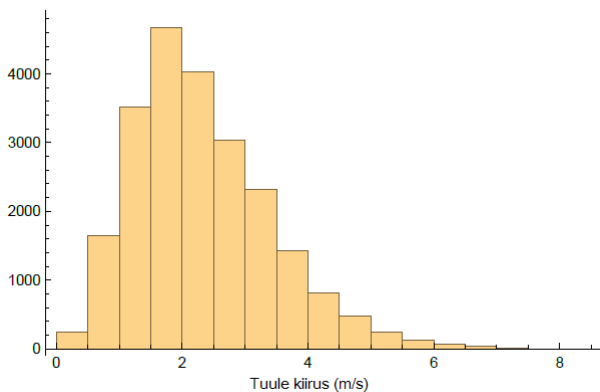


Joonis 1. Järvselja mast. Näidatud on aparatuuri paiknemise kõrgused  
Figure 1 Järvselja mast. Height of the measurement equipment is shown.



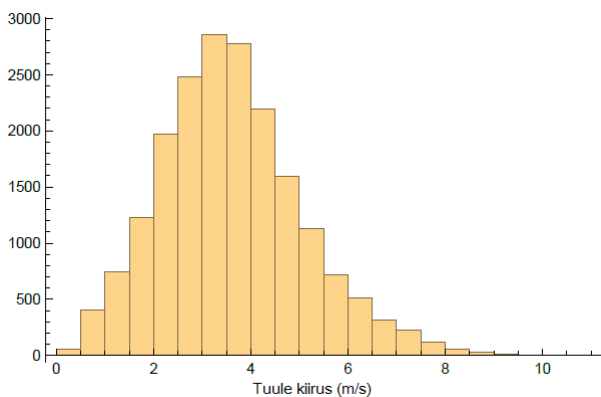
Joonis 2. Valgjärve mast. Näidatud on aparatuuri paiknemise kõrgused  
Figure 1 Valgjärve mast. Height of the measurement equipment is shown.





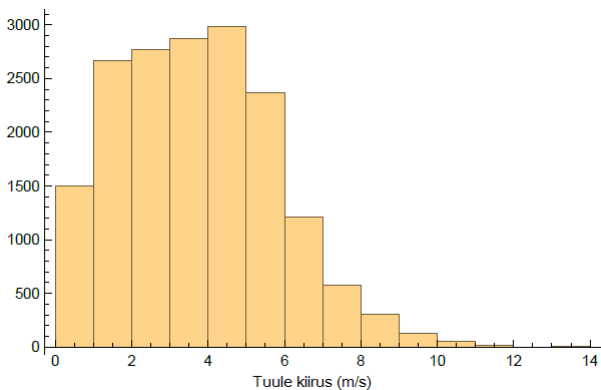
Joonis 3. Järvelja mastis 30 m kõrgusel mõõdetud aastase perioodi tuulekiiruste suhtelised esinemissagedused

Figure 3. Approximate wind speed per year measured in Järvelja mast at the height of 30 m



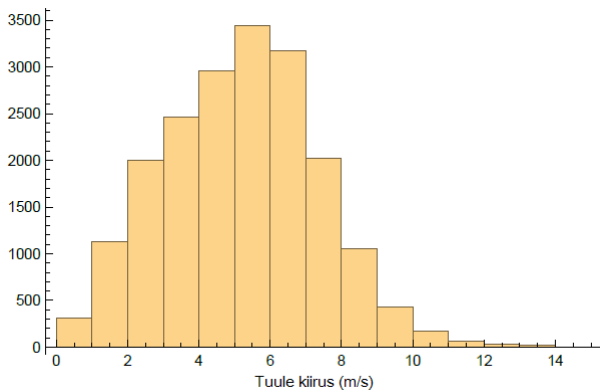
Joonis 4. Järvelja mastis 50 m kõrgusel mõõdetud aastase perioodi tuulekiiruste suhtelised esinemissagedused

Figure 4. Approximate wind speed per year measured in Järvelja mast at the height of 50 m



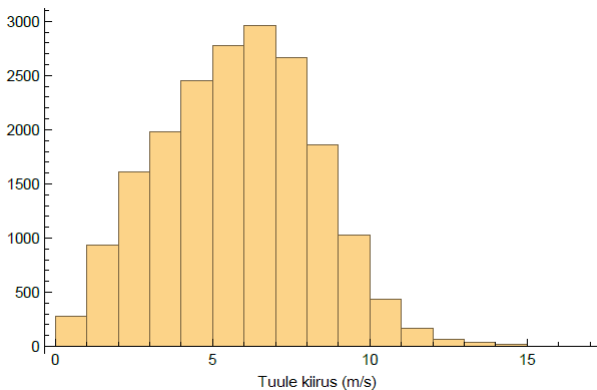
Joonis 5. Järvelja mastis 70 m kõrgusel mõõdetud aastase perioodi tuulekiiruste suhtelised esinemissagedused

Figure 5. Approximate wind speed per year measured in Järvelja mast at the height of 70 m



Joonis 6. Järvelja mastis 90 m kõrgusel mõõdetud aastase perioodi tuulekiiruste suhtelised esinemissagedused

Figure 6. Approximate wind speed per year measured in Järvelja mast at the height of 90 m



Joonis 7. Järvelja mastis 110 m kõrgusel mõõdetud aastase perioodi tuulekiiruste suhtelised esinemissagedused

Figure 7. Approximate wind speed per year measured in Järvelja mast at the height of 110 m

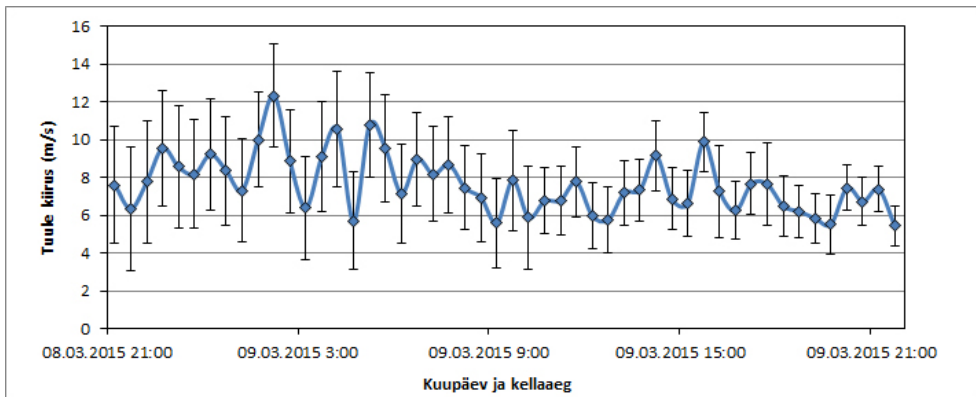
Valgjärve mastis töötavad anemomeetrid mõõdavad tuule kiiruse kõiki kolme komponenti ja õhu temperatuuri sagedusega 40 Hz ja Järveljal 10 Hz, mis hõlmab ka kõige peenemad õhukeerised. Tuule kiirustest ülevaate saamiseks keskmistatakse need ajavahemikele 15–60 minutit.

### Mõõdetud tuule kiirus ja selle muutlikkus

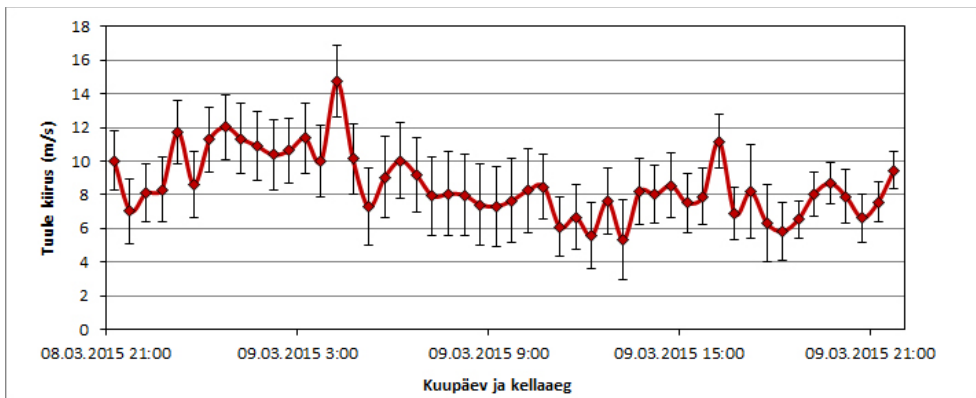
Järvelja masti viiel kõrgusel mõõdetud aastase perioodi (september 2014 – august 2015) tuulekiiruste esinemissagedused on toodud joonistel 3–7. Tuule kiirused kasvavad kõrgusega järjekindlalt. Tähelepanu äratav kiiruste „lame“ jaotus 70 m kõrgusel, mille põhjused vajavad uurimist. See võib olla seotud üleminekuga ümbritsevast metsast (kõrgus umbes 35 meetrit) otseselt mõjutatud kihist ülemisse kihti, kus õhu voolamine on suhteliselt vaba.

Joonistel 8 ja 9 on toodud näide poole tunni keskmisest tuulekiirusest ja selle standardhälbest ühe ööpäeva jooksul Valgjärve mastis kõrgustel 30 ja 50 meetrit. Standardhälbed

on siin arvutatud sagedusega 40 Hz mõõdetud väärtuste alusel, kuid kuna mõõtmised hõlmavad kogu turbulentsse muutlikkuse spektrit, siis saab vajadusel teatud sagedusest kiiremaid fluktuatsioone välja filtreerides leida ka kestvamate puhangute esinemissageduse ja amplituudi.



Joonis 8. Valgjärve mastis 30 m kõrgusel mõõdetud poole tunni keskmised tuulekiirused ja standardhälbed (näidatud veapiiridena) ühe ööpäeva jooksul  
 Figure 8. Average wind speed per half an hour and standard deviation during 24 hours measured at 30 metres in Valgjärve mast



Joonis 9. Valgjärve mastis 50 m kõrgusel mõõdetud poole tunni keskmised tuulekiirused ja standardhälbed (näidatud veapiiridena) ühe ööpäeva jooksul  
 Figure 9. Average wind speed per half an hour and standard deviation during 24 hours measured at 50 metres in Valgjärve mast

## **Tänuavaldused**

Täname Eesti SMEAR-jaama ehitamise, mõõtmiste baastoetuse ja seotud teadustööde rahalise toetuse eest Euroopa Komisjoni Euroopa Regionaalarengu Fondi (“Centre of Excellence in Environmental Adaptation”, “Environmental Conservation and Environmental Technology R&D Programme” project BioAtmos (3.2.0802.11-0043), “Internationalization of Science Programme” project INSMEARIN (10.1-6/13/1028), “Estonian Research Infrastructures Roadmap” project Estonian Environmental Observatory (3.2.0304.11-0395)) projekte.

## **Kokkuvõte**

Kuigi tuuleenergia ressursi kaardistamiseks suurtel aladel kasutatakse atmosfäärimudeleid, vajavad need valideerimist mõõtmiste põhjal, vältimaks suuri süstemaatilisi vigu (Devis jt 2013). Valgjärve ja Järvelja mastimõõtmised annavad just selliseid detailseid teadmisi tuulekiiruste muutlikkusest ajas ja kõrgusega seoses. Eesti atmosfäärifüüsikud on viimase kahe aasta jooksul saanud positiivse koostöökogemuse AS Leviraga. Nõudmise ja rahastuse olemasolul saab mõõtmisi laiendada teistesse piirkondadesse, sest mõõtmiseks piisava kõrgusega mastid paiknevad üle Eesti erineva tuuleenergiaressursiga piirkondades.

## **Kasutatud kirjandus**

- Devis, A., van Lipzig N. P. M., Demuzere, M. 2013. A new statistical approach to downscale wind speed distributions at a site in northern Europe, *J. Geophys. Res. Atmos.* 118, 2272–2283, doi:10.1002/jgrd.50245.
- Verheij, F. J. 1988. Development of a gust model for the design of large wind turbines. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 27, 89–102, doi:10.1016/0167-6105(88)90026-8.

## **THE MAST MEASUREMENTS FOR ESTIMATING THE WIND ENERGY RESOURCE**

Marko Kaasik, Steffen M. Noe

The most exact way to estimate the wind energy resource is to measure the air flow directly at the height of big wind turbines. Since 2014 the Estonian University of Life Sciences is performing measurements in specially constructed measurement mast at Järvelja and the University of Tartu in Valgjärve TV-mast. The measurements give the variability of wind speed and direction with precision of a fraction of second (measurement frequency is 40 Hz) that can be averaged for required time interval. The vertical component of the wind, representing the ascending and descending air flows, is measured as well. The measurements at Valgjärve are performed at heights of 30, 50, 110 ja 200 meters and at Järvelja at 30, 50, 70, 90 ja 110 from the surface. The mast measurements at Valgjärve and Järvelja give precise information about wind energy resources in South-east Estonia, which is still poorly used. If there exists demand and funding is available, then the similar measurements are possible in other masts within Estonia that are operated by AS Levira.

# BIOETANOOLKÜTUSE MÕJU KAHETAKTILISE KOLBMOOTORI VÄLJUNDPARAMEETRITELE

Arne Küüt, Risto Ilves, Jüri Olt

Eesti Maaülikooli Tehnikainstituut, Kreutzwaldi 56, 51014 Tartu

[arne.kyyt@emu.ee](mailto:arne.kyyt@emu.ee)

## Annotatsioon

Käesolev töö on eeluuring, osa suuremamahulisest uurimusest, kus käsitletakse teise põlvkonna bioetanooli kasutamisevõimalusi kütusena. Bioetanoolkütuse kasutusvõimaluste uurimine, arendamine ja evitamine on planeeritud eelkõige põllu- ja metsamajandussektoris. Antud uurimuses kasutatakse bioetanooli kahetaktilise väikesekubatuuri- lise sise põlemismootori kütusesegus ühe peamise komponendina. Uurimismetoodika, mida kasutati, on peamiselt katsepõhine. Artiklis analüüsitakse mootorkatsetel saadud tulemusi. Töö eesmärgiks oli hinnata bioetanooli mõju mootori võimsusele ja ökonoomsusele ning heitgaaside koostisele. Katsete tulemused ja arutelu on esitatud võrdluses tavakütuse kasutamisega.

Töö tulemusena võib öelda, et bioetanooli ja kahetaktilise mootoriõli kasutamisel kütuseseguna ei esinenud mootori töödetailide kiiret kulumist, küll aga korrosiooni. Heitgaasides sisalduvate kahjulike ainete koguste analüüsimisel vähenesid märgatavalt lämmastikoksiidid, samas ei vähenenud eriti süsinikmonooksiidi hulk. Ökonoomsuse seisukohalt tuleb kahetaktiliste mootorite toitesüsteem ümber ehitada, kui soovitakse saada paremaid tulemusi.

Märksõnad: kahetaktiline kolbmootor, õli ja bioetanooli segu, määrimine, mootori väljundparameetrid.

## Sissejuhatus

Taastuvatest biokütustest on üheks sobivamaks sise põlemismootori kütuseks bioetanool, mis põhineb teisel generatsioonil. Teise generatsiooni bioetanooli tootmiseks kasutatakse orgaanilist lignotselluloosset toorainet, nagu puidujäätmed, põllumajandusjäätmed, põhk jne. Orgaanilise tooraine ühiseks nimetajaks valdkonnapõhiselt on agrobiomass (Mikkola, Ahokas 2011). Teise põlvkonna bioetanooli tootmise eeliseks on, et see tooraine ei konkureeri toiduainete tootmisega (Ritslaid jt 2010). Probleemiks on aga bioetanooli madal tootmismahut Eesti tingimustes (Küüt 2013) ja tema füüsikalise-keemilised omadused, mis pärsivad selle kasutamist, võrreldes tavakütustega.

Üheks võimaluseks arendada bioetanooli kui mootorikütust, on lisakütuse kasutamine. Lisakütuse kasutamisel on vajalik kaheüsteemne toiteaparatuur. Teiseks võimaluseks on kütusesegude valmistamine. Kaheüsteemne toiteaparatuur võimaldab kasutada bioetanooli ilma lisanditeta. Selleks on vajalik lisada mootorile eraldi bioetanooli lisatoitesüsteem (patent EE 05665 B1), mis nõuab aga lisakulutusi, võrreldes kütuste segude kasutamisega. Bioetanoolkütuse segude kasutamist on uuritud laialdasemalt. Uuritud on bioetanooli-diiislikütuse-biodiislikütuse segusid (Labeckas jt 2010), bioetanooli-mootoribensiini segusid (Olt jt 2009, Hilbert jt 2011) ja bioetanooli-diiislikütuse segusid (Olt jt 2011).

Bioetanooli tootmisel on peamiseks probleemiks veevaba etanooli tootmine ja segude valmistamine. Veest vabastamise tehnoloogiate väljatöötamisega on tegeletud Läti Põllumajandusülikoolis (Bremers jt 2011). Segude valmistamisel on probleem etanooli, õli ja tavakütuste mittesegunemises. Segunemise probleemid on tingitud ainete polaarsusest. Eesti Maaülikooli mootorite laboris on välja töötatud esialgne segamismeetod, mis on andnud positiivseid tulemusi.

Bioetanooli ja õli segu üheks kasutusvõimaluseks on väikesekubatuurilised kahetaktilised mootorid. Seda tingimustes, kus bioetanooli tootmismahud ei ole kuigi suured. Üldiselt kasutatakse kahetaktilisi ja väikesekubatuurilisi mootoreid omavaid töömasinaid inimese läheduses, kus on eriti suur tähtsus heitgaasides sisalduvatel kahjulikel ühenditel. Võrreldes bensiiniga annab bioetanooli kasutamine kahetaktilistes mootorites võimaluse heitgaasides sisalduvate kahjulike ühendite vähendamiseks (Demirbas 2009). Samas on probleemiks bioetanooli mõju mootori töödetailedele. Kahetaktiline mootor vajab heade määrimisomadustega kütust, et tagada mootori kolvigrupi probleemideta töö. Kolmandaks, kuid mitte vähem tähtsaks probleemiks, on ökonoomsuse näitajad e kütusekulu. Nende eelpool nimetatud probleemide lahendamiseks valiti katsepõhine uurimismeetod. Ülesandeks oli sobiliku bioetanoolkütuse segu valmistamine ja mootorkatsete teostamine.

Käesoleva artikli eesmärgiks on anda ülevaade bioetanooli ja õli segu mõjust kahetaktilise mootori ökonoomsusele ning heitgaaside emissioonile. Lisaks hinnati ka bioetanoolkütuse mõju mootori töödetailedele.

## **Materjal ja meetodika**

Katsetused viidi läbi, kasutades kahte kahetaktilise mootoriga generaatorit NPE-GG780-2 (tabel 1) ja kütustena mootoribensiini(E95)-õli ja bioetanooli-õli segu (tabel 2). Mõlema kütusesegu valmistamisel kasutati õlina Addinoli kahetaktilist moo-

toriöli Super Synth 2T MZ 408. Generaatorite valimise põhjuseks oli võimalikult konstantsete katsetingimuste tagamine. Mootorite võrdlevatel katsetel on oluline, et võrreldavad seadmed töotaksid sarnastes töötingimustes. Peamiselt mõjutavad tööd koormus ja keskkonningimused. Generaatorite kasutamisel on tunduvalt lihtsam tagada sarnaseid töötingimusi, võrreldes näiteks mootorsaagidega, saamaks täpsemaid mõõtmistulemusi. Generaatorite tehnilised andmed on toodud tabelis 1 ja katsekütuste füüsikalised näitajad tabelis 2.

*Tabel 1. Generaatori NPEGG780-2 tehnilised andmed*  
*Table 1. Technical characteristics of generator NPEGG780-2*

Nimetus	Tehaseandmed
Mudel	LTE145
Tüüp	2-taktiline, õhkjahutusega, ühesilindriline
Kolvikäik	40 mm
Töömaht	63 cm <sup>3</sup>
Võimsus	2 hp (1.5 kW) 3000 p/min
Kütus	Pliivaba bensiin
Kütuse ja õli suhe	1/50
Süütesüsteem	C.D.I
Süüteküünla tüüp	F6RTC

*Tabel 2. Katsekütuste füüsikalised omadused*  
*Table 2. Physical parameters of the test fuel*

Kütus	Tihedus (kg·(m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> )*	Viskoossus (KV)** (mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	Hõõrdumise jõud (N)***
Etanool	0,8096	1,653	19,94
Etanool + õli	0,8297	1,746	11,06
MB + õli	0,7672	0,660	15,01
Mootoribensiin	0,7593	0,584	20,61

\* Mõõdetud 15 °C

\*\* Katsemeetod ASTM D445 [11]

\*\*\* Mõõdetud katseseadmega GUNT TM 260.03 [12]

MB – Mootoribensiin

Mootorkatsed viidi läbi kahes osas: test 1 ja test 2. Esimeses testis seadistati bioetanooliga töötava generaatori karburaator selliselt, et mootor töötaks stabiilselt. Seadistuse vajadus on tingitud etanooli madalast kütteväärtusest ja suuremast hapnikusisaldusest. Generaatorite koormamiseks kasutati tarbijaid võimsusega P = 200W ühele katseseadmele (joonis 1).





Joonis 1. Katseseade

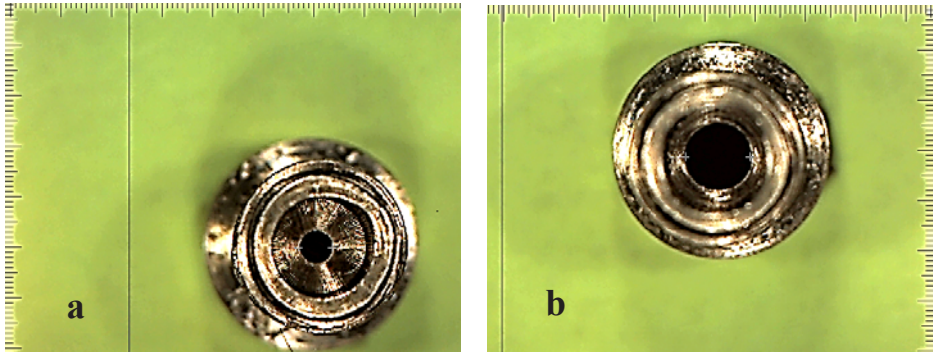
Figure 1. Testing equipment

Mootorkatsete kestuseks oli kokku 300 h, esimesel katsel (test 1) 200 h ja teisel katsel (test 2) 100 h. Esimene katse (test 1) teostati generaatorite toitesüsteemi originaalseadistusega. Test 1 läbiviimisel ilmnedid probleemid bioetanooli ja õli segu kasutamisel ja sellest tulenevalt otsustati teisel katsel muuta katsetingimusi (test 2). Probleemiks olid puudused toitesüsteemis, mille tagajärjel tekkis vajadus generaatoril II karburaator ümber ehitada. Ümberehituse käigus suurendati karburaatori düüsi ava läbimõõtu  $d_2$ , võttes aluseks kütuse vajaduse  $B_{f2}$ . Bioetanoolkütuse seguga töötava generaatori düüsi ava  $d_2$  läbimõõtu bioetanooli kasutamisel leitakse seosest:

$$d_2 = \frac{B_{f2} \cdot d_1}{B_{f1}} \quad , \quad (1)$$

kus  $B_{f1}$  – mõõdetud kütuse (MB-õli) kogus ümberehitamata düüsiga  $g \cdot h^{-1}$  (test 1),  
 $B_{f2}$  – teoreetiliselt vajalik bioetanoolkütuse kogus  $g \cdot h^{-1}$ ,  
 $d_1$  – ümberehitamata düüsi ava läbimõõtu mm,  
 $d_2$  – ümberehitatud düüsi ava läbimõõtu mm.

Arvutades võeti vajaliku kütusekoguse bioetanooli leidmiseks kasutamisel ette antud katsetingimustel aluseks eripõlemissoojus, mis on mootoribensiinil  $Q = 43,5 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  ja etanoolil  $Q = 26,8 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  (Merker jt 2012). Tulemuseks saadi, et karburaatori düüsiava läbimõõtu  $d_2 = 1,16 \text{ mm}$ . Kirjandusallikates soovitatakse düüsi ava läbimõõtu suurendada vähemalt 1,5 korda (Taraba jt 1981). Arvestades mootori madalat kasutegurit bioetanooli kasutamisel ja määrimisega seotud probleeme, otsustati suurendada esialgsete arvutustega saadud düüsiava. Düüsiava suuruse määramisel võeti aluseks, et rikas küttesegu mootoris tagab efektiivsema määrimise. Antud katses valiti mootori küttesegu liigõhuteguriks  $\lambda = 0,9$ . Seega, ava esialgset läbimõõtu  $d_1 = 0,71 \text{ mm}$  suurendati läbimõõduni  $d_2 = 1,37 \text{ mm}$  (joonis 2).



Joonis 2. Generaatori II düüsi ava enne (a) ja pärast töötlemist (b)  
 Figure 2. Generator II nozzle before (a) and after (b) treatment

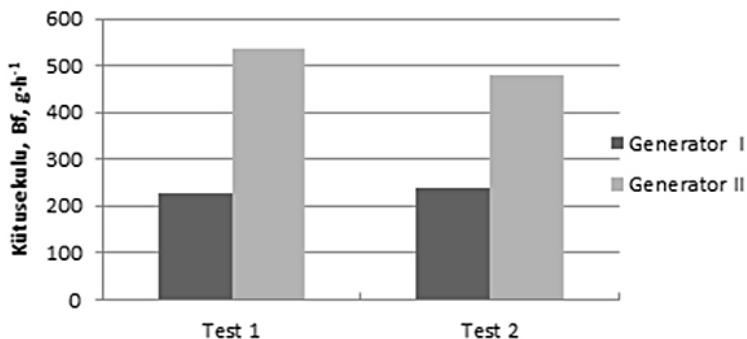
Mõõtmised teostati katse algul ja lõpus. Võrdlevalt hinnati ja analüüsiti katsetulemuste põhjal saadud kütusekulu  $B_f$  ja heitgaaside sisaldust lähtuvalt kütuseliigist ja katseseadme toitesüsteemi reguleerimisest.

Heitgaasides sisalduvate ühendite osakaalu mõõdeti seadmega Bosch BEA-350 ja see on esitletud võrdleva analüüsina. Lähtuvalt katsetingimustest on võrreldud katsetustel saadud mõõtetulemusi eraldi. Testi 1 ja testi 2 mõõtetulemused ei ole omavahel võrreldavad, põhjuseks on erinevad keskkonningimused. Katsed viidi läbi erinevatel aasta-aegadel ja seega erinesid keskkonna parameetrid, näiteks temperatuur katsetel: temperatuur oli katsetel esimese testi puhul  $12,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja teise puhul  $26,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Lisaks mootori väljundparameetritele määrati töödetaillide kulumine (Anderson jt 2002) ja hinnati korrosiooni mõju, mis küll laialdasemat kajastamist antud artiklis ei leia. Esitletud on katse käigus saadud tulemuste kokkuvõtte ja peamised esile kerkinud probleemid, mis võivad hakata mootori tööle mõju avaldama pikemas perspektiivis.

### Tulemused ja arutelu

Ökonoomsuse hindamisel suurenes kütusekulu  $B_{f_{et}}$  test 1-ga etanooli generaatoril  $134,6\%$  (joonis 3), võrreldes mootoribensiiniga töötava generaatori kütusekuluga Bfd. Normaalseks kütusekulu suurenemiseks on etanooli kasutamisel  $60\text{--}70\%$ , võttes aluseks kütuste kütteväärtused. Probleemiks oli etanooliga töötaval generaatoril kütuse doseerimise düüsi liiga väike ava, mille tulemuseks oli kütuse ebapiisav doseerimine (joonis 2a). Probleemi lahendamiseks piirati katsel 1 õhu pealevoolu mootoris karburaatori õhuklapi osalise sulgemisega. Antud lahendus tagas mootori stabiilse töötamise eeltoodud koormusel, kuid põhjustas rikka küttesegu moodustumise. Karburaatori

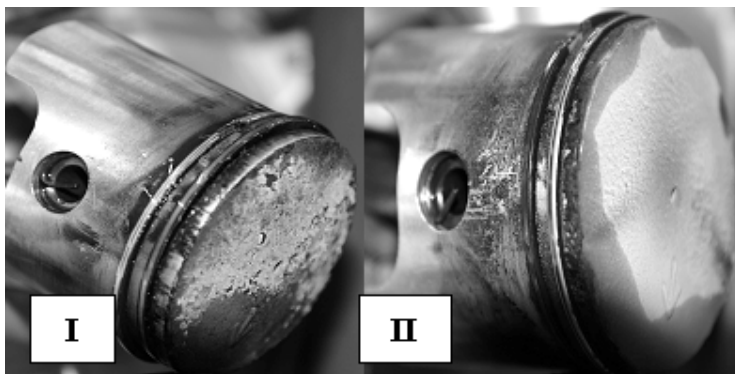


Joonis 3. Generaatorite kütusekulude erinevused  
 Figure 3. Generator fuel consumption differences

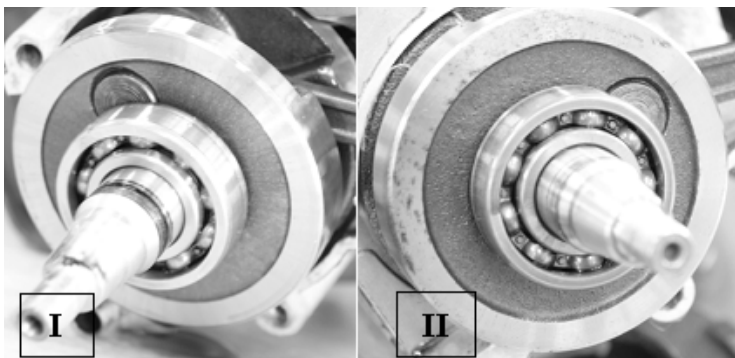
düüsi väike ava tekitas lisaks probleemi, et õli settis kütusest välja ujukikambri põhja, rikkudes toitesüsteemi töö ja põhjustades mootori seiskumise. Õli settimisel karburaatori ujukikambri põhja, kasutades bioetanoolkütuse segu, on probleem osaliselt tingitud ainete segunemastusest. Teises testis ümber ehitatud karburaatoriga õli väljasettimist kütusest ei toimunud ja mootor töötas stabiilselt. Saadud tulemuse põhjal võib öelda, et ümberehitatud karburaatoriga mootoris sobib kasutada õli ja bioetanooli kütusesegu. Kütusekulu  $B_{fet}$  vähenes bioetanoolkütuse segu kasutamisel teisel katsel (test 2) 19%, võrreldes esimese katsega (test 1) (joonis 3). Ümberehituse tulemusena vähenes bioetanoolkütusega töötava mootori erikulu  $bf_{et}$  275  $g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$ . Kütusekulu analüüsi tulemusena võib öelda, et kui soovitakse parandada ökonoomsust, on bioetanooli kasutamisel generaatoris vajalik teostada toiteaparatuuri ümberehitus ja seadistamine.

Bioetanoolkütuse segu määrimisomaduste ja korrosiooni mõju uurimisel olid vaadeldavateks kuluvdetailideks silindri pinnad, kolvirõngad, kolvisõrm, kepsu kaela ava ja väntvõlli laagrid. Mikrometraaž teostati kuluvdetailidele kolmel korral. Esmane mõõtmine toimus enne katsetuste algust, teine mõõtmine test 1 ja test 2 vahepeal ning kolmas mõõtmine katsetuse lõppedes. Mõõdeti kuluvdetailide geomeetriselised parameetrid ja pinnakaredused. Tulemuseks oli tavakütuse seguga töötanud generaatori silindri läbimõõdu vähenemine 6  $\mu m$ , samas kui bioetanoolkütuse seguga mootori silindri läbimõõdu suurenes mõnevõrra (7  $\mu m$ ). See on tingitud termilistest paisumistest mootori tööprotsessi käigus. Sarnased tulemused olid ka kolvirõngaste mõõtmete hindamisel, kus mõnevõrra suurem kulumine oli bioetanoolkütuse segu kasutamisel. Samas aga oli mootorite kompressioon suurenenud võrdselt 100 kPa. Detailide tööpindasid hinnates võib öelda, et tavakütuseseguga kasutamisel esines kütuse jääkide ladestumist. Teisalt on silindri ja kolvi mõõtmete muutuse erinevus tingitud sõltuvalt kütuste põlemistemperatuuride erinevustest. Parema tulemuse, vaadeldes kütuse jääkide ladestumist kolvi

pinnale, andis bioetanoolkütuse segu kasutamine, mis on ka vaadeldav joonisel 4 pärast 200 tundi katseid. Test 2 tulemusena on pärast 300 töötundi märgata korrosiooni teket II generaatori bioetanooliga kokkupuutuvatel detailidel (joonis 5). Põhjuseks on siin generaatori ühekuuline seisuperiood pärast mootorkatseid ja enne mikrometraaži, mis on aga seadme tavakasutusele iseloomulik. Korrosiooni mõjust tingituna on plaanis edaspidi uurida ja välja töötada korrosioonivastased lisandid, mis põhinevad taastuvatel toorainetel.



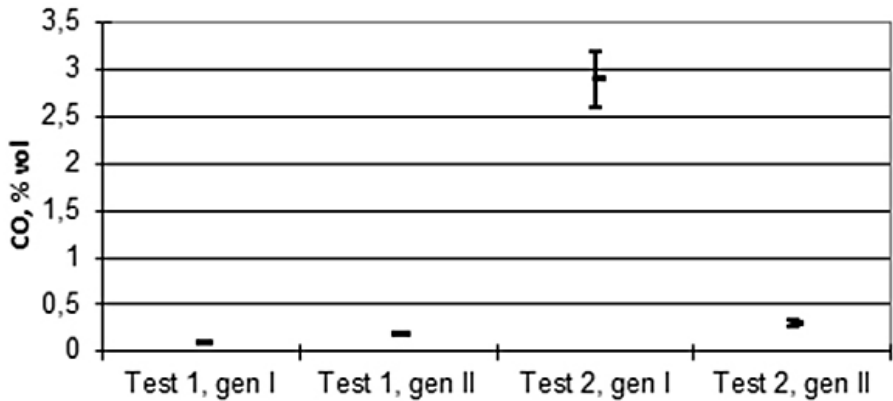
Joonis 4. Kütusejääkide ladestumine generaatorite kolbidele  
Figure 4. Deposition of fuel residues on the generator pistons



Joonis 5. Korrosiooni tekkimine generaatorite töödetailele  
Figure 5. Corrosion formation on the generator details

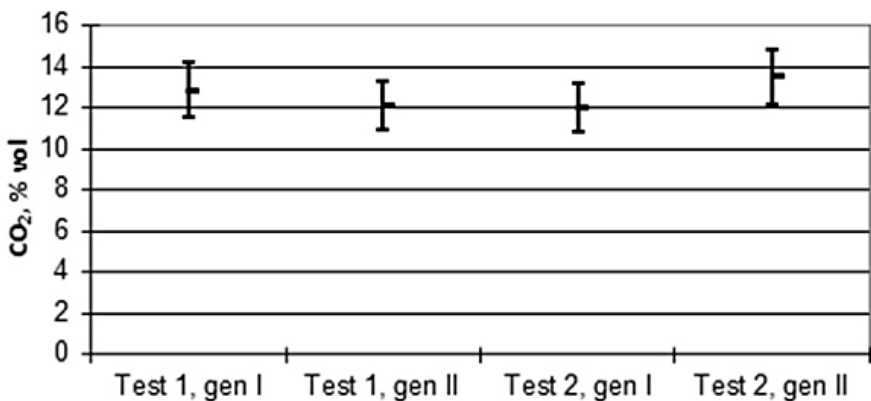
Heitgaasides sisalduvate süsinikmonooksiidi(CO)ühendite analüüsimisel (joonis 6) näitab test 1 bioetanooli kasutamisel 30% kasvu, võrreldes tavakütusega. Samas, vaadeldes test 2 tulemusi, on näha CO-ühendite vähenemist üle kümne korra, võrreldes bioetanooli ja tavakütust. See on tingitud kvaliteetsemast küttesegu moodustumisest ja seeläbi paremast põlemisprotsessi toimimisest. CO-ühendite märgatav suurenemine tavakütuse

kasutamisel teisel katsel on seotud õli põlemisjääkide ladestumisega, mis rikub põlemisprotsessi. Seda kinnitab ka HC osakaalu suurenemine, kuid antud probleem vajab kindlasti edaspidi täiendavat uurimist.



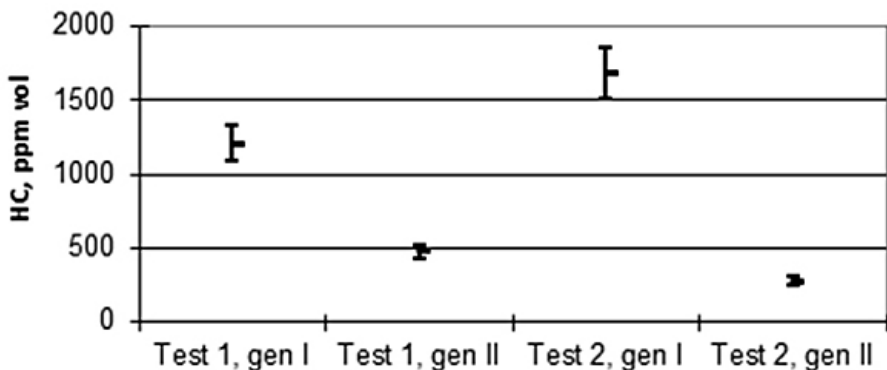
Joonis 6. CO osakaalude võrdlus heitgaasides  
Figure 6. Proportion of CO in exhaust gases

CO osakaalu muutudes muutuvad ka süsinikdioksiidi ( $\text{CO}_2$ ) kogused heitgaasides (joonis 7). Test 1 tulemuses on näha bioetanooli kasutamisel 6,3% madalam  $\text{CO}_2$ -ühendite hulk, võrreldes bioetanooli ja tavakütust. Teises testis on  $\text{CO}_2$  näitaja aga 12,7% suurenenud, võrreldes tavakütusega.



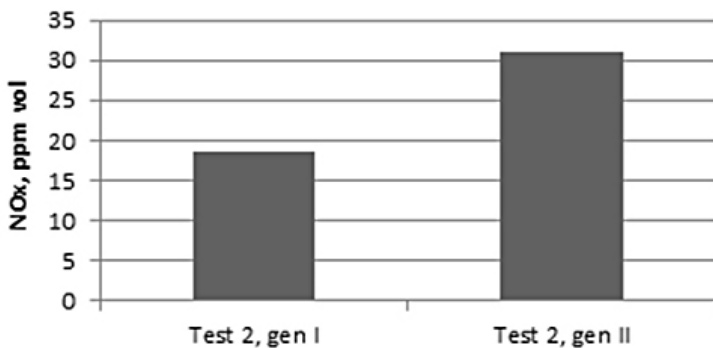
Joonis 7.  $\text{CO}_2$  osakaalude võrdlus heitgaasides  
Figure 7. Proportion of  $\text{CO}_2$  in exhaust gases

Lisaks iseloomustab põlemisprotsessi paremat toimimist ka vesinikuühendite (HC) osakaalu kordades vähenemine, võrreldes test 1 ja test 2 (joonis 8). Ka siin on paremad tulemused test 2 puhul, mis näitab kütuseosakeste täielikumat põlemist ja on seotud ka otseselt kütuse kuluga  $B_f$  (joonis 3).



Joonis 8. HC osakaalude võrdlus heitgaasides  
Figure 8. Proportion of HC in exhaust gases

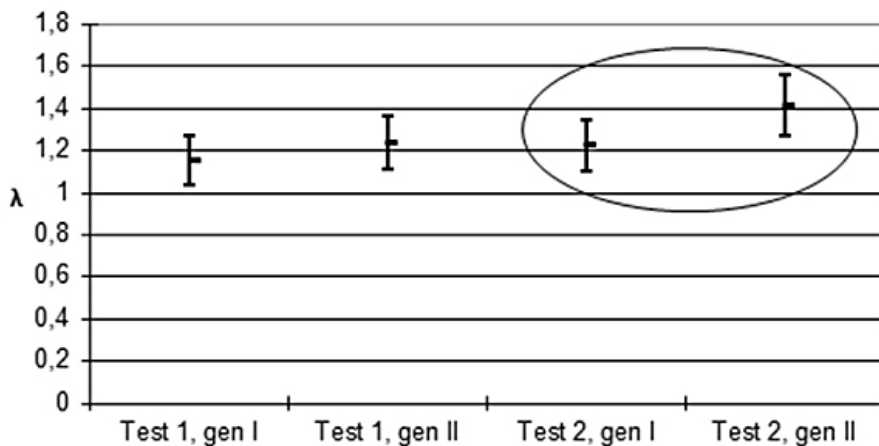
Sisepõlemismootori heitgaasides sisalduvatest peamistest ühenditest on inimese tervisele kahjulikud peale CO ja HC veel lämmastikoksiidid ( $\text{NO}_x$ ). Lämmastikoksiidiühendite suur osakaal on vastuolus üldiste tingimustega, kus põlemiskambri temperatuuri langedes on emissioon madalam. Kõrgem  $\text{NO}_x$ -sisaldus bioetanoolkütuse segu kasutamisel on tingitud varajasest eelsüütenurgast, mida antud katsetel ei muudetud. Optimaalne eelsüütenurk tagab kütuse ökonoomse kasutamise mootoris. Tagamaks  $\text{NO}_x$  vähenemise, tuleb eelsüütenurk muuta hilisemaks. Joonisel 9 on esitatud  $\text{NO}_x$ -ühendite osakaal teisel testkatsetel.



Joonis 9.  $\text{NO}_x$  osakaalude võrdlus erinevate kütuste puhul teisel testkatsetel  
Figure 9. Comparison of  $\text{NO}_x$  proportions during second test run

Kasutades teisel testkatsetel bioetanoolkütuse segu, kasvas on  $\text{NO}_x$ -ühendite osakaal tavakütusega võrreldes 67,6%. Saadud tulemuste põhjal võib öelda, et bioetanoolkütuse segu kasutuselevõtmise arendamisel on kindlasti vajalik toiteaparatuuri ümberehitus ja süütesüsteemi seadistamine.

Ülemäärane hapnikukogus (joonis 10) väljalasketorustikus (test 2) võib põhjustada termilist järelreaktsiooni, suurendades  $\text{NO}_x$ -de osakaalu heitgaasides.  $\text{NO}_x$  heitmete vähendamise üheks võimaluseks on langetada põlemistemperatuuri, mis omakorda suurendab kütusekulu ja HC heitmete osakaalu.



Joonis 10. Liigõhuteguri võrdlus erinevatel katsetel  
Figure 10. Comparison of excess-air coefficient during different test runs

Seega vajab heitgaasides sisalduvate jääkainete moodustumise uurimine kindlasti täiendavaid katsetusi ja analüüse. Mootorkatsetel saadud andmete analüüsimise tulemusena on põhjalikumalt vaja uurida  $\text{NO}_x$ -ühendite osakaalu kujunemist. Peamiseks põhjuseks on lämmastikdioksiid ( $\text{NO}_2$ ), mis on eriti mürgine lämmastiku ja hapniku ühend mootori heitgaasides.

Antud uurimistöö lõppeesmärk on välja töötada bioetanoolkütuse segu, mis põhineks teise põlvkonna bioetanoolil ja lisanditel, ning mille tootmiseks kasutatav tooraine põhineks taastuvatel ja jätkusuutlikel ressurssidel.

## Järeldused

1. Bioetanooli ja Addinoli kahetaktilise mootori õli MZ 408 segamisega saadi piisavate määrimisomadustega kütusesegu.

2. Tuginedes testi tulemustele, on õli ja bioetanooli suhe soovitatavalt 1/50, sama nagu õlitootja on ette näinud mootoribensiini kasutamisel.
3. Kulumise minimaalseid probleeme täheldati bioetanoolkütuse segu kasutamisel, samas mootori detailide tööpindadele ladestus põlemisjääke vähem, võrreldes tavakütuse segu kasutamisega (joonis 4).
4. Bioetanoolkütuse segu kasutamisel on probleemiks korrosioon, mis vajab lahenduse leidmist (joonis 5).
5. Heitgaasides sisalduvate kahjulike ühendite osakaal on bioetanoolkütuse segu kasutamisel modifitseeritud generaatoris väiksem (CO 89,6 % ja HC 83,5%), võrreldes tavakütuse segu kasutamisega (joonis 6, 8). Täiendavat uurimist vajab NO<sub>x</sub>-de osakaal heitgaasides, mille osakaal oli 67% kõrgem, võrreldes tavakütuse seguga (joonis 9).
6. Bioetanoolkütuse seguga töötav kahetaktiline sisepõlemismootor vajab karburatori ümberehitust ja süütesüsteemi täiendavat reguleerimist, et saavutada minimaalne kütusekulu, vältida õli eraldumist bioetanoolist ning tagada heitgaasidele ettenähtud normid.
7. Lisaks mootori seadistamisele on vajalik edasi arendada bioetanooli kasutamist mootorikütusena ja töötada välja lisandid, mis põhineksid taastuvatel ressurssidel, nagu teise põlvkonna bioetanooli tootmine, mille tooraine ei konkureeri inimese toidusega.

## Tänuõnad

Autorid tänavad Addinol Lube Oil OÜ-d koostöö eest antud uurimistöö läbiviimisel. Eeltoodud artikkel on avaldatud konverentsikogumikus „[Engineering for Rural Development](#)” (2014).

## Kasutatud kirjandus

- Mikkola, H., J.; Ahokas, J. 2011. Renewable energy from agro biomass. – *Agronomy Research* 9(1), pp. 159–164.
- Ritslaid, K.; Küüt, A.; Olt, J. 2010. State of the Art in Bioethanol Production. – *Agronomy Research* 8(1), pp. 236–254.
- Küüt, A. 2013. Characteristics of bioethanol fuel obtained from lignocellulose biomass in internal combustion reciprocating engines with spark- and compression-ignition. Estonian University of Life Sciences. Tartu: Ecoprint, pp. 25-28.
- Patent EE 05665 B1. 2013. Formation method of fuel-air mixture of reciprocating engine and flexible-fuel system. [http://www.epa.ee/ul/doc/valjaanded/patendi-leht2013\\_03.pdf](http://www.epa.ee/ul/doc/valjaanded/patendi-leht2013_03.pdf).



- Labeckas, G.; Slavinskas, S.; Mazeika, M., Laurinaitis, K. 2010. Performance and Emission Characteristics of Diesel Engine Filled with Ethanol-Diesel-Biodiesel Blend. *Engineering for Rural Development, Latvija*, pp. 266–271.
- Olt, J., Mikita, V., Sõõro, T., Küüt, A., Tamm, R., Raidla, E., Ilves, R., Ristlaid, K., Raudsepp, V., Viitkar, U. 2009. Bioetanol ottomootori kütusena. *Agraarteadus: journal of agricultural science (2)*, pp 26-35.
- Hilbert, D. 2011. High. Ethanol Fuel Endurance: A Study of the Effects of Running Gasoline with 15% Ethanol Concentration in Current Production Outboard Four-Stroke Engines and Conventional Two-Stroke Outboard Marine Engines. National Renewable Energy Laboratory, Colorado.
- Olt, J., Mikita, V., Ilves, R., Küüt, A. 2011. Ethanol as an Additive Fuel for Diesel Engines. – *Engineering for Rural Development*, pp. 248–253.
- Bremers, G., Birzietis, G., Blija, A., Danilevics, A., Skele, A. 2011. Scheme of technology for congruent dehydration of bioethanol in semi-dry way. – *Engineering for Rural Development, Jelgava, Latvia University of Agriculture*, pp. 244–247.
- Demirbas, A. 2009. Green energy and technology 3. *Biofuels*, Springer-Verlag, pp. 96-99.
- Standard ASTM D445 ASTM D445 Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids.
- GUNT Hamburg. Test stand GUNT TM 260.03. <http://www.mutiaranata.com/product/detail/tm-260-03-experimental-module-pin-on-disc> (15.11.2013).
- Merker, G. P., Schwarz, C., Teichmann, R. 2012. *Grundlagen Verbrennungsmotoren. Praxis, ATZ, MTZ-Fachbuch*, Germany, pp 20.
- Taraba, J. L., Turner G. M., Razov R. The use of ethanol as an unmixed fuel for internal combustion engines *Energy in agriculture*, Department of Agricultural Engineering University of Kentucky, Lexington, 1981, pp. 6-8.
- Anderson P., Tamminen, J., Standström, C. E. 2002. Piston ring tribology. *VTT Research notes 2178*, Otamedia Oy, Espoo, p. 105.

## **IMPACT OF BIOETHANOL FUEL ON OUTPUT PARAMETERS OF TWO-STROKE RECIPROCATING ENGINE**

Arne Küüt, Risto Ilves, Jüri Olt

This is a preliminary study of a more extensive research on the possibilities of using second generation bioethanol as a fuel. The main intention is to research, develop and implement the possibilities of using bioethanol fuel in agriculture and forest management. In the framework of this research, bioethanol is used as one of the main components in a fuel mixture for a small volume two-stroke internal combustion engine. The research methodology used was mainly based on testing. The article analyses the results achieved in testing the engine. The aim of the study was to assess the effect of bioethanol on the output and economy parameters of the engine and on the composition of exhaust gases. The results of the tests and the discussion are presented in comparison with regular fuel. As a result of the study, it can be said that using bioethanol and two-stroke engine oil as a fuel mixture was not accompanied by a quick wear of the elements of the engine, but by corrosion. The analysis of the harmful substances contained in the exhaust emissions revealed a significant increase in nitric oxides; yet, no significant reduction in the amount of carbon monoxide. From the perspective of economy, the fuel system of two-stroke engines must be reconstructed in order to achieve better results.

# BIOKEEMILISE HAPNIKUTARBE SENSOR-RIVID

Kätlin Pitman, Merlin Raud, Timo Kikas

Eesti Maaülikool, Tehnikainstituut, Fr.R.Kreutzwaldi 56, 51014 Tartu, Eesti  
katlin.pitman@emu.ee, tel 731 3315

## **Annotatsioon**

Biokeemiline hapnikutarve (BHT) on üks enam kasutatavaid vee kvaliteedi hindamise parameetreid. BHT iseloomustab vee orgaanilise reostuse taset ning tulemuste saamiseks traditsioonilise BHT-testiga kulub 5–7, vahel isegi kuni 21 päeva. Nii pikk inkubatsiooniaeg ei ole sobilik reoveepuhastite ja tööstuslike protsesside järelvalveks. Kiiremaks BHT määramiseks on välja pakutud mitmeid biosensoreid, kuid neilgi on piiranguid, nagu lühike eluiga, piiratud substraadiala, täpsus jne. Mõningaid neist piiranguist on võimalik välistada, kasutades mikroobsensor-rivisid. Sensor-rivid, mis koosnevad erinevatel bakterikultuuridel põhinevatest sensoritest, võimaldavad määrata proovis laiemat substraadispektrit, kuid säilitavad üksiku kultuuri sensori pika eluea. Käesoleva artikli eesmärk on arutleda sensor-rivi kasutamise võimalikkuse üle BHT määramisel.

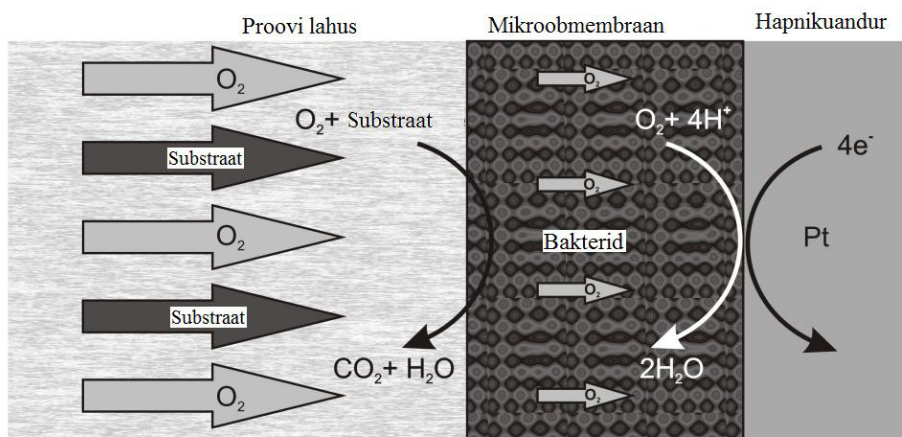
Märksõnad: biokeemiline hapnikutarve, biosensor, sensor-rivi, BHT sensor-rivi.

## **Sissejuhatus**

Üks tähtsaimaid vee kvaliteedi parameetreid on biokeemiline hapnikutarve (BHT). BHT määramine on empiiriline test, mis koosneb standardiseeritud laboratoorsetest toimingutest, määramaks suhtelist hapnikutarvet reovees ja heitvees. BHT-testi tulemused iseloomustavad biokeemiliselt oksüdeeritava orgaanilise aine kogusisaldust vees (APHA 1985) ja vee isepuhastumisvõimet. BHT-test on kõige laialdasemalt kasutatav meetod orgaanilise reostuse mõõtmiseks, seda on võimalik kasutada väga erinevate proovide korral ja testimine on lihtne, sest ei ole vaja kulukat tehnikat. Kahjuks pole see pika inkubatsiooniaja tõttu kasutatav tööstuslike protsesside järelvalveks, kus kiire tagasiside on oluline (Raud jt. 2012). Üks viis üle saada pikast ooteajast mõõtmise ja tulemuste saamise vahel, on biosensorite kasutamine. Olenevalt mõõtmistehnikast annavad BHT biosensorid tulemuse 5–30 minutiga (Kim 2006). Selle artikli eesmärk on anda ülevaade BHT biosensoritest ja kaaluda võimalusi sensor-rivi kasutamiseks BHT mõõtmisel.

## BHT biosensoriid

Esimest BHT biosensorit esitles Karube 1977. aastal (Karube jt. 1977). See sensor koosnes lahustunud hapnikuandurist ja membraanist, millele oli immobiliseeritud pärm *T. cutaneum*. Järgnevalt on kasutamist leidnud mitmeid erinevaid bakterikultuure, aga ka erinevate bakterikultuuride segusid sisaldavad biosensoriid (Liu & Mattiasson 2002). BHT-sensorigil, mis põhineb ühel puhtal mikroobikultuuril, on suhteliselt hea stabiilsus ja pikk kasutusaeg, aga sensori BHT väärtus on limiteeritud kitsa substraadispektriga (Raud jt. 2012) ning see võib viia BHT alahindamiseni. Laiema substraadispektri saamiseks kasutatakse BHT-sensorigi konstrueerimisel mitmete mikroobikultuuride segusid (Suriyawattanakul jt. 2002), kuid segakultuuridega biosensorigil on väiksem stabiilsus ja lühem kasutusaeg kui ühe puhta kultuuriga biosensorigil.



Joonis 1. Amperomeetrilise mikroob-biosensorigi töö põhimõte

Figure 1. Basic principle of microbial biosensor based on amperometric transducer

Enim kasutatud, biofilmi tüüpi BHT biosensorigi töö põhimõtet illustreerib joonis 1. Mikroorganismid on immobiliseeritud või asetatud hapnikuandurile. Puhverlahusesse asetatud biosensor omandab kindla signaali, mis iseloomustab mikroorganismide tühihingamist. Kui lahusesse lisatakse biolagunevaid ühendeid sisaldav proov, siis mikroorganismid hakkavad neid ühendeid lagundama ja selle käigus hapnikutarbimine suureneb, mis viib uue püsiva, kuid mõnevõrra madalama signaali püstitumiseni. Mõõdetud lahustunud hapniku kontsentratsiooni muutus on proportsionaalne lisatud biolaguneva aine hulgaga ning selle kaudu on võimalik arvutada proovi BHT väärtust (Liu & Mattiasson 2002).

Sensor-BHT väärtus ei lange alati traditsioonilise BHT väärtusega kokku, sest need põhinevad erinevatel mõõtmismetoodikatel. Traditsioonilisel BHT-testil on inkubatsiooniajaks 5 või 7 päeva. Selle aja jooksul on mikroorganismidel aega lagundada kergesti lagundatavaid ühendeid ja sünteesida ensüümid, millega lagundada ka vastupidavaid ühendeid. Biosensori lühikese mõõtmisaja jooksul immobiliseeritud mikroorganismid omastavad ja lagundavad vaid kergesti lagundatavaid ühendeid, mis võib viia BHT väärtuse alahindamiseni. Seda saab vältida sobiva kalibreerimislahuse ja ka sobiva mikroorganismide kultuuri valikuga.

### **Biosensor-rivid**

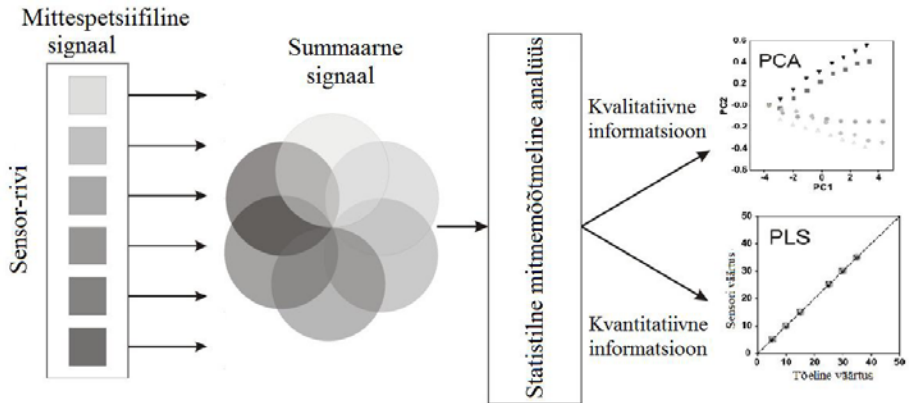
Sensor-rivi tööpõhimõte on analoogne imetajate haistmis- ja maitsmiselunditega, kus miljonid mittespetsiifilised retseptorid reageerivad erinevatele ühenditele. Vastavalt IUPAC-i (*The International Union of Pure and Applied Chemistry*) definitsioonile on sensor-rivi mitmete sensoritega süsteem, mis koosneb madala selektiivsusega sensoritest ja kasutab keerulisi matemaatilisi protseduure signaali töötlemiseks (del Valle 2010). Gaaside jaoks mõeldud sensor-rivi nimetatakse tehisinaks ja vedelike jaoks mõeldud tehiskeeleks (Escuder-Gilabert & Peris 2010).

Sensor-rivis saab rakendada mitmeid muundureid, mõõtmismeetodeid ja biotundlike elemente. Kõige laialdasemalt levinud muundurid on elektrokeemilised (del Valle 2010) ja optilised sensorid (Krantz-Rülcker jt. 2001). Sensor-rivis võib sõltuvalt ülesandest olla 4 kuni 40 sensorit. Tavaliselt koosneb sensor-rivi rohkematest sensoritest võrreldes määratavate ainetega ja seega on rivi võimeline lahendama erinevaid analüütilisi ülesandeid (Vlasov jt. 2005).

Tehisnina- ja tehiskeelesüsteemide kõige tüüpilisem ühine tunnus on, et madala selektiivsusega ja rist-tundlikkusega sensoreid kasutatakse koos ning nende signaali analüüsitakse mitmemõõtmelise andmeanalüüsi meetoditega (Vlasov jt. 2005). Rist-tundlikud sensorid reageerivad mitmele erinevale ühendile lahuses – sellega loob sensor-rivi keemilise pildi proovist (Hruškar jt. 2010). Sellisel juhul on iga individuaalse sensori piiratud selektiivsus kompenseeritud andmetöötlusega, mis võimaldab määrata proovi koostist (del Valle 2010). Sensor-rivi peamine tööpõhimõte on toodud joonisel 2.

### **Biosensor-rivi andmeanalüüs**

Sensor-rivi kasutamise korral võivad erinevad sensorid reageerida erinevatele ühenditele ja seega saadakse tohutu hulk mitmemõõtmelist informatsiooni. Selliseid keerukaid andmeid saab töödelda, kasutades mitmemõõtmelisi andmeanalüüsi meetodeid (del



Joonis 2. Sensor-rivi tööpõhimõte  
Figure 2. The working principle of a sensor array

Valle 2010). Biosensor-rivide kasutamine koos mitmemõõtmelise analüüsiga võimaldab sensor-rivi keerukad tulemused muundada kergemini esitletavasse formaati ning eraldada sensor-rivi signaalist nii kvalitatiivset kui ka kvantitatiivset informatsiooni proovi koostisest (Solna jt. 2005).

Kvalitatiivset informatsiooni sensor-rivi andmetest kasutatakse liigitamiseks ja proovide tuvastamiseks. Kõige kasutatavam meetod selleks on peakomponent-analüüs (PCA) (Riul Jr jt. 2010). PCA on lineaarne mitme muutujaga analüüsimeetod, mis põhineb maatriksalgebral (Massart 2004). PCA võimaldab uurida mitmemõõtmelisi andmeid, vähendada müra ilma informatsioonikaota ja määrata eraldiseisvate koostisosade tähtsust (Riul Jr jt. 2010). PCA ei nõua eelnevat teadmist proovi koostise kohta ja andmed saab esitada võimalikult väikse hulga muutujatega.

Kvantitatiivse informatsiooni saamiseks biosensor-rivi signaalist on võimalik rakendada mitmemõõtmelisi kalibreerimismeetodeid, selleks et ühendada vaadeldud signaalid analüüdi kontsentratsiooniga. Kalibreerimiseks on kasutusel mitmed regressioonimeetodid, mis saavad olla kas lineaarsed või mittelineaarsed (Nascu jt. 1999). Kõige kasutatavamad meetodid on osaline vähim ruutude meetod (PLS) ja peakomponent-regressioon (PCR), mis on mõlemad faktoritel põhinevad (Correia 2005), lineaarsed kalibreerimismeetodid.

### **BHT sensor-rivid**

BHT määramiseks on kasutatud mitmeid sensor-rivisid, nende hulgas on nii keemilisi sensorrivisid kui ka biosensor-rivisid. Keemilistest sensor-rividest on enim rakendust

leidnud erinevate juhtivate polümeeridega kaetud elektroodidest koosnevad sensor-rivid (Stuetz jt. 1999; Onkal-Engin jt. 2005), mida kasutatakse peamiselt uuritava lahuse kohal gaasifaasis lenduvate ühendite uurimiseks, kuid antud tüüpi sensor-rivid valdavalt alahindavad BHT väärtust, kuna keerulisema struktuuriga orgaanilised ühendid pole lenduvad ja seega jäävad analüüsimata. Teine tüüp keemilisi sensor-rivisid on erinevatest metallidest elektroodid (Campos jt. 2012), mida on võimalik kasutada ainult pool-kvantitatiivseks analüüsiks, kuna need pole piisavalt spetsiifilised. Erinevalt metallelektroodidest on ensüümidel põhinevad biosensor-rivid väga spetsiifilised, kuid nende kasutamine biosensor-rivis on raskendatud, kuna ensüümid on liiga tundlikud toksiliste ühendite suhtes ja ei anna stabiilset signaali pikema aja jooksul (Tønning jt. 2005).

Paremaid tulemusi on saadud mitmesuguste mikroorganismide kultuuride BHT sensor-rividega (König jt. 2000; Raud & Kikas 2013; Sakaguchi jt. 2007; Yang jt. 1997). Üht esimest immobiliseeritud mikroorganismidega biosensor-rivi esitlesid Yang ja tema kaastöötajad, kes kasutasid õhukese kile tehnoloogiat väikse Clark-tüüpi hapnikuelektroodi valmistamiseks. Sensorit kasutati reaalseste proovide mõõtmiseks ja tulemused erinesid traditsioonilisest BHT5 väärtusest 1–50% (Yang jt. 1997). Lisaks on kasutatud biosensor-rivis erinevaid luminescentsbaktereid (Sakaguchi jt. 2007), PAH-lagundavat pärmi (König jt. 2000) ja erinevaid raskesti lagundatavaid ühendeid lagundavaid bakterikultuure (Raud ja Kikas 2013). Paremaid tulemusi tööstuslike reovete analüüsimisel võimaldas saada erinevate pool-spetsiifiliste mikroorganismide kasutamine biosensorites, mis võimaldas mitmemõõtmelist analüüsi kasutades määrata proovide täpseid BHT7 väärtusi ning tuvastada ka proovide koostise alusel nende päritolu (Raud & Kikas 2013).

## **Arutelu**

Esimene BHT biosensor arendati välja 38 aastat tagasi, kuid uute seadmete uuringud ja arendamine käivad endiselt. Kuna enamik BHT biosensoritest kasutab mikroorganismide bioloogilise äratundmis-süsteemina, on üks uurimisvaldkondi sobivama mikroobkultuuri leidmine kindla analüütilise eesmärgi täitmiseks. Ühel kultuuril ei ole piisavalt laia substraadispektrit, et analüüsida mitmesuguseid proove. Selle probleemi ületamiseks on BHT mõõtmiseks kasutusele võetud mitmeid sensor-rivisid. Biosensor-rivid, mis kasutavad mitmeid mikroorganismide, võimaldavad mõõta mitme kultuuriga samaaegselt, mis võimaldab säästa aega, kuna informatsioon mitmelt biosensorilt tuleb paralleelselt ja annab keerukama signaali. Kui sellele signaalile rakendada mitmemõõtmelist statistilist analüüsi, on võimalik saada nii täpsemat kvantitatiivset kui ka kvalitatiivset informatsiooni.

Uued andmeanalüüsi meetodid võimaldavad esitleda biosensor-rivi tulemusi teisel viisil. On näidatud, et mitmed mitmemõõtmelise andmeanalüüsi meetodid võimaldavad saada rohkem informatsiooni kui eales varem. Mitmed rühmitamis-, kalibreerimis- ja informatsiooni töötlemismeetodid on saadaval, mis võimaldavad saada täpsemaid tulemusi biosensorrivi signaalist.

Mitmed uued tehnoloogiad, nagu ekraanprintimine ja mikrotöötlemine võimaldavad toota miniatuurseid biosensor-rivisid. Väiksemad biosensor-rivid viivad väiksema kemikaalikooguse kasutamiseni ja sellest tulenevalt odavamale mõõtmistehnoloogiani. Lisaks on võimalik väikestest sensoritest arendada kaasaskantavaid seadmeid, mis võimaldab mõõtmisi teha kohapeal. Selline biosensor-rivi annab reaalaajas informatsiooni reovee parameetrite kohta ja võimaldab juhtida töötlemisjaamu üle interneti. Automatiseeritud, täielikult arvuti poolt kontrollitud mõõtmine on vähem tööjõudu nõudev ja seega mõõtmistäpsus kasvab, kuna inimese tehtavad vead vähenevad.

### **Kokkuvõte**

Biosensoreid on uuritud enam kui kolmkümmend aastat. Selle aja jooksul on välja arendatud mitmed biosensorid erinevate ühendite ja parameetrite määramiseks. Viimasel aastakümnel on välja arendatud mitmed sensor-rivid, mis koosnevad mitmest erinevast sensorist ja kasutavad signaali analüüsiks mitmemõõtmelise analüüsi. Sensor-rivisid on kasutatud BHT määramiseks, kõige paljulubavamad on mikroorganismidel põhinevad sensor-rivid. Tuleviku biosensor-rivi on väike, täpne ja täielikult automatiseeritud.

### **Tänuavaldus**

Autorid tunnustavad ETF-i, mis toetas töö tegemist grandiga ETF 9136 rahastamise kaudu.

### **Kasutatud kirjandus**

- APHA (1985). Standard methods for examination of water and wastewater. Washington American Public Health Association. Bourgeois, W. & Stuetz, R. M. (2002). Use of a chemical sensor array for detecting pollutants in domestic wastewater. – Water Research, 36(18): 4505–4512.
- Campos, I., Alcañiz, M., Aguado, D., Barat, R., Ferrer, J., Gil, L., Marrakchi, M., Martínez-Mañez, R., Soto, J. & Vivancos, J.-L. 2012. A voltammetric electronic tongue as tool for water quality monitoring in wastewater treatment plants. – Water Research, 46(8): 2605–2614.
- Correia, D. P. A., Magalhães, J. M.C.S., Machado A. A.S.C. 2005. Array of potential-



- metric sensors for simultaneous analysis of urea and potassium. – *Talanta* 67: 773–782.
- del Valle, M. 2010. Electronic Tongues Employing Electrochemical Sensors. – *Electroanalysis* 22(14): 1539–1555.
- Escuder-Gilabert, L. & Peris, M. 2010. Review: Highlights in recent applications of electronic tongues in food analysis. – *Analytica Chimica Acta* 665(1): 15–25.
- Hruškar, M., Major, N. & Krpan, M. 2010. Application of a potentiometric sensor array as a technique in sensory analysis. – *Talanta* 81(1–2): 398–403.
- Karube, I., Matsunaga, T., Mitsuda, S. & Suzuki, S. 1977. Microbial electrode BOD sensors. – *Biotechnology and Bioengineering* 19(10): 1535–1547.
- Kim, B. H., Chang, I. S. & Moon, H. 2006. Microbial Fuel Cell-Type Biochemical Oxygen Demand Sensor. – *Encyclopedia of Sensors X*: 1–12.
- Krantz-Rülcker, C., Stenberg, M., Winqvist, F. & Lundström, I. 2001. Electronic tongues for environmental monitoring based on sensor arrays and pattern recognition: a review. – *Analytica Chimica Acta* 426(2): 217–226.
- König, A., Reul, T., Harmeling, C., Spener, F., Knoll, M. & Zaborosch, C. 2000. Multimicrobial Sensor Using Microstructured Three-Dimensional Electrodes Based on Silicon Technology. – *Analytical Chemistry* 72(9): 2022–2028.
- Liu, J. & Mattiasson, B. 2002. Microbial BOD sensors for wastewater analysis. – *Water Research* 36(15): 3786–3802.
- Massart, D. L. H. & Vander, Y. 2004. From Tables to Visuals: Principal Component Analysis, Part 1. – *LC – GC Europe* 17(11): 586–591.
- Nascu, H., Jantschi, L., Hodisan, T., Cimpoi, C. & Cimpan, G. 1999. Some applications of statistics in analytical chemistry. – *Reviews in Analytical Chemistry* 18(6): 409–456.
- Onkal-Engin, G., Demir, I. & Engin, S. N. 2005. Determination of the relationship between sewage odour and BOD by neural networks. – *Environmental Modelling & Software* 20(7): 843–850.
- Raud, M. & Kikas, T. 2013. Bioelectronic tongue and multivariate analysis: A next step in BOD measurements. – *Water Research* 47(7): 2555–2562.
- Raud, M., Tutt, M., Jõgi, E. & Kikas, T. 2012. BOD biosensors for pulp and paper industry wastewater analysis. – *Environmental Science and Pollution Research* 19(7): 3039–3045.
- Riul Jr, A., Dantas, C. A. R., Miyazaki, C. M. & Oliveira Jr, O. N. 2010. Recent advances in electronic tongues. – *Analyst* 135(10): 2481–2495.
- Sakaguchi, T., Morioka, Y., Yamasaki, M., Iwanaga, J., Beppu, K., Maeda, H., Morita, Y. & Tamiya, E. 2007. Rapid and onsite BOD sensing system using luminous

- bacterial cells-immobilized chip. – *Biosensors and Bioelectronics* 22(7): 1345–1350.
- Solna, R., Dock, E., Christenson, A., Winther-Nielsen, M., Carlsson, C., Emnéus, J., Ruzgas, T. & Skladal, P. 2005. Amperometric screen-printed biosensor arrays with co-immobilised oxidoreductases and cholinesterases. – *Analytica Chimica Acta* 528(1): 9–19.
- Stuetz, R. M., George, S., Fenner, R. A. & Hall, S. J. 1999. Monitoring wastewater BOD using a non-specific sensor array. – *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 74(11): 1069–1074.
- Suriyawattanakul, L., Surareungchai, W., Sritongkam, P., Tanticharoen, M. & Kirtikara, K. 2002. The use of co-immobilization of *Trichosporon cutaneum* and *Bacillus licheniformis* for a BOD sensor. – *Applied Microbiology and Biotechnology* 59(1): 40–44.
- Tønning, E., Sapelnikova, S., Christensen, J., Carlsson, C., Winther-Nielsen, M., Dock, E., Solna, R., Skladal, P., Nørgaard, L., Ruzgas, T. & Emnéus, J. 2005. Chemometric exploration of an amperometric biosensor array for fast determination of wastewater quality. – *Biosensors and Bioelectronics* 21(4): 608–617.
- Vlasov, Y., Legin, A., Rudnitskaya, A., Natale, C. D. & D’Amico, A. 2005. Nonspecific sensor arrays (“electronic tongue”) for chemical analysis of liquids (IUPAC Technical Report). – *Pure and Applied Chemistry* 77(11): 1965–1983.
- Yang, Z., Sasaki, S., Karube, I. & Suzuki, H. 1997. Fabrication of oxygen electrode arrays and their incorporation into sensors for measuring biochemical oxygen demand. – *Analytica Chimica Acta* 357(1–2): 41–49.

## BIOCHEMICAL OXYGEN DEMAND SENSOR ARRAYS

K. Pitman, M. Raud, T. Kikas

Biochemical oxygen demand (BOD) is one of the most widely utilised parameters in water quality evaluation. BOD, as a parameter, illustrates the amount of organic compounds, susceptible to biochemical degradation, in the water. The duration of BOD test is 5–7 days. Incubation time this long is not acceptable for monitoring purposes or system control. In order to shorten the BOD measurement time, various biosensors have been developed. However, BOD biosensors have several limitations like short lifetime, limited substrate range, precision etc. Some of those limitations can be overcome by using microbial sensor arrays. Such bioelectronic tongues can achieve much wider substrate range and still maintain long lifetime of a single culture sensor. This is achieved by separating different cultures from each other in the array. Sensor-arrays have been used for BOD measurements however, there is room to go farther. Future biosensor-array would be small, fully automated, and precise.



