

# **TEUK XIII**

## **TAASTUVATE ENERGIAALLIKATE UURIMINE JA KASUTAMINE**

KOLMETEISTKÜMNENDA KONVERENTSI KOGUMIK



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

TARTU, ESTONIA, 2011

Toimetajad / Compiled by: Elis Vollmer, Argo Normak  
Keeleline toimetus: Karin Veske, Margit Lehis, Merike Lillemägi

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



Trükitud: OÜ Paar  
Printed by: Paar Ltd

Kirjastaja: Eesti Maaülikool  
Publisher: Estonian University of Life Sciences

© 2011

Eesti Maaülikool  
Estonian University of Life Sciences  
All Rights Reserved

ISBN: 978-9949-484-07-2

## Sisukord

|   |     |
|---|-----|
| Eessõna.....  | 4   |
| Reoveesette ja biojäätmete kooskäärutamise energeetiline potentsiaal ning probleemid Kuressaare näitel<br>Peep Pitk, Juhan Pürjer, Raivo Vilu .....   | 6   |
| Bioetanooli mõju diiselmootori kõrgrõhupumbale<br>Jüri Olt jt.....  | 18  |
| Rohusilo ja sõnniku biogaasipotentsiaali primaarenergeetilise olulusringi- ja ressursi-<br>de ruumianalüüsi meetodika arendamine Tartumaa näitel<br>Sander Jahilo, Antti Roose .....                          | 29  |
| Ehitisintegreeritud fotoelektriliste päikesepaneelide tootlikkus ja majanduslik tasuvus<br>Eesti kliimas aastal 2011<br>Annika Päsik, Andri Jagomägi, Egris Mõttus .....                                      | 37  |
| Fikseeritud asetusega päikesekollektori ja päikest järgiva päikesekollektori energia-<br>salvestuse erinevus<br>Veli Palge jt. ....   | 49  |
| Eestis kasutatavad päikesekütesüsteemid ja nende käitamine<br>Meeli Hüüs, Ülo Kask.....   | 64  |
| Taastuenergiate kasutus Saksamaal Mecklenburg-Vorpommerni liidumaal<br>Rünno Lumiste .....  | 77  |
| Kompaktne biokütus hobuste okaspuu-allapanust<br>Mart Hovi, Külli Hovi, Andres Menind .....   | 86  |
| Biokütuste päikesekuivati-õppevahend<br>Mart Hovi, Külli Hovi.....  | 91  |
| Tahkel kütusel töötavatele kütteseadmetele kehtestatud normid Euroopas ja ahjuhitu-<br>se hetkeseis Eestis<br>Annes Andresson .....   | 95  |
| Taastuenergeetika EMÜ energiakasutuse eriala üliõpilastöodes 2007...2011<br>Erkki Jögi, Jaan Lepa .....   | 102 |
| Kaevandusvesi – ressurss Ida-Virumaa energiasäästliku arengu kavandamiseks<br>Veiko Karu.....   | 108 |
| PROGRASS – poollooduslike rohumaade säilimise tagamine bioenergia tootmise<br>kaudu<br>Indrek Melts jt. ....  | 118 |
| Tselluloosirikaste materjalide ja jäätmete väärdamine biokütusteks Eesti Maaüli-<br>kooli tehnikainstituudi biokütuste laboris<br>Andres Menind, Liis Oper.....   | 128 |
| Tehnikainstituudi õppe- ja teadustöölabor katlatehnika soojustehnilisteks katsetusteks<br>Maido Märss.....  | 138 |
| Innovatiivsed lahendused hoone elektrisüsteemis: struktuuri modelleerimine, lahen-<br>duse realiseerimise majanduslikud ja tehnilised aspektid. Lõpliku variandi valiku<br>algoritm<br>Valeri Saikovski ..... | 143 |
| Erinevate taimeliikide võrdlus bioetanooli tootmiseks<br>Marti Tutt, Jüri Olt .....   | 157 |

## EESSÕNA

Eesti Maaülikoolis toimub 10. novembril 2011.a. konverents TEUK-XIII, mis jätkab varasemate konverentside traditsiooni tuua kuulajateni valminud uurimistööde kokkuvõtted, tutvustada projekte ja diskuteerida taastuvenergia valdkonna hetkeseisu ja arengusuundade üle.

Konverentsi päevakavas on planeeritud aeg 9 ettekandele uurimistööde tulemustest, millele järgnevad 3 avalikku diskussiooni sissejuhatavat ettekannet taastuvenergia valdkonna arengutest Eestis. Lisaks suuliste ettekannete kuulamisele, on külalistajatel enne konverentsi algust võimalik tutvuda EMÜ tehnikainstituudi laboritega ning konverentsi vaheaegadel stendi-ettekannete ning surugaasi autodega.

Esitlemisele tulevatest töödes on põhiliselt käsitlemist leidnud biogaasi või päikeseenergia küsimused, mis näitab teadus-arendustöö aktiivsuse kasvu nende teemadel. Eesti Maaülikool on otsustanud anda tänukirja nende valdkondade aktiivsetele arendajatele. Eesti Maaülikool annab tänukirja Leo Salustele tehtud töö eest biogaasi valdkonna teabe levitamisel ja valdkonna arendamisel ning Teolan Tomsonile päikeseenergia pikaajalise uurimistöö ja arendustöö eest.

Käesolev aasta on olnud vastandlike arvamuste ja arutelude aasta taastuvenergia- ja elektriijaamade investeeringutoetuste ümber. Käimasolevatest ühiskondlikest ja poliitilistest aruteludest sõltub energeetika areng Eestis, eriti uute tehnoloogiate kasutuselevõtu tempo ning fossiilenergia ja taastuvenergia ressursside kasutamise mahud. Loodame, et energeetika arendamine jätkub ja meil on võimalik Eestis lähikümnenditel jõuda taastuvatel energiaallikatel põhineva jätkusuutliku energiavarustuse loomiseni. Mõttevahetuseks aktuaalsetel teemadel toimub konverentsi lõpus avalik diskussioon „Taastuvenergia toetused. Kuidas edasi?“

Tere tulemast konverentsile ja huvitavaid ettekandeid ning arutelusid!

Argo Normak

Eesti Maaülikooli taastuvenergia keskuse juhataja

## **FOREWORD**

Annual conference „Investigation and Usage of Renewable Energy Sources XIII,, is held on 10<sup>th</sup> of November 2011 in Estonian University of Life Sciences, continuing the long tradition of bringing to the audience the research results, project overviews and discussions on renewable energy sectors' developments and current situation.

Conference agenda contains nine presentations on research results, followed by three introductory presentations and a public discussion on renewable energy field developments in Estonia. In addition to the presentations, the participants of the conference can visit the new laboratories of Institute of Technology of EULS prior the conference and review several poster presentations and view compressed gas vehicles during the coffee breaks.

The presentations mainly focus on biogas and solar energy, indicating active research and development in these fields. EULS has decided to award the long-term developers of renewable energy field - Mr Leo Saluste for executed work in field of biogas communication and development and Mr. Teolan Tomson for long-term research and development in field of solar energy.

Current year has seen opposite opinions and discussions related to renewable energy and electric power plant subsidies. However, current public and political discussions determine the future of energy sector in Estonia, especially the introduction of innovative technologies and the quantity of renewable and fossil energy. We hope that the development of energy sector continues and Estonia is able to implement sustainable energy supply that is based on renewable energy. To promote these debates, a public discussion “Renewable energy subsidies. What lies ahead?“ is held in the end of the conference.

I welcome you all to the conference and wish you interesting presentations and stimulating discussions!

Argo Normak

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

# REOVEESETTE JA BIOJÄÄTMETE KOOSKÄÄRITAMISE ENERGEETILINE POTENTSIAAL NING PROBLEEMID KURESSAARE NÄITEL

Peep Pitk, Juhan Pürjer ja Raivo Vilu  
Biotehnoloogia õppetool, Keemiainstituut, Tallinna Tehnikaülikool  
e-mail: peepitk@gmail.com

## **Annotatsioon**

Anaerobne kääritamine on üle maailma muutumas järjest olulisemaks biolagunevate jäätmete käitlemise tehnoloogia osaks, sest lisaks peamiselt rõhutatud taastuvenergia tootmise potentsiaalile on see eelkõige tehnoloogia, mis aerobsete protsessidega integreeritult võimaldab vähendada tekkiva reoveesete kogust ja kasvuhoonegaaside emissioone biojäätmete käitlemisel, asendada fossiilsete kütuste tarbimist taastuvate energiallika- tega ning efektiivsemalt taaskasutada kääritusjäätis sisalduvaid makro- toitaineid ehk vähendada sõltuvust tehisväetiste järjest suurenevast maa- ilmaturu hinnast. Käesolevas uurimistöös analüüsiti Kuressaare piirkonna näitel reoveesete ja biojäätmete kooskääritamise mõju energia tootmise efektiivsusele ja aktiivmudaprotsessi lämmastikuärastusele.

*Märksõnad: Anaerobne kooskääritamine; biojätmed; lämmastikuäras- tus*

## **Sissejuhatus**

Reoveesete ja biolagunevate jäätmete käitlemine on Eestis endiselt suu- reks probleemiks ning puudub ühtne arusaam, millistel tehnoloogilistel lahendustel põhiosa sellest võiks baseeruda. Hetkel tuginevad reoveesete ja biolagunevate jäätmete käitlemine peamiselt aerobsetele protsessi- dele, mis on energiantensiivsed ning ei võimalda jäätmetes sisalduvat energiat efektiivselt ära kasutada ja on suhteliselt suure biomassi ehk jääkmuda produktiooniga. Erandina saab välja tuua vaid Paljassaare reo- veepuhastusjaama, kus reoveesete anaerobne kääritamine on efektiiv- selt integreeritud reoveepuhastusjaama üldskeemi.

Keskkonnasõbralikumaks ja energeetiliselt efektiivsemaks alternatiiviks aerobsetele protsessidele on anaerobse kääritamise protsess, mis või-

maldab reoveesette stabiliseerimisega üheaegselt vähendada reoveesette mahtu, taaskasutada kääritusjäätis olevaid makrotoitaineid ja toota energiakandjat – biogaasi (Luostarinen jt, 2009). Lisaks nimetatule võimaldab anaeroobne kääritamine omavahel ühendada reoveesette ja biojäätmete käitlemise. Erinevate biojäätmete suhteliselt kõrge veesisaldus (üle 70%) muudab atraktiivseks lahenduseks nende kooskääritamise jääkaktiivmuudaga, mis võimaldab sünergiliselt suurendada ka biogaasi tootlikkust (Pavan jt, 2007).

Käesoleva uurimustöö eesmärgiks oli kaardistada Kuussaares ja selle lähiümbruses (kuni 30 km raadiuses) biojäätmete ressursid – aastased tekkekogused, teostada nende kompleksne keemiline analüüs, määrata biogaasi potentsiaal ja teostada üheastmelised katsed läbivoolureaktories. Katsete eesmärgiks oli määrata biogaasitoodang kooskääritamise protsessis reaktori mahuühiku kohta ja hinnata kääritusjäätis kõrgest ammoniumi kontsentratsioonist tulenevat N lisakoormust nitrifikatsioonil-denitrifikatsioonil põhinevale lämmastiku ärastusprotsessile.

Kooskääritamise katsetes kasutatud biojäätmete kõrgest valgusisaldusest tulenevalt oli võimalik hinnata ka ammoniumi võimalikku inhibitsiooni anaeroobse kääritamise protsessile, sest kirjanduses on viidatud metaani produktsiooni 50% inhibitsioonile  $\text{NH}_4\text{-N}$  kontsentratsioonide vahemikus 1,7–14 g/l (Chen jt, 2008). Samas võib anaeroobne kääritamine toimuda isegi vaba ammoniaagi ( $\text{NH}_3$ ) kontsentratsioonidel kuni 800 mg/l, kuid siis on see seotud reaktoris oleva koosluse kõrge adapteerumisvõimega (Angelidaki jt, 2003)

### **Reoveesette ja biojäätmete ressurss**

Kuussaares suleti viimane prügila 2009. aastal ja seetõttu on oluline maksimaalne erinevate jäätme fraktsioonide kohapealne taaskasutamine, et vähendada mandrile suunatavaid jäätmevoogusid. Biojäätmete lokaalne utiliseerimine on selleks üks parimaid võimalusi ning Kuussaare reoveepuhastusjaama rajatud anaeroobne kääriti on mõistlik viis biojäätmete kohapealseks töötlemiseks/väärindamiseks.

Reoveesette ning tööstus- ja munitsipaalsektori biojätmete allikate ja koguste kaardistamisel Kuressaare lähimbruses lähtuti Keskkonnateabe keskuse poolt 2009. aasta jätmete koguste kohta väljastatud andmetest ning nende alusel valiti analüüsimiseks ja katsete teostamiseks 11 suuremat jäätmevoogu – vt tabel 1. Nagu tabelist näha, oli mahuliselt suurim osakaal Kuressaare reoveepuhastis tekkival jääkaktiivmudal, Saaremaa Piimatööstuse vadakul, köögijätmetel, tapamajajätmetel ja väikepuhas-tite reoveesetel.

*Tabel 1. Biojätmete ressursi analüüsi tulemused (VP JAM – väikepuhas-tite jääkaktiivmuda, KT-RPR – kalatööstuse rasvapüünise rasv, KA – kuivaine, LA – lenduvaine, TN – üldlämmastik)*

*Table 1. Biowaste resources in Kuressaare region*

|                     | t/päev | t/aasta | Mahu % | kg LA/<br>päev | LA<br>osakaal,<br>% | TN, kg/t<br>KA | TN, kg/<br>päev |
|---------------------|--------|---------|--------|----------------|---------------------|----------------|-----------------|
| Jääkaktiivmuda      | 47,5   | 17348,5 | 43,4   | 1473,7         | 21,7                | 76,0           | 140,8           |
| Vadak               | 50,0   | 18250,0 | 45,7   | 2829,0         | 41,6                | 19,1           | 58,7            |
| VP JAM              | 3,0    | 1095,0  | 2,7    | 56,8           | 0,8                 | 47,0           | 4,5             |
| Rasvapüünise rasv   | 0,3    | 91,3    | 0,2    | 82,0           | 1,8                 | 2,3            | 0,3             |
| Sealäga             | 2,0    | 730,0   | 1,8    | 261,0          | 3,8                 | 32,5           | 9,8             |
| TMJ                 | 2,7    | 985,5   | 2,5    | 1202,9         | 18,5                | 53,5           | 67,9            |
| KT-RPR              | 0,3    | 100,0   | 0,3    | 130,4          | 1,9                 | 8,2            | 1,1             |
| Kreveti jätmed      | 0,7    | 270,1   | 0,7    | 107,1          | 1,6                 | 62,0           | 12,1            |
| Kalatööstuse jätmed | 0,1    | 40,2    | 0,1    | 24,0           | 0,4                 | 81,0           | 2,2             |
| Vana juust          | 0,0    | 0,4     | 0,0    | 0,6            | 0,0                 | 74,6           | 0,1             |
| Köögijätmed         | 2,8    | 1022,0  | 2,6    | 535,5          | 7,9                 | 25,6           | 14,6            |
| Kokku               | 109,4  | 39932,8 | 100,0  | 6797,3         |                     |                | 311,9           |

## **Materjalid ja meetodid**

Erinevate biojätmete keemiliste analüüside kokkuvõte on esitatud tabelis 2.



Tabel 2. Bioloogilise jäätmete keemiline koostis  
Table 2. Chemical compositions of biodegradable co-substrates

|       | Ühik     | TMJ-<br>veis | TMJ-siga | Sealäga | VP-<br>JAM | Tahe<br>JAM | RPR   | Vana<br>juust | Kala<br>jääd | Kreveti<br>jääd | Kala-<br>tööstus<br>RPR | Köögi-<br>jääd |
|-------|----------|--------------|----------|---------|------------|-------------|-------|---------------|--------------|-----------------|-------------------------|----------------|
| KA    | %        | 46,0         | 50,0     | 15,0    | 3,2        | 16,0        | 33,0  | 62,0          | 24,0         | 26,0            | 50,0                    | 20,0           |
| LA    | %        | 99,0         | 99,0     | 87,0    | 59,0       | 76,0        | 98,0  | 94,0          | 90,0         | 55,0            | 96,0                    | 94,0           |
| TN    | g/kg KA  | 64,1         | 42,9     | 32,5    | 47,0       | 73,4        | 2,3   | 74,6          | 81,0         | 62,0            | 82,1                    | 25,6           |
| NH4-N | g/kg KA  | -            | -        | -       | -          | -           | -     | -             | -            | -               | -                       | -              |
| TP    | g/kg KA  | 4,6          | 1,8      | 11,7    | 6,9        | 16,4        | 0,1   | 7,8           | 14,3         | 26,6            | 0,6                     | 2,9            |
| TOC   | g/kg KA  | 650,0        | 620,0    | 470,0   | 580,0      | 420,0       | 730,0 | 580,0         | 600,0        | 300,0           | 670,0                   | 470,0          |
| C:N   |          | 10,1         | 14,5     | 14,5    | 12,3       | 5,7         | 317,0 | 7,8           | 7,4          | 4,8             | 8,2                     | 18,4           |
| pH    |          | -            | -        | 5,3     | 7,0        | 5,9         | -     | 6,2           | -            | 8,7             | -                       | 4,7            |
| S     | g/kg KA  | 1,9          | 1,1      | 3,0     | 16,0       | 9,0         | 0,3   | 3,6           | 5,4          | 7,3             | 1,7                     | 2,0            |
| K     | g/kg KA  | 4,7          | 2,4      | 5,9     | 5,8        | 8,4         | 1,2   | 1,2           | 12,6         | 2,8             | 0,4                     | 8,9            |
| Ca    | g/kg KA  | 0,9          | 0,3      | 10,5    | 21,4       | 26,0        | 3,8   | 10,4          | 13,4         | 131,5           | 5,0                     | 4,1            |
| Na    | g/kg KA  | 5,7          | 2,6      | 12,9    | 17,4       | 1,1         | 1,0   | 5,6           | 17,6         | 26,1            | 0,5                     | 7,1            |
| Mg    | mg/kg KA | 282,0        | 154,0    | 3446,0  | 7049,0     | 8198,0      | 79,4  | 410,0         | 966,0        | 9363,0          | 477,0                   | 778,0          |
| Cr    | mg/kg KA | 1,2          | 1,5      | 2,3     | 29,7       | 9,0         | <1    | <1            | 2,1          | <1              | 3,7                     | <1             |
| Cd    | mg/kg KA | <1           | <1       | <1      | <1         | <1          | <1    | <1            | <1           | <1              | <1                      | <1             |
| Ni    | mg/kg KA | <1           | <1       | 1,6     | 24,0       | 9,6         | <1    | <1            | <1           | <1              | 1,9                     | <1             |
| Pb    | mg/kg KA | <2           | <2       | <2      | 40624,0    | 9,7         | <2    | <2            | <2           | <2              | 2,5                     | <2             |
| Zn    | mg/kg KA | 40,5         | 19,8     | 140,0   | 980,0      | 254,0       | 1,2   | 45,1          | 81,3         | 37,1            | 51,4                    | 45,0           |
| Cu    | mg/kg KA | 55,5         | 9,0      | 61,0    | 68,6       | 156,0       | 10,8  | 4,0           | 6,8          | 37,2            | 11,4                    | 5,5            |

Kahele suuremale biojäätmete ressursile ehk jääkaktiivmudale ja vada-  
kule teostati ühekuulise vahega kaks kompleksset keemilist analüüsi, et  
hinnata biojäätmete koostise varieeruvust ajas (tabel 3).

*Tabel 3. Kahe põhisubstraadi koostise võrdlus ühe kuu jooksul*  
*Table 3. Comparison of the two main substrates, samples were taken with 1 month*  
*time interval*

|                    | Ühik     | JAM1   | JAM2   | Vadak1 | Vadak2 |                    | Ühik | Inokulum |
|--------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------------------|------|----------|
| KA                 | %        | 4,4    | 3,4    | 5,8    | 6,5    | KA                 | %    | 2,4      |
| LA                 | %        | 74,0   | 85,0   | 91,0   | 93,0   | LA                 | %    | 57,6     |
| TN                 | g/kg KA  | 70,3   | 81,6   | 21,0   | 17,2   | TN                 | mg/l | 1500,0   |
| NH <sub>4</sub> -N | g/kg KA  | -      | -      | -      | -      | NH <sub>4</sub> -N | mg/l | 1017,0   |
| TP                 | g/kg KA  | 20,4   | 20,5   | 6,4    | 5,6    | TP                 | mg/l | 597,0    |
| TOC                | g/kg KA  | 390,0  | 460,0  | 270,0  | 360,0  | KHT                | mg/l | 18106,0  |
| C:N                |          | 4,6    | 5,6    | 34,8   | 20,9   | pH                 | mg/l | 7,5      |
| pH                 |          | 6,2    | 6,3    | 6,2    | 6,2    |                    |      |          |
| S                  | g/kg KA  | 9,0    | 6,8    | 3,2    | 1,8    |                    |      |          |
| K                  | g/kg KA  | 10,2   | 10,5   | 26,3   | 19,3   |                    |      |          |
| Ca                 | g/kg KA  | 2,5    | 3,4    | 6,9    | 6,1    |                    |      |          |
| Na                 | g/kg KA  | 9,5    | 5,6    | 1,1    | 1,1    |                    |      |          |
| Mg                 | mg/kg KA | 9000,0 | 6800,0 | 3200,0 | 1800,0 |                    |      |          |

Läbivoolukatsete teostamiseks kasutati 1,5liitrise töömahuga üheastme-  
list reaktorit, mida toideti fed-batch režiimis üks kord päevas. Reaktori  
toitmiseks koostati vedelatest ja tahketest jäätmetest kaks erinevat toite-  
segu, mida hoiustati eraldi 4 °C juures ja kasutati ühiselt toitena vastavalt  
ressursianalüüsi käigus kaardistatud jäätmevoogude proportsioonidele –  
vt tabel 1. Tahked jäätmed purustati eelnevalt tööstusliku hakklihamasi-  
naga ja segati kokku ühtlaseks massiks, mis ei vasta täielikult reaalsele  
olukorrale, kus toorme lisamisel ei õnnestu vältida koostise muutumist  
ja heterogeensust, kuid arvestades laboratoorsete katseseadmete väikseid  
mahtusid, on see ainuvõimalik lahendus piisavalt homogeense tooraine-  
massi saavutamiseks. Katsete planeerimisel tehti ka teine lihtsus, mil-  
leks on katse käigus igapäevaselt täpselt sama koostisega toorainetesegu  
kasutamine, mida tegelikkuses on jäätmetekke- ja kogumise graafikut ar-  
vestades raske tagada.

Katsete käigus mõõdeti toodetava biogaasi hulka, CH<sub>4</sub> sisaldust biogaasis, kuivaine ja lenduvaine ärastusefektiivsust ja erinevaid protsessi iseloomustavaid parameetreid (pH, KHT, Nüld, NH<sub>4</sub>-N, Püld, puhverduvusvõime jne). Katsete kiiremaks alustamiseks inokuleeriti reaktor Paljassaare reoveepuhastusjaama anaeroobses kääritis tekkiva kääritusjäädiga.

### **Läbivoolukatsete teostamine**

Katsete eesmärgiks oli võrrelda erinevaid orgaanilise koormuse tõstmise alternatiive ning nende mõju biogaasitoodangule ja lenduvaine ärastusefektiivsusele. Kasutati kaht katseskeemi.

Esimeses variandis alustati inokuleeritud reaktorite toitmist ainult vedeljäätmete seguga ja viibeajaga 40 päeva. Koormust tõsteti järk-järgult kuni 24päevase viibeajani, mille järel hinnati adapteerumist piisavaks, et alustada tahkete jäätmete segu lisamist toitesegule, mis koostati vastavalt teostatud ressursianalüüsile – vt tabel 1. Jäätmete segu lisamist alustati uuesti viibeajaga 40 päeva, mis võrdus orgaanilise koormusega (OLR) 1,11 kg LA/(m<sup>3</sup>\*päev). Viibeaega vähendati katse käigus kuni 15 päevani (OLR = 3,50 kg LA/(m<sup>3</sup>\*päev)), mille järel vähenes lenduvaine ärastusefektiivsus ning viibeaja vähendamine lõpetati.

Teise variandina teostati katse viibeajaga 20 päeva ja orgaanilist koormust tõsteti tahkete jäätmete osakaalu tõusuga sisendsegus. Maksimalne uuritud orgaaniline koormus oli 4,12 kg LA/(m<sup>3</sup>\*päev), peale mida tekkisid reaktoriga tehnilised probleemid ja katseseeria lõpetati.

### **Läbivoolukatsete tulemused**

Tabel 4 võrdleb omavahel erinevaid orgaanilise koormuse tõstmise alternatiive ja optimaalsemaid protsessitingimusi.

Orgaanilise koormuse tõstmise katse ainult viibeaja vähendamisega (konstante sisendsegu) näitas, et 15 päeva on liiga lühike aeg protsessi efektiivsuse tagamiseks, sest 20päevase viibeajaga võrreldes vähenesid CH<sub>4</sub> toodang ja ka lenduvaine lagundamise efektiivsus (vt tabel 4). Sellist protsessi efektiivsuse langust ja biogaasitoodangu vähenemist on kirjeld-

Table 4. CH<sub>4</sub> toodang ja lenduvainete ärastusefektiivsus erinevate orgaanilise koormuse tõstmise viiside tingimustes  
 Table 4. CH<sub>4</sub> production and VS removal efficiency with different OLR increase options

| Viibeaeg  | Sisendi KA, % | Tahke jäätme osakaal, % | OLR, kgLA/(m <sup>3</sup> *päev) | LA ärastusefektiivsus, % | CH <sub>4</sub> toodang, m <sup>3</sup> /t LA | CH <sub>4</sub> toodang, m <sup>3</sup> /t input |
|---|---------------|-------------------------|----------------------------------|--------------------------|---|--|
| OLR tõstmine viibeaja vähendamisega               |               |                         |                                  |                          |   |  |
| 30  | 6,15          | 9,37                    | 1,84                             | 73,06                    | 327,84  | 18,1   |
| 20  | 6,15          | 9,37                    | 2,62                             | 70,74                    | 476,64  | 24,98  |
| 15  | 6,15          | 9,37                    | 3,5                              | 67,89                    | 474,65  | 24,92  |
| OLR tõstmine tahke jäätme osakaalu suurendamisega |               |                         |                                  |                          |   |  |
| 20  | 6,33          | 9,37                    | 2,82                             | 68,57                    | 451,26  | 26,47  |
| 20  | 7,91          | 14,7                    | 3,56                             | 74,08                    | 447,96  | 33,17  |
| 20  | 9,3           | 20,0                    | 4,12                             | 77,75                    | 487,36  | 41,76  |

datud short-circuit nähtusena, mille põhjuseks on sisestatud jäätmete nominaalsest lühem viibeaeg reaktoris (Angelidaki jt, 2005). Peale 15päevase viibeajaga katseperioodi tehti kääritusjäägile metaani potentsiaali analüüs, mille alusel saadi kääritusjäägi CH<sub>4</sub> potentsiaaliks 3 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t märgmassi ja 69,7 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t LA kohta, mis võrreldes sisendsegu toodanguga protsessi käigus moodustab 10,7%. See on märkimisväärne metaanipotentsiaali kadu, mida on võimalik optimeeritud protsessitingimustega oluliselt vähendada.

Orgaanilise koormuse tõstmisel tahkete jäätmete osakaalu muutmisega suurenes metaani tootlikkus ja lenduvaine ärastusefektiivsus orgaanilise koormuseni kuni OLR 4,12 kg LA/(m<sup>3</sup>\*päev), mille järel katse lõpetati.

Kuressaare reoveepuhastusjaama jääkaktiivmuda biogaasitootlikkust mono-substraadina hinnati vaid perioodsete biogaasi potentsiaali määramise katsetega, mille tulemusel saadi biogaasi maksimaalseks potentsiaaliks (katse kestvus 42 päeva) 358 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t LA ja 10 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t märgmassi kohta. See väärtus on võrreldes kirjanduse andmetega suhteliselt kõrge, kuid

arvestades eelsetiti puudumist ja kogu reovee suunamist otse aeroobsesse töötlusesse, on kõrge tootlikkus mõistetav. Primaar- ja aktiivmuda anaeroobse kääritamise katsete käigus on saavutatud spetsiifiliseks biogaasi toodanguks vastavalt 600 ja 280 m<sup>3</sup> biogaasi/t LA kohta, CH<sub>4</sub> sisaldusega 62–63% (Bouallagui jt, 2010). Võrreldes jääkaktiivmuda perioodsete katsete maksimaalse metaani toodanguga on 20päevase viibeajaga jääkaktiivmuda ja biojäätmete kooskääritamisel ühe tonni sisendi kohta võimalik saavutada ligikaudu neli korda suurem CH<sub>4</sub> toodang.

Kalajäätmetest, tapamajajäätmetest, vadakust ja teistest proteiinirikastest biojäätmetest tuleneva lämmastikukoormuse tagajärjel tõusis kõige kõrgemal orgaanilisel koormusel (üld)ammooniumi kontsentratsioon kääritusjärgis 1920 mg/l, pH oli sellel perioodil 8,0 ning sellest tulenevalt tõusis vaba ammoniaagi kontsentratsioon 275,1 mg/l, kuid protsessi efektiivsusele see siiski märgatavat mõju ei avaldanud.

Katsete tulemused näitavad üheselt, et sõltuvalt biogaasijaamas kasutatavatest jäätmetest on vaja leida neile vastav optimaalseim viibeaeg, mis tagaks maksimaalse metaanitoodangu, ei vähendaks lenduvaine ärastusefektiivsust ja väldiks protsessi võimalikku inhibitsiooni. Tehtud katsete käigus näidati, et kõige optimaalsemad protsessitingimused saavutatakse uuritud jäätmevoogudega tahkete jäätmete osakaalu suurendamisega, kuid lisaks metaanitoodangu suurenemisele on vaja arvestada ka siseneva tooraine kuivaine kontsentratsiooni, selle suurenemisest tulenevalt segamiseks vajaminevat täiendavat energiakulu, lenduvaine ärastuse efektiivsust jne.

### **Energia tootmise potentsiaal kohalike biojäätmete utiliseerimisel anaeroobses kääritis**

Kuressaare reoveepuhastis tekkiva jääkaktiivmuda koguse ja perioodsete biogaasi potentsiaali katsete tulemuste alusel on arvutuslikult maksimaalselt võimalik toota 173 485 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> aastas. Arvestades 1 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> energiasalduseks 10 kWh, siis on võimalik saavutada (elektri ef. 40%; sooja ef. 45%; mootori tööaeg 8322 h/a) ligikaudu 83,4 kW elektri tootmis-

võimsust. Kooskääritamise läbivoolukatsete tulemuste järgi on 20päeva-  
se viibeajaga protsessi opereerimisel võimalik toota kuni 1 057 070 m<sup>3</sup>  
CH<sub>4</sub> aastas, mis võimaldab samadel eeldustel arvutuslikult saavutada  
ligikaudu 508 kW elektri tootmisvõimsust. See tähendab, et kooskää-  
ritamise tulemusel oleks võimalik CH<sub>4</sub>-toodangut tõsta üle kuue korra  
ning 508 kW elektri tootmisvõimsust võimaldaks reoveepuhastusjaamal  
muutuda energeetiliselt sõltumatuks rajatiseks, mis saaks teenida täienda-  
vat lisatulu ülejääva elektri ja sooja müügist ning biojäätmete käitlemise  
väravatasust.

Kuna läbivoolukatsed teostati idealiseeritud tooraineteseguga, siis arvu-  
tatud energia tootmise potentsiaal on indikatiivne. Realse biogaasijaa-  
ma töös on CH<sub>4</sub>-toodang sõltuvuses biojäätmete tarne stabiilsusest, selle  
kvaliteedi varieeruvusest, võimalike tehniliste probleemide kestvusest  
jne.

### **Lämmastiku ärastamise probleemid anaeroobse kääritamise tehnoloogia lisamisel reoveepuhastusjaama üldskeemi**

Biojäätmete ja reoveesete kooskääritamine aitab tõsta anaeroobse kääriti  
biogaasitoodangut ning osaliselt lahendada ka regionaalset biojäätmete  
käitlemise probleemi, kuid reoveepuhastusjaama aktiivmudaprotsessile  
tähendab see oluliselt suurenevat N koormuse tõusu. Eelmise kahe aasta  
keskmise N koormus Kuressaare reoveepuhastile on olnud 202 kg N/päev,  
kuid tabelis 1 toodud sisendsegu realiseerimisel tõuseks N koormus täien-  
davalt 171,1 kg N/päev, mis nitrifikatsiooni-denitrifikatsiooni protsessis  
ilma täiendava süsinikuallikata ei oleks enam ärastatav. Süsinikuallika  
lisamine ja suurenev aereerimise vajadus tõstaksid oluliselt reovee puhas-  
tamise hinda, mis seaks kahtluse alla kooskääritamise otstarbekuse. Selle  
vältimiseks tuleb leida tavapärasele N-ärastusele alternatiivne lahendus,  
milleks võivad olla lämmastiku taaskasutamine kasutades NH<sub>3</sub>-stripping  
tehnoloogiat, struviidi sadestamist või autotroofseid N-ärastusmeetodeid  
(näiteks ANAMMOX – anaeroobne ammoniumi oksüdatsioon), mis on  
aasta-aastalt muutumas järjest laialdasemalt kasutatavateks tehnoloogia-  
teks üle kogu maailma.

Mesofiilsest anaeroobse kääritamise protsessist eemaldatav kääritusjääk on temperatuurivahemikus 35–38 °C, sõltuvalt kääritatavatest jäätmetest kõrge ammoniumisisaldusega (1–4 g/l) ja madala orgaanilise süsiniku sisaldusega. Nimetatud tingimused on sobivaimad just ANAMMOX-protsessi rakendamiseks, sest süsinikuallikana kasutatakse selles protsessis CO<sub>2</sub>, protsess kulgeb kõige efektiivsemalt mesofiilises temperatuurivahemikus ja toimub ainult osaline ammoniumi nitritatsioon, mis võimaldab vähendada aeratsioonivajadust. Võrreldes tavapärase nitrifikatsiooni-denitrifikatsiooni protsessiga, võimaldab ANAMMOX-protsessi rakendamine oluliselt vähendada energiatarbimist, tekkivat reoveesete mahtu, kulu süsinikuallikale ja CO<sub>2</sub>-emissiooni (Henze jt, 2008). Autotroofne lämmastiku ärastamine kääritusjäägist on kompleksne probleem, mille optimeerimine nõuab eraldi uuringuid.

### **Kokkuvõte**

Kuussaare oma suhteliselt suure toiduainetööstusega ja lokaalse biojäätmete käitlemise vajadusega osutus ideaalseks piirkonnaks reoveesete ja erinevate biojätmete anaeroobse kooskääritamise potentsiaali ja võimalike kitsaskohtade hindamiseks. Üheastmeliste läbivoolukatsete tulemusel on (võrreldes ainult reoveesete kääritamisega) võimalik kohalikele biojätmetele baseerudes anaeroobse kooskääritamise kaudu elektrienergia tootmisvõimsust tõsta üle kuue korra – 84 kW ainult reoveesete kääritamisel, 508 kW biojätmetega kooskääritamisel.

Samas tuleb rõhutada, et anaeroobse kääriti efektiivsuse tagamiseks on vaja see integreerida parimal võimalikul viisil reoveepuhastusjaama üldskeemi, et tagada kogu protsessi maksimaalne efektiivsus ning kõige selle eelduseks on võimalike jäätmevoogude eelnev kaardistamine, kompleksne analüüs ja optimaalsete protsessitingimuste väljaselgitamine enne anaeroobse kääriti protsessiskeemi ja tehnoloogilise lahenduse projekteerimist. Reoveepuhastusjaama efektiivse töö tagamiseks on vaja üldskeemile lisada eelsetiti, kaaluda eeltöötlusmeetodite rakendamist enne anaeroobset kääritamist, leida optimaalne lahendus kääritusjäägist ammoniumi ärastamiseks või taaskasutamiseks ja sobivaim orgaanilise

süsiniku jaotus erinevate reoveepuhastusprotsessi faaside vahel, et minimeerida välise süsinikuallika lisamise vajadust.

### **Tänuavaldused**

Autorid tänavad SA Archimedest finantseeringu eest läbi Eesti Energia-tehnoloogia programmi projekti „Anaeroobsel kääritamisel põhinevate biogaasi energia tehnoloogiate biokeemiliste protsesside optimeerimine ning monitooringu ja juhtimismeetodite arendamine“.

### **Kasutatud kirjandus**

- Angelidaki, I., Boe, K., Ellegaard, L. (2005). Effect of operating conditions and reactor configuration on efficiency of full-scale biogas plants. *Water Science and Technology*, 52 (1–2), 189-194.
- Angelidaki, I., Ellegaard, L., Ahring, B. K. (2003). Applications of the anaerobic digestion process. *Advances in biochemical engineeringbiotechnology*, 82, 1–33.
- Bouallagui, H., Marouni, L., Hamdi, M. (2010). Performances comparison between laboratory and full-scale anaerobic digesters treating a mixture of primary and waste activated sludge. *Resources, Conservation and Recycling*, 55, 29–33.
- Chen, Y., Cheng, J. J., Creamer, K. S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process : A review. *Bioresource Technology*, 99, 4044–4064.
- Henze, M., van Loosdrecht, M.C.M., Ekama, G.A., Brdjanovic, D. (2008). *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design*. – van Loosdrecht, M.C.M. *Innovative Nitrogen Removal*. IWA Publishing, 139-154.
- Luostarinen, S., Luste, S., Sillanpää, M. (2009). Increased biogas production at wastewater treatment plants through co-digestion of sewage sludge with grease trap sludge from a meat processing plant. *Bioresource technology*, 100(1), 79–85.
- Pavan, P., Bolzonella, D., Battistoni, E., Cecchi, F. 2007. Anaerobic co-digestion of sludge with other organic wastes in small wastewater treatment plants: an economic considerations evaluation. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 56(10), 45–53.



## **SEWAGE SLUDGE AND BIOWASTES CO-DIGESTION ENERGETIC POTENTIAL AND POSSIBLE PROBLEMS ON KURESSAARE EXAMPLE**

Peep Pitk, Juhan Pürjer ja Raivo Vilu

Over the last decades anaerobic digestion has persistently gained more important role as a part of the bio-waste treatment technologies, that is mainly related to the most emphasized aspect of renewable energy production potential, but on the other hand when integrated with aerobic treatment processes it could significantly reduce production of sewage sludge and greenhouse gas emissions, replace fossil fuel consumption with renewable resources and generate different alternatives for macro-nutrients reuse. In the current study influence of sewage sludge co-digestion with bio-wastes mixture was evaluated on the bio-energy production potential and activated sludge process nitrogen load.

# BIOETANOOLI MÕJU DIISELMOOTORI KÕRGRÕHUPUMBALE

Jüri Olt, Villu Mikita, Risto Ilves, Arne Küüt, Marten Madissoo  
Eesti Maaülikooli tehnikainstituut  
Kreutzwaldi 56, 51014 Tartu; e-mail: jyri.olt@emu.ee

## **Annotatsioon**

Käesolevas artiklis on uuritud 94,6% kontsentratsiooniga bioetanooli mõju diiselteaparatuuri pretsiissetele tööosadele. Lähemalt vaadeldakse reastüüpi kõrgrõhupumba plunžri ja hülsi ning pihustite tehnilist seisukorda enne ja pärast etanoolkütuse kasutamist. Uuritakse etanooli mõju plunžri tööpindade geomeetria ning kõrgrõhupumba sektsioonide tootlikkuse muutusele. Analüüsitakse katsetustel saadud andmeid ning antakse hinnang etanooli kasutuse perspektiivikusele tavapärasel teiteaparatuuris. Katsetulemused on saadud laboratoorses tingimustes. Teiteaparatuuri töötamise kestvuseks oli 100 tundi ja katsekütuseks oli 94,6% bioetanool.

*Märksõnad: diiselmootor, kõrgrõhupump, plunžer, bioetanool*

## **Sissejuhatus**

Alternatiivkütuste kasutusvõimaluste uurimine on praegu maailmas aktuaalne. Juba täna kasutatakse mitmetes Euroopa riikides biodiislikütust ja bioetanooli diiselmootori kütustena. Põhiliselt tehakse seda spetsiaalselt konstrueeritud mootorites. Samas takistab tavapärastes diiselmootorites bioetanooli vahetut kasutamist selle füüsikalise-keemiliste omaduste mõju mootori toitesüsteemile.

Bioetanooli kasutatakse mootorikütusena järgmistes riikides: USA, Brasiilia, Saksa LV ja Rootsi (Harndorf, H., jt, 2008; Steinbach, N. jt, 2006). Peamiselt kasutatakse bioetanooli sädesüütega mootorites. Nimelt on etanooli isesüttimise temperatuur liialt kõrge, et seda saaks kasutada tavapärasel survesüütega mootoris. Etanooli süütamiseks survesüütega mootoris tuleb tõsta surveastet, mille tulemusel rõhk ja temperatuur mootori silindris suurenevad. Lisaks eeltoodule on etanooli kasutamine diiselmootoris raskendatud selle puudulike määrimisomaduste, väikese viskoossuse

ja suure veesisalduse tõttu (Govindarajan, 2008). Nimetatud põhjustest tingituna toimub diiselmootori toitesüsteemi pretsiisete sõlmede kulumine kiiremini kui tavakütusega töötamisel. Võib juhtuda, et pretsiised sõlmed kuumenevad suurenenud hõõrdumise tõttu, kiiluvad kinni või purunevad. Seetõttu tuleb kasutada välise määrimisega kõrgrõhupumpa või katta standard-kõrgrõhupumba plunžrite tööpinnad spetsiaalse nano-komposiitmaterjalist kihiga (Ma jt, 2004). Eelmainitud lahendused ei ole tavapäraste diiselmootorite toitesüsteemide puhul seni laia kasutust leidnud. Selle põhjuseks on kõrgrõhupumba ümberkonstrueerimise kallidus. Diislikütusega töötava kõrgrõhupumba plunžri ja hülsi tööpinnad on töödeldud kõrge täpsusastmega ja üldlevinud arvamus kohaselt ei võimalda need kasutada etanoolkütust. Samas puuduvad kirjandusallikates kaasaegsete pumpade kohta andmed, kui kaua võib plunžri ja hülsi komplekt töötada etanoolkütuse keskkonnas, mis on oluliselt erinev diislikütuse omast.

Käesolevas artiklis on uuritud 94,6% kontsentratsiooniga bioetanooli mõju diiseloiteaparatuuri pretsiisetele tööosadele. Lähemalt vaadeldakse reastüüpi kõrgrõhupumba plunžri ja hülsi ning pihustite tehnilist seisukorda enne ja pärast etanoolkütuse kasutamist. Uuritakse etanooli mõju plunžri tööpindade geomeetrialet ning kõrgrõhupumba sektsioonide tootlikkuse muutusele. Analüüsitakse katsetustel saadud andmeid ning antakse hinnang etanooli kasutuse perspektiivikusele tavapärasel toiteaparatuuril. Katsetulemused on saadud laboratoorses tingimustes. Toiteaparatuuri töötamise kestvuseks oli 100 tundi ja katsekütuseks oli 94,6% bioetanool.

### **Materjal ja meetodika**

Katsekütuseks kasutatav etanool sisaldas 94,6% absoluutset alkoholi. Kuna sellist etanooli ei kasutata tavakütusena, siis ka selle määrimisomadusi spetsiaalselt ei analüüsitud. Hinnangparameetriteks tavakütusega võrdlemisel kasutati tihedust ja viskoossust. Diiseloiteaparatuuri peamiseks väljundparameetriks on kütuse tsükletteanne ja selle sektsioonide vaheline ebaühtlus, mis iseloomustavad aparatuuri tehnilist seisundit.

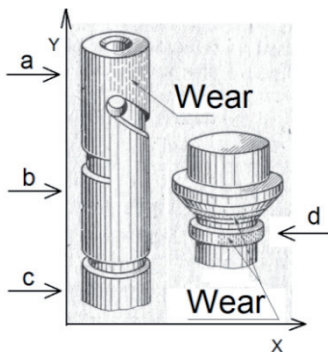
Tsüklietteanne on otseselt seotud toiteaparatuuris olevate agregaatide ja sõlmede (etteandepump, pihusti, plunžri ja hülsi komplekt) korrasolekuga. Toiteaparatuuri korrasolek sõltub omavahelises koostöös olevate detailide pinnakvaliteedist, mida otseselt mõjutavad korrosioon ja hõõrdumine. Käesolevas artiklis uuritakse peamiselt hõõrdumisprotsessi, mis on tingitud kütuse mitterahuldavast määrimisomadusest ja väljendub koostöötavate detailide pinnakvaliteedis ning nende geometrias. Põhilisteks koostöötavateks toiteaparatuuri detailideks, millest sõltub kütuse tsüklietteanne ja etteande ebaühtlus on plunžer ja hüls, surveklapp ja klapi pesa ning pihustinõel ja pihustusotsak.

**Katseplaan.** Uurimus toiteaparatuuri sõlmede algseisundi ja nende hilisema kulumise kohta viidi läbi laboritingimustes praktiliste katsetuste põhjal, kasutades selleks standardis ISO 1204 ettenähtud katsetoodikat. Katseobjektiks valiti kõrgrõhupump mark UTN-5 ja pihustid mark 6T2 eesmärgiga, et need oleksid kasutusel enimlevinud traktorimootori toitesüsteemides. Laboriuuringud jagunesid järgmisteks etappideks: 1) katseobjekti detailide algparameetrite mõõtmine ja sõlmede reguleerimine vastavalt valmistajatehase tingimustele; 2) kestvuskatse läbiviimine; 3) sõlmede ja detailide lõpp-parameetrite mõõtmine. Mõõtmismetoodika põhineb uurimisasutuste poolt väljatöötatud standarditel (Baširov jt, 1978), mis on spetsiaalselt loodud käesolevas artiklis kasutatavale katseobjektile, arvestades selle detailide kulumise eripära.

Kõrgrõhupumba detailide korrasoleku hindamisel mõõdeti plunžrite ja hülside, surveklappide ja nende klapi pesade tööparameetrite (hüdrauliline tihedus) vastavust tehase normidele enne katse algust ja peale katse lõppu. Plunžri ja hülsi hüdraulilise tiheduse mõõtmisel kasutati katses-tendi KI-759. Mõõtmistel pöörati erilist tähelepanu hülsi laupinna korrasolekule. Plunžri asend seadmes vastas selle tehnilistele ettekirjutistele. Katseid teostati iga plunžri ja hülsi komplektiga kolm korda. Uutel komplektidel on läbivajumise aeg vähemalt 30 s ja kasutuses olnutel vähemalt 3 s. Surveklappide ja nende pesade vahelist hüdraulilist tihedust mõõdeti stendil KI-1086. Mõõtmised liigitusid: a) rõhulangetusvöö hüdrauliline

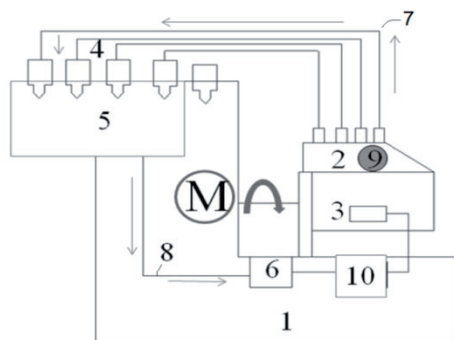
tihedus; b) rõhulangetusvöö ja lukustuskoonuse summaarne hüdrauliline tihedus. Mõõtmised teostati vastavalt stendi KI-1086 juhendile. Surveklappide ja nende pesade vahelise summaarse hüdraulilise tiheduse ja rõhulangetusvöö hüdraulilise tiheduse piirmäärad on vähemalt 30 s ja 10 s. Pihustite parameetrid mõõdeti stendil BOCH EFEP 60H. Pihustusrõhk reguleeriti uuritavatel pihustitel 175<sup>+5</sup> bar (Kirsi, 1991).

Eelkirjeldatud meetoditega saab hinnata toiteaparatuuri töövõimekust ja selle muutumist kaudselt. Otsesed mõõtmised detailide geomeetria ja pinnakareduse kohta teostati analoogiliselt nagu kaudsedki, enne katse algust ja peale katse lõppu. Plunžri ja hülsi komplektil mõõdeti läbimõõdud mikromeetriga kolmelt erinevalt kõrguselt x-telje suunas. Igat mõõtmist korrati kolm korda ja tähistati joonisel 1 toodud viisil: a, b ja c. Surveklappide rõhulangetusvööde läbimõõd mõõdeti joonisel 1 tähistatud kohas ja viisil. Mõõtmised teostati seadmega MAHR MMQ-100 (joonis 3). Katseandmete usaldatavuse eesmärgil mõõdeti plunžrite ja surveklappide rõhulangetusvööde geomeetrisi ümarusi kolm korda. Lisaks mõõdeti plunžri otsa pinnakaredused Rz ja Ra mõõteseadmega MAHR MarSurf MP-1. Mõõtmised teostati kahelt poolt alapikkusega 5,6 mm. MAHR MMQ-100 mõõteseadet kasutati ka pihustinõela silindrilise osa tööpinna ringilisuse mõõtmisel. Vastavad läbimõõdud mõõdeti mikromeetri abil.



Joonis 1. Kõrgrõhupumba detailide mõõtemetodid (Bazirov et al, 1978)  
Figure 1. Measurement methods for fuel injection pump details

Toiteaparatuuri sõlmedel viidi läbi lühiajalised katsetused (Baširov jt, 1978). Algmõõtmised teostati peale algparameetrite reguleerimist. Teine mõõtmine teostati peale ühetunnilist sissetöötamist, eesmärgiga kontrollida toiteaparatuuri algreguleeringu säilimist. Meie poolt valitud katsetuste pikkuseks oli 100 tundi. Iga kümne tunni järel teostati vahemõõtmised. Viimastega kontrolliti uuritavate tööparameetrite stabiilsust. Katsetuste läbiviimiseks konstrueeriti katseseade, mis põhines diiseltoiteaparatuuri katsestendil SDTA-1 ja lisaseadmetel. Lisaseadmete kasutamine oli vajalik selleks, et vältida etanoolkütuse negatiivset mõju katsestendile ja vähendada katsel kaotatavat kütuse kogust. Katsestend koosnes järgmistest seadmetest: kütusemahuti, peenpuhastusfilter, jahutusseade, kütusetorustik, termomeeter (joonis 2).



Joonis 2. Katseseadme põhimõtteskeem: 1– stend, 2 – kõrgrõhupump, 3 – etteandepump, 4 – pihusti, 5 – kütuseanum, 6 – jahutusüsteem, 7 – kõrgrõhutorud, 8 – kütuse etteandetorustik, 9 – termomeeter, 10 – peenpuhastusfilter  
 Figure 2. The scheme of the test principle: 1– stand, 2 – fuel injection pump, 3 – fuel pre-supply pump, 4 – injector, 5 – fuel container, 6 – cooling system, 7 – fuel injection pipes, 8 – fuel pre-supply pipes, 9 – thermometer, 10 – fine filter.

Kõrgrõhupumba töötemperatuuri püsivus  $t_{fp} = 37\text{ }^{\circ}\text{C}$  tagati stendile paigaldatud lisajahutusseadmega. Katsestendi pöörlemisageduseks valiti  $n_{fp} = 800\text{ min}^{-1}$ . Kõrgrõhupumba sektsioonide tootlikkust kontrolliti igal sektsioonil eraldi.

## Tulemused ja arutelu

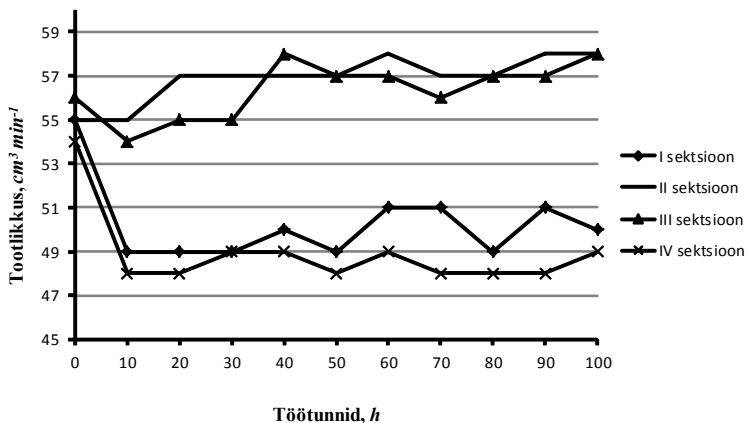
Toiteaparatuuri tehnilist seisundit hinnatakse sektsioonide tootlikkuse abil. Kui tootlikkus vastab tehnilistes tingimustes toodule, saab mootor igal töörežiimil ettenähtud koguse kütust. Seda eeldusel, et kõrgsurvepumba regulaator ja teised alaosüsteemid on korras. Tabelis 1 on katse läbiviimisel saadud sektsioonide tootlikkuse mõõtetulemused.

Tabel 1. Sektsioonide tootlikkus ( $\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$ )  
Table 1. Section capacity ( $\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$ )

| Katsed         | I sektsioon | II sektsioon | III sektsioon | IV sektsioon |
|----------------|-------------|--------------|---------------|--------------|
| Stendivedelik  | 56          | 57           | 58            | 56           |
| Etanool, 0 h   | 55          | 55           | 56            | 54           |
| Etanool, 10 h  | 49          | 55           | 54            | 48           |
| Etanool, 20 h  | 49          | 57           | 55            | 48           |
| Etanool, 30 h  | 49          | 57           | 55            | 49           |
| Etanool, 40 h  | 50          | 57           | 58            | 49           |
| Etanool, 50 h  | 49          | 57           | 57            | 48           |
| Etanool, 60 h  | 51          | 58           | 57            | 49           |
| Etanool, 70 h  | 51          | 57           | 56            | 48           |
| Etanool, 80 h  | 49          | 57           | 57            | 48           |
| Etanool, 90 h  | 51          | 58           | 57            | 48           |
| Etanool, 100 h | 50          | 58           | 58            | 49           |

Katsetulemustest selgub, et sõltumata diislikütuse ja etanooli tiheduse ning viskoossuse erinevustest kõrgsurvepumba sektsioonide tootlikkus oluliselt ei muutu. Etanooli kütteväärtus on ligikaudu kaks korda väiksem kui diislikütusel. Seepärast on soovitatav mootori võimsuskadude vältimiseks suurendada etanoolkütuse kasutamisel tsükletteannet. Esimese kümnetunnise katsetsükli lõpuks vähenesid esimese ja neljanda sektsiooni tootlikkused  $6 \text{ cm}^3 \text{min}^{-1}$  võrra. Tootlikkuse vähenemine oli tingitud kõrgsurvepumba sissetöötamisel tekkinud hülsi ja hammasvöö omavahelisest nihkumisest. Järgnevate katsetsüklike käigus olulist sektsioonide tootlikkuse vähenemist ei toimunud (joonis 3).

Teise katsetsükli lõpuks (pärast 10 töötundi) suurenes teise sektsiooni tootlikkus  $2 \text{ cm}^3$  võrra. Neljanda töötsükli ajal (pärast 30 töötundi) suurenesid ka kolmanda ja esimese sektsiooni tootlikkused. Pihustusrõhkude



Joonis 3. Kõrgrõhupumba sektsioonide tootlikkus olenevalt katse ajast  
 Figure 3. The section capacity of an injection pump depending on test time

|  |  |  |
|--|--|--|
|  |  |  |
| Pihustinõel 3 enne katset.<br>Hälve 0,338 µm         | Rõhulangetusvöö 3 enne katset.<br>Hälve 11,667 µm        | Plunžer 4 enne katset.<br>Hälve 2,203 µm         |
|  |  |  |
| Pihustinõel 3 pärast 100 töötundi.<br>Hälve 2,093 µm | Rõhulangetusvöö 3 pärast 100 töötundi.<br>Hälve 1,272 µm | Plunžer 4 pärast 100 töötundi.<br>Hälve 3,870 µm |

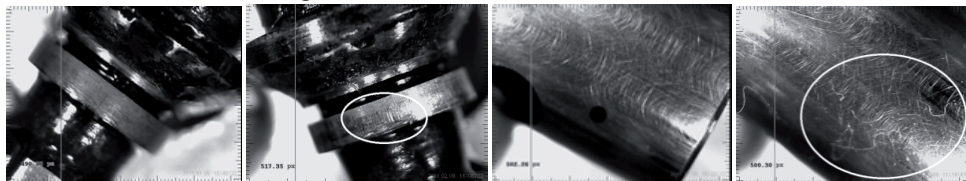
Joonis 4. Detailide geomeetrilise ümaruse mõõteandmed  
 Figure 4. Measurement results of the geometric circularity of subsystem details



mõõtmistulemuste alusel võib järeldada, et tootlikkuse suurenemine oli tingitud pihustusrõhkude vähenemisest: I sektsioon – 28 bar; II sektsioon – 30 bar; III sektsioon – 40 bar; IV sektsioon – 20 bar. Neljanda sektsiooni pihustusrõhk muutus katse käigus kõige vähem. Seda iseloomustab ka tootlikkuse stabiilsus katse vältel. Teiste sektsioonide pihustusrõhkude muutus oli suurem, kuid jäid normi piiridesse, suurendamata oluliselt tootlikkust.

Pihustusrõhkude vähenemine oli tingitud pihustinõelte tööpindade sisetöötamisel tekkinud kulumisest. Pihustinõela geomeetrilise ümaruse mõõtmisel oli kõige suurem hälve kolmanda sektsiooni nõelal (joonis 4). Üldine tendents oli, et kujuhälbed vähenesid katse käigus. Kolmanda sektsiooni pihusti puhul hälve aga suurenes. Sellele vaatamata võib järeldada, et etanooli kasutamisel ei toimu pihustite pretsiisete sõlmede ülikiiret kulumist.

Rõhulangetusvöö geomeetrilise ümaruse mõõtetulemustest ilmnes, et keskmine hälve vähenes kõikidel sektsioonidel. Hälvete vähenemine oli tingitud detailide sisetöötamisest. Võib järeldada, et klappide töötamine etanooli keskkonnas ei põhjusta 100 töötunni jooksul olulist kulumist, mis põhjustaks toiteaparatuuri tootlikkuse olulist muutust. Sama võib väita plunžri ja hülsi kulumise iseloomustamiseks. Kõige suurema hälbega (1,667  $\mu\text{m}$ ) oli neljas plunžer (joonis 4). Plunžri ja hülsi komplekti hüdraulilise tiheduse mõõtmisel ei erinenud tulemused algsetest mõõteandmetest ning saadud tulemused vastasid tehasetingimustele. Mikroskoobi all on näha, et plunžri pinnale on tekkinud vähemärgatavad kriimustused. Suuremad kriimustused on näha surveklappide rõhulangetusvöödel (joonis 5), mis mõõtetulemuste põhjal ei muutnud nende hüdraulilise tiheduse vastavust tehasetingimustele.



Joonis 5. Plunžri ja rõhulangetusvöö tööpinnad  
Figure 5. Work surface of subsystem

Kõikide mõõtmiste tulemusena saadi plunžrite keskmine pinnakaredus  $R_a = 0,035 \mu\text{m}$ . Pinnakonaruste kõrgeima tipu ja madalaima süvendi vahe oli  $R_z = 0,6 \mu\text{m}$ . Plunžrite ja pihustinõelte läbimõõdud enne ja pärast katset ei erinenud rohkem kui  $0,003 \mu\text{m}$ . Ainsaks erandiks on kolmanda sektsiooni pihusti, mille pihustinõela läbimõõt oli vähenenud  $0,007 \mu\text{m}$  ja sellest oli tingitud pihustusrõhu olulisim vähenemine.

Peamiseks probleemiks etanooli kasutamisel kõrgsurvepumbas oli etanooli sattumine määrdelisse. Probleemsus seisneb etanooli ja õli mitte-segunemises, mis võib tekitada tsentraalõlitusega mootorites, kus kasutatakse antud tüüpi kõrgrõhupumpasid, tõsiseid probleeme. Plunžri ja hülsi komplektid, kus on olemas lisatagasivoolusoon, eelmainitud probleem ilmnedu ei tohiks, kuid see ei olnud antud uurimuse põhieesmärk. Teiseks ilmnenu probleemiks oli pumba seismisel tekkinud korrosioon, mis kahjustab liikuvate detailide tööpindasid.

### **Kokkuvõte**

Käesoleva artikli eesmärgiks oli määrata etanooli mõju diiselmootori kõrgsurvepumba UTN-5A väljundparameetritele ja toiteaparatuuri alaosüsteemide detailidele. Katsetes selgus, et:

- 1) võrreldes diislikütuse kasutamisega, pumba sektsioonide tootlikkus bioetanooliga töötamisel samade toiteaparatuuri tööparameetrite juures oluliselt ei muutu;
- 2) bioetanooliga töötamisel ei ilmnenu olulisi tööpindade kahjustusi, mis võiksid mõjutada toiteaparatuuri tootlikkust ja töökindlust;
- 3) mõõdetud töödetaile geomeetiline ümarus üldjuhul paranes. Sellest saab järeldada, et bioetanooli keskkond sobib uurimuses käsitletud detailide sissetöötamiseks;
- 4) antud tüüpi kõrgsurvepumba puhul satub bioetanool läbi plunžri ja hülsi komplekti pretsiisete pindade määrdelise hulka. See on tingitud etanooli madalast viskoossusest;
- 5) bioetanooliga töötanud toiteaparatuuris, mis on pikemaks ajaks seisma jäänud, on tööpindade korrodeerumise oht suurem kui diislikütusega töötanud aparatuuri puhul.

Kokkuvõtteks võib ütelda, et bioetanooli kasutamisel toiteaparatuuris ei toimu pretsiisete sõlmede kinnikiilumist ja sellest tulenevat alasüsteemi purunemist. Kuid antud katsete põhjal ei ole võimalik anda täpset hinnangut toiteaparatuuri eksploatatsiooni maksimaalsele kestvusele. Autorid soovivad kasutada siiski määrimist parendavaid lisandeid. Antud valdkonnas on planeeritud teostada täiendavad uuringud teistsuguse konstruktsiooniga diiselmootori toiteaparatuurides, kasutades erineva alkoholi sisaldusega etanoolisegusid, mis põhinevad taastuvatel toorainetel.

### **Kasutatud kirjandus**

- Baširov R., Kislov V., Pavlov V., Popov V. (1978) Reliability of fuel injection equipment tractor and combine diesels. Engineering. – 184 p.
- Govindarajan, K. (2008) Alcohol as an Automotive Fuel. [http://www.che-resources.com/energy\\_future/ethanol\\_transportation\\_fuel.shtml](http://www.che-resources.com/energy_future/ethanol_transportation_fuel.shtml)
- Harndorf, H., Schuemann, U., Wichmann, V., Fink, C. (2008) Motorprozessverhalten und Abgasemissionen alternativer Kraftstoffe im Vergleich mit Dieselmotoren, MTZ 7–8/2008, 69 Jahrgang, S. 640–646.
- Kirsi, T. (1991) Masinate tehnohooldus, diagnostika ja remont. Tallinn: Valgus, 400 lk.
- Ma, X. Q., DeCarmin, Xiao, T. D. (2004) Plasma Spray High Lubricity Nanocomposite Coatings. Thermal Spray 2004, Advances in Technology and Application.
- Olt, J., Mikita, V., Ilves, R., Küüt, A., Madissoo, M. (2011) Impact of ethanol on the fuel injection pump of diesel engine. 10th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development” – 26–27 May 2011, Jelgava, Latvia, pp. 248–253.
- Steinbach, N., Harndorf, H., Weberbauer, F., Thiel, M. (2006) Motorisches Potential von synthetischen Dieselmotoren, MTZ 02/2006, 67 Jahrgang, pp. 96–102.

### **Märkus**

Artikkel publitseeriti 10. rahvusvahelise teaduskonverentsi “Engineering for Rural Development” kogumikus. Esmaettekande tegi Risto Ilves 26. mail 2011 Läti Põllumajandusülikoolis Jelgavas.

# **IMPACT OF ETHANOL ON THE FUEL INJECTION PUMP OF DIESEL ENGINE**

Jüri Olt, Villu Mikita, Risto Ilves, Arne Küüt, Marten Madissoo  
Estonian University of Life Sciences

In general, it is not purposeful to use ethanol as diesel engine fuel, because it causes problems in the fuel system. When using ethanol in an in-line fuel-injection pump, one common problem is the rapid wear or jamming of plunger work surfaces. These problems arise due to the physical and chemical properties of ethanol. In order to study the wear-and-tear and work parameters of the pump, a test was performed with used in-line fuel-injection pump. The selection of this pump was based on the average operation period of a tractor, in the case of machinery already used in agriculture. This work provides test data acquired by using bioethanol in fuel-injection pump and the analysis of the results obtained (Olt, J. et al, 2011).

# ROHUSILO JA SÖNNIKU BIOGAASIPOTENTSIAALI PRIMAARENERGEETILISE OLELUSRINGI- JA RESSURSSIDE RUUMIANALÜÜSI METOODIKA ARENDAJINE TARTUMAA NÄITEL

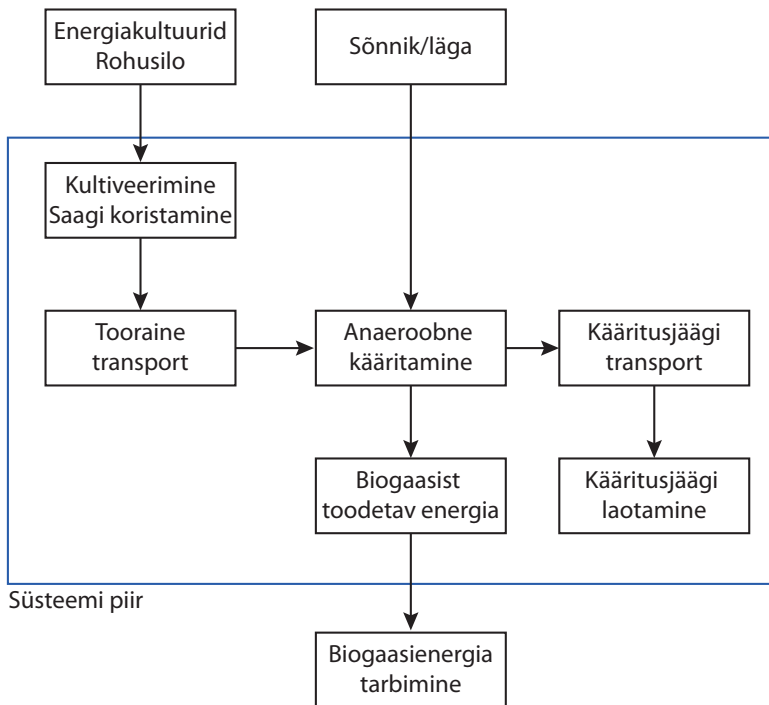
Sander Jahilo, Antti Roose  
Geograafia osakond, Tartu Ülikool

## Sissejuhatus

Kohalikul ressursside jaotusel on kriitiliselt otsustav mõju biogaasi tootmise energeetilisele efektiivsusele. Uurimistöö eesmärgiks oli välja töötada meetodika, mille põhjal saab erinevates stsenaariumites hinnata sõnniku ja silo anaeroobse kääritamise tõhusust. Mudelmaakonnaks valiti Tartumaa. Modelleerimisel kasutati kartograafilist ruumianalüüsi ja primaarenergeetilist olelusingianalüüsi. Hinnati ja võrreldi erinevate hüpoteeetiliste CSTR-tüüpi (pidevvooluliste segu-tüüpi reaktoritega) biogaasijaamade energeetilisi sisendeid/väljundeid ning arvestati seejuures hüpoteeetilise biogaasijaama asukoha eripäraga siloressursside osas. Töös võrreldi omavahel suuri ja väikeseid sigalaid ja veisefarme, läga monokääritamist ja siloga kooskääritamist. Aluseks võeti Tartumaal realselt tegutsevad sea- ja veisefarmid ning kõlvikuline jaotus.

## Andmed ja meetodika

Energeetilise olelusingi uurimiseks rakendati olelusingi analüüsi ehk LCA-d (Life Cycle Assessment), mis hõlmab kõiki toote olelusingi etappe n-õ "hällist hauani", sealhulgas toorainete hankimist, toormaterjalide töötlemist ja toote valmistamist, transporti, kasutamist, hooldust, ümber töötamist ja jäätmete ladustamist (<http://www.gdrc.org/uem/lca/lca-define.html>). Kuna uurimistöö eesmärk oli analüüsida kitsamalt energeetilist efektiivsust, viidi läbi energia-olelusingianalüüs ehk LCEA (Life Cycle Energy Assessment). LCEA puhul kasutatakse primaarenergiaühik džaul kirjeldab koguenergiat, mis kulub lõpliku energiatootete valmistamiseks, sisaldades kõigi tarbitud kütuseliikide konverteerimata kulusid ning kadusid (Gustavsson ja Joelsson 2010). Uuritava süsteemi piirid on toodud joonisel 1. Joonisel on näha, et süsteemi kuuest komponendist viis kuluavad energiat ning üks (biogaas) sisaldab seda.



Joonis 1. Uuritava biogaasi tootmistsükli süsteemi piirid  
Figure 1. Life cycle energy assessment system boundaries

Antud töö üks põhilisi ruumianalüütilisi eeldusi oli, et silo tootmiseks kasutatakse vaid põllumajandusmaid, mis on kasutusest välja langenud. Kolme kasutatud substraadi, poolvedela sea- ja veisesõnniku ning hari-liku timuti (*Phleum pratense*) ja punase ristiku (*Trifolium sativum*) konserveeritud biomassisegu saagised ja tekkekogused on toodud tabelis 1.

Tabel 1. Substraatidele seatud eeldused  
Table 1. Substrate characteristics

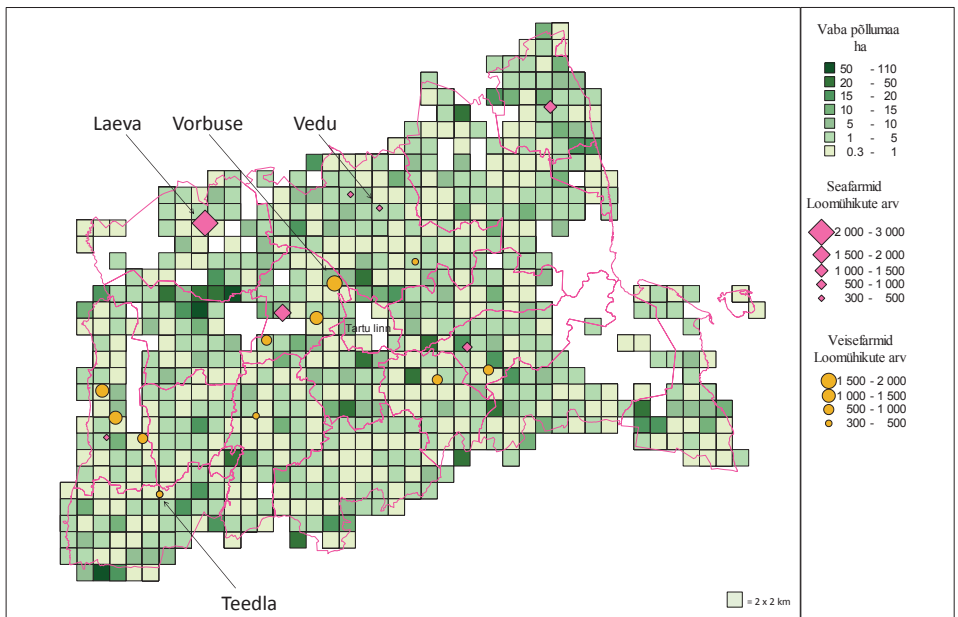
|           | Kogus päevas <sup>[1]</sup><br>kgVM | Saagikus <sup>[2]</sup><br>tKA/ha | Kuivaine <sup>[3]</sup><br>% | LOA <sup>[3]</sup><br>%<br>kuivainest | Metaani-<br>potentsiaal <sup>[3]</sup><br>m <sup>3</sup> /tLOA |
|-----------|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|--|
| Sealäga   | 15,6                                |                                   | 6,99                         | 79,4                                  | 317  |
| Veiseläga | 49                                  |                                   | 7,8                          | 73,3                                  | 235  |
| Rohusilo  |                                     | 8                                 | 31,4                         | 92,8                                  | 319  |

VM - värsk mass, KA - kuivaine, LOA - lenduvorgaaniline aine

## Ruumianalüüs

Tartumaa kogupindalast, 299 275 hektarist on 107 714 ha deklareeritud põllumajandusregistris põllumaana (Põllumajanduse Registreite ja Informatsiooni Amet, 2003. a andmed). Põlde, mis ei olnud ühtset pindalatoetust (ÜPT) ehk PRIA toetusmeedet põllumajandusliku tegevuse toetamiseks taotlenud, oli 2010. aastal 20 552 ha. Neid eeldati olevat põllumajandus-kasutusest väljas. Nendest põldudest rakendati ruumimudelil rohekultuuride kultiveerimiseks 20% (Oja 2010).

Maakonna vabade põldude jaotumise, visualiseerimise ning analüüsimise lihtsustamiseks jaotati Tartumaa pind  $2 \times 2$  km suurusteks ruutudeks, omistades igale ruudule temas sisalduvate vabade põllumaade kogupindala 20% ulatuses (joonis 2).



Joonis 2. Sea- ja veisefarmide ning kasutamata põllumaa jaotus Tartumaal  
Figure 2. A visualisation of potential cattle manure, pig manure and unused agricultural land resources in Tartu county

## Stsenaariumid

Farmide kui potentsiaalsete biogaasijaamade asukohavaliku aluseks oli kõige suurema ning kõige väiksema üle 300 loomühikuga farmi valimine. Nullstsenaarium viitab olukorrale, kus kääritamissubstraadina kasutatakse vaid farmist saadavat sõnnikut ehk toorainet ei transpordita, küll aga transporditakse kääritusjääki. S-stsenaarium kirjeldab kooskääritamist siloga. Sellisel juhul tuleb vedada antud farmi juures asuvasse hüpoteetilisse biogaasijaama lisatoorainena silo ning kogu sõnnikust ja silost tekkiv kääritusjääk tagastada põldudele. Tabel 2 kirjeldab lühidalt stsenaariume ning esitab energiatarbe ning väljundvõimsuste tulemused.

Vajamineva rohemassi kasvatamise pindala osas arvestati kooskääritamise optimaalseima sõnniku ja silo lenduvorgaanilise aine suhtega 70 : 30 (Lehtomäki jt 2006), mis peaks andma kõrgeima metaanisaaigise.

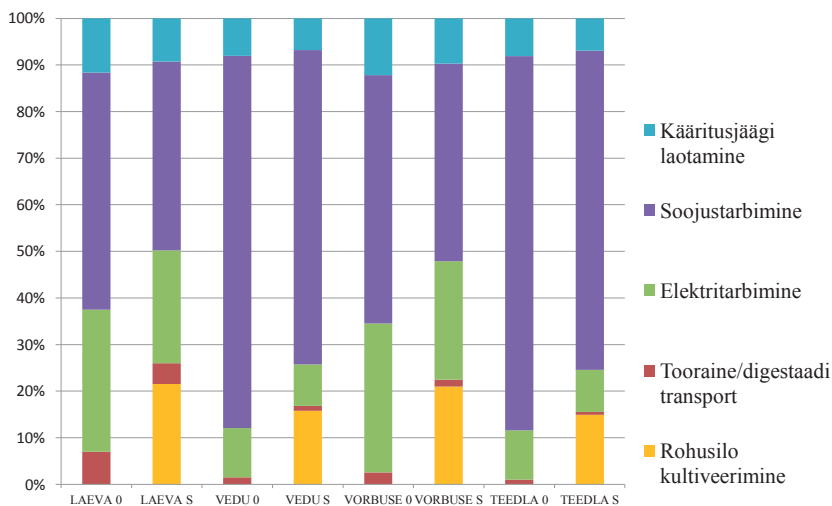
*Tabel 2. Hüpoteetiliste biogaasijaamade energiavood ja –bilanss*  
*Table 2. Energy flows and balances of the biogas scenarios*

| Stsenaarium | Loomühikute arv | Toodetud metaan (m <sup>3</sup> /a) | Väljundprimaarenergia (GJ/a) | Sisendprimaarenergia (GJ/a) | Netoprimaarenergia (GJ/a) |
|-------------|-----------------|-------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Laeva 0     | 2 892           | 853 337                             | 32 302                       | 10 479                      | 21 823                    |
| Laeva S     | 2 892           | 1 221 360                           | 46 214                       | 14 263                      | 31 952                    |
| Vedu 0      | 419             | 123 697                             | 4 682                        | 2 197                       | 2 485                     |
| Vedu S      | 419             | 177 044                             | 6 699                        | 2 819                       | 3 880                     |
| Vorbuse 0   | 1 613           | 387 605                             | 14 633                       | 5 957                       | 8 676                     |
| Vorbuse S   | 1 613           | 613 100                             | 23 157                       | 8 983                       | 14 174                    |
| Teedla 0    | 309             | 74 253                              | 2 803                        | 1 720                       | 1 083                     |
| Teedla S    | 309             | 117 451                             | 4 436                        | 2 420                       | 2 016                     |

## Tulemused

Sisendite tundlikkuse analüüs näitas, et domineerivaks energiat tarbivaks protsessiks on biogaasijaama enda soojustarbimine, mis eriti teravalt väljendub väikestes biogaasijaamades, näiteks 80% kogu energiatarbest nii Teedlas kui Vedul (joonis 3), kõige vähem aga suurtes silo kooskääritavates jaamades, näiteks 40% Laeval ja 42% Vorbusel. Keskmiselt teine suurim energiatarbija kääritite segamiseks, tooraine peenestamiseks jms





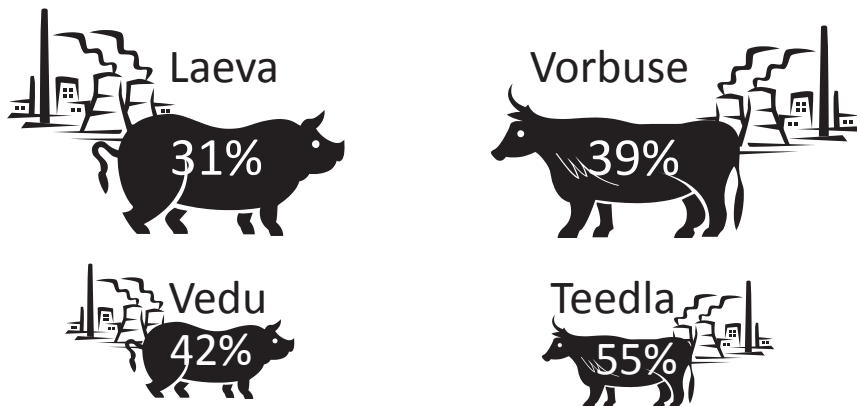
Joonis 3. Stsenaariumide sisendi osakaalude võrdlus

Figure 3. Input sensitivity analysis of 8 hypothetical biogas scenarios

on jaama omatarve, mis küündib väikestes farmides kümnendikuni, suurtes isegi kolmandikuni energiatarbest.

Energiasisendite tarbimises on suurimat arenguruumi näha biogaasi-jaama omatarbe efektiivsemaks muutmisel, kuna selle osakaal kõigub väiksemate monokääritamisjaamade ligi 90%-st kuni suurte kooskääritavate jaamade 60%-ni. Süsteemide tõhustamiseks tuleb parandada kääritite isolatsiooni (suletust, hermeetilisust) ning kasutada võimalikult energiasäästlikke seadmeid.

Transpordikulud ületavad viie protsendi künnise Laeva nullstsenaariumi puhul (7%), jäädes siloga kooskääritamisel pisut alla selle (4,4%), teistes stsenaariumites aga sootuks madalale, 0,5% ja 2,5% vahele. Lisaks hinnati uurimistöös silo ja kääritusjäägi transportimiskaugusi nõ linnulennult, kuid tundlikkuse analüüsi põhjal võib väita, et ka kõige ebasobivama loogistilise lahenduse korral ei kasva transpordenergia osakaal üldises energibilansis üle 10%. Laeva, mille 5 km raadiuses on vabu põlde küllaltki vähe ja mis peab seetõttu sisendit vedama kaugemalt, oleks sellest hoolimata energeetiliselt kõige tõhusam biogaasijaam (joonis 4). Sisendite



Joonis 4. Sisendite ja väljundite suhe kahe suure ja kahe väikese sea- ja veisefarmi kooskääritamise stsenaariumide korral  
 Figure 4. Input/output ratios of hypothetical large and small pig and cattle farm biogas plants. Co-digestion scenarios

võrdluse juures väärib veel tähelepanu tõik, et silo kultiveerimise korral muutub biogaasijaam energeetiliselt efektiivsemaks: selle põhjuseks on silost saadav lisa(biogaasi)energia, mis on tonni värske massi kohta suurem kui sõnniku puhul ning ületab ka kultiveerimiskulud.

### Kokkuvõte

Välja töötatud meetoodika võimaldab maakonna- või regioonipõhiselt hinnata biogaasijaama asukohavalikut. Edasises analüüsis tuleb aga täiendavalt arvestada mullastiku varieerumisega, kohandada transpordimudelit reaalse teedevõrguga ning teha majanduslik tasuvusanalüüs.

Biogaasi tootmise muutujaid, kohalikke olusid ja ressursse arvesse võttes ning ka Eesti biogaasisektori seniseid õppetunde üldistades ei tohiks kääritamise efektiivne juhtimine nii ühe kui ka mitme substraadi kooskääritamisel olla probleemiks, kui rakendatakse optimaalseid tehnoloogilisi lahendusi.

Uurimus tehti Eesti Teadusfondi grandil ETF5479 ning Läänemere programmi SPIN-projekti toetusel.

## **Kasutatud kirjandus**

- Defining Life Cycle Assessment. - The Global Development Research Center, 2011. <http://www.gdrc.org/uem/lca/lca-define.html>
- Gustavsson, L., Joelsson, A., Life cycle primary energy analysis of residential buildings. - Energy and Buildings, 2010, lk 210-220.
- Kangas, A., Laine, A., Niskanen, M., Salo, Y., Vuorinen, M., Jauhiainen, L. et al., Results of official variety trials 1996-2003. Jokioinen: MTT Agrifood Research Finland, 2004.
- Keskkonda säästev sõnniku hoidmine ja käitlemine. Keskkonnaministeerium, Põllumajandusministeerium, AS Maves. Tallinn, 2004.
- Lehtomäki, A., Huttonen, S., Rintala, J. A., Laboratory investigations on co-digestion of energy crops and crop residues with cow manure for methane production: Effect of crop to manure ratio. Resources Conservation & Recycling, 2006, lk 591-609.
- Luna Del Risco, M., Normak, A., Orupõld, K., Biochemical methane potential of different organic wastes and energy crops from Estonia. - Agronomy Research (in print). 2011.
- Oja, A., Eesti biogaasisektori ülevaade: hetkeseis ja arenguvajadused. Tartu-Ääsmäe: Tartu Ülikooli loodus- ja tehnoloogiateaduskond, 2010.

## **ASSESSMENT OF BIOGAS PRODUCTION SCENARIOS FROM GRASS SILAGE AND MANURE IN ESTONIA THROUGH SPATIAL AND LIFE CYCLE ENERGY ANALYSIS**

Sander Jahilo, Antti Roose  
Department of Geography, University of Tartu

Biogas is an important renewable energy source, which has largely been ignored in Estonia due to lack of interest, knowledge and funding. Based on previous life cycle energy assessments and literature, geographic and statistical data from local authorities and national agricultural registrars was analyzed from a spatial perspective to develop a method for more accurate and geo-specific assessment of pig and cattle manure and grass silage resources for biogas production in Tartu county. A primary energy

approach was chosen to make future economic assessments more accurate. For a more detailed description, eight scenarios based on four real-life cattle and pig farms of two sizes (large and small) were performed.

The researched biogas system involves several steps of production – from silage cultivation to digestate handling. All types of biogas production chains showed positive net energy balance. The most efficient were shown to be large pig farms employing co-digestion with grass silage, demonstrating 31% input consumption. The least efficient were small cattle farms with monodigestion of cattle manure. Input analysis showed a steep effect of biogas plant heat and electricity consumption – in small-scale farms electricity and heat amounted to nearly 90% of all inputs, while in large-scale farms the percentage was reduced to 60%. Silage cultivation accounted for roughly 10-20% of all inputs but this was offset by more efficient transportation (due to smaller water content) and higher biogas potential due to co-fermentation (70:30 ratio per manure and silage volatile solids, respectively).

Transport analysis encompassed a spatial assessment of resource distribution for the scenarios. A model was attributed, which attempted to predict the optimal area for gathering 30% of volatile solids ratio in the co-digestion scenarios. Comparing the model to actual land analysis demonstrated differences between theoretical and perceived haulage rates, which in an economical assessment would prove to be significant, however, neglected to influence the total primary energy inputs by more than 6%.

From a primary energy perspective, all studied biogas plants were viable. The documented 19 pig and cattle farms could theoretically account for approximately 9% of the methane requirements of the city of Tartu.

# EHITISINTEGREERITUD FOTOELEKTRILISTE PÄIKESEPANEELIDE TOOTLIKKUS JA MAJANDUSLIK TASUVUS EESTI KLIIMAS AASTAL 2011

Annika Päsik<sup>a</sup>, Andri Jagomägi<sup>b</sup>, Egris Mõttus<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, Harju 11, Tallinn 15072  
annikapasik@mkm.ee,+372 506 1965

<sup>b</sup>Tallinna Tehnikaülikool, Materjaliteaduse instituut, Ehitajate tee 5, Tallinn 19086  
andri.jagomagi@gmail.com,+372 5666 4834

## Annotatsioon

Töö eesmärgiks oli leida Eesti tingimuste jaoks sobivaim PV-tehnoloogia ja võrrelda eramajale paigutatud erinevatel tehnoloogiatel baseeruvate PV-süsteemide installeerimise hindu, tootlikkust ning tasandatud elektri hinda 10- ning 20aastase kasutusperioodi jooksul. PV-tehnoloogiatest käsitlesime pc-Si-,  $\mu\text{c}/\alpha\text{-Si}$ - ja CdTe-materjalidel baseeruvaid paneele ning võrdlesime omavahel nii katusele kui ka fassaadile paigutatud installatsioonide puhul võrku ühendatud ja autonoomseid süsteeme. Võrku ühendatud PV-süsteemide hulgast on madalaim esialgse investeeringu kulu  $\mu\text{c}/\alpha\text{-Si}$ -paneelidega katusesüsteemil (2272 €/kWp). Arvutused näitavad, et madalaim tasandatud elektri hind tuleb CdTe-süsteemi puhul nii 10- kui ka 20aastase tööperioodi jooksul (võrku ühendatud katusesüsteemil vastavalt 0,31 €/kWh ja 0,21 €/kWh). Madalama hinna põhjuseks on CdTe-paneelide kõrge tootlikkus kWp kohta ning madalam kWp hind. CdTe katusesüsteemi aastane tootlikkus ühikvõimsuse kohta (1003 kWh/kWp) on kõrgem kui pc-Si- (900 kWh/kWp) või  $\mu\text{c}/\alpha\text{-Si}$ -süsteemi (805 kWh/kWp) tootlikkus. Autonoomse süsteemi tasandatud elektri hind on 10aastase kasutusaja jooksul 1,4–1,7 korda ning 20aastase kasutusaja jooksul 1,6–2,1 korda kallim kui võrku ühendatud süsteemi hind. Katusesüsteemide poolt toodetud elekter on võrguühenduse korral 1,3–1,4 korda odavam kui fassaadisüsteemide korral.

*Märksõnad: päikeseenergeetika, fotoelektriline, päikesepaneel, ehitisintegreeritud*

## Sissejuhatus

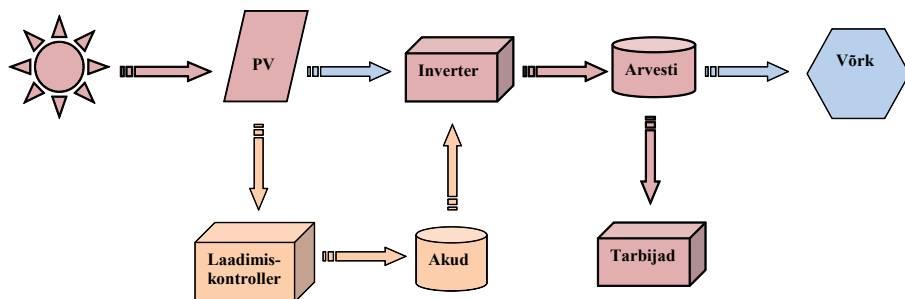
Kogu Euroopa Liidus on trend energeetikas suurendada taastuvate energialiikide osakaalu. Üheks alternatiiviks taastumatutele energiaallikatele on elektri tootmine päikesekiirgusest fotoelektriliste (PV – ingl k *photo-voltaic*) paneelide abil. Rohkem kui 80% maailma PV- paneelide võimsusest on installeeritud Euroopa Liidu territooriumile (Menna 2011). Suurimad liidrid ELi siseselt on Saksamaa, Itaalia, Tšehhi ja Prantsusmaa. Eestis on PV-installatsioonide koguvõimsus hetkel marginaalne. Sellegipoolest on Eesti päikeseenergeetiline potentsiaal sama suur kui Saksamaal keskmiselt ning aastane päikeseenergia hulk on võrreldav Põhja-Prantsusmaaga (Šúri 2007).

Käesoleva artikli esimeseks eesmärgiks on välja selgitada sobivaim PV-tehnoloogia Eesti kliimas kasutamiseks. Omavaheliseks detailsemaks võrdluseks valisime TTÜ katselabori mõõtmisandmete ning teaduskirjanduse põhjal välja kolm potentsiaalselt tasuvamat tehnoloogiat: pc-Si,  $\mu$ c-Si ja CdTe.

Saksamaa suur PV koguvõimsus on saavutatud tänu ehitisintegreeritud süsteemidele. Selliste süsteemide all mõistetakse ehitise katusele või fassaadile paigutatud PV-süsteeme. Energeetikas tavaliselt kasutatav termin erinevate energiatootmise meetodite võrdlemiseks on tasandatud elektri hind. See sisaldab kõiki tootmisega seotud kulusid alates esialgselt investeeeringust, haldamisest, kasutatud kütusest ning asendatud süsteemi osadest. Artikli teiseks eesmärgiks on hinnata, milline on eramajale paigutatud PV-süsteemi tasandatud elektri hind Eestis 10- ja 20aastase kasutusperioodi jooksul. Arvutused on läbi viidud nii võrku ühendatud kui autonoomse süsteemi tarbeks.

## Meetodid

Joonisel 1 on välja toodud nii võrku ühendatud kui autonoomse süsteemi komponendid. Võrku ühendatud süsteemi peamisteks komponentideks on PV-paneelid, inverter, arvesti, kohalikud tarbijad ning elektrivõrk. Inverter on ühendatud PV-paneelidega ning tema eesmärk on muuta paneelide



Joonis 1. PV-süsteemi skeem. Roosaga on tähistatud komponendid, mis kuuluvad nii võrku ühendatud kui autonoomsete süsteemide juurde. Sinisega on tähistatud võrku ühendatud süsteemi lisakomponendid ning oranžiga on tähistatud autonoomse süsteemi lisakomponendid.

Figure 1. Components of grid connected and off-grid PV systems. The blue components belong only to on-grid and the orange components belong only to off-grid systems

poolt toodetud DC-vool standardseks AC-vooluks. Võrk täidab sellise süsteemi puhul salvestaja rolli. Kui PV-süsteemi hetkevõimsus on suurem kui kohalik tarbimine, siis suunatakse üleliigne vool võrku. Võrgu operaator ostab arvesti näidu järgi võrku sisestatud energia kokkulepitud hinnaga. Kui PV-süsteemi hetkevõimsus on väiksem kui kohalik tarbimine, saab majapidamine puuduoleva võimsuse võrgust ning maksustamine toimub vastupidises suunas. Autonoomseid süsteeme kasutatakse juhul, kui ligipääs elektrivõrgule puudub. Sellisel juhul toimub salvestamine akudesse. Lisakomponentideks on siinkohal akud ning laadimiskontroller. Inverter on autonoomse süsteemi puhul ühendatud akudega.

Et hinnata PV-süsteemi tootlikkust, on tarvis teada kohalikku kliimat ning selle mõju erinevat tüüpi päikesepaneelidele. Kõige tugevamat mõju päikesepaneeli efektiivsusele omavad päikesekiirguse hulk ning paneeli temperatuur, mis omakorda sõltub välisõhu temperatuurist, päikesekiirguse hulgast, paneeli monteerimise viisist ning tuule kiirusest. Analüüsides paneelide väljundparameetrite sõltuvust keskkonnaparameetritest, on võimalik luua ning valideerida paneelide käitumise mudeleid ning ennustada nende tootlikkust ilma konkreetset paneeli kohapeal testimata. Erinevate PV-paneelide tootlikkuse ennustamise mudelite võrdlus Eesti kliimas kasutamiseks on toodud magistritöös (Mõttus 2009).

Antud töö eesmärgiks oli leida sobivaim PV-tehnoloogia meie kliimas kasutamiseks. Selleks võrdluseks valisime kolm perspektiivsemat PV-mooduli tüüpi – pc-Si (valitud paneeli efektiivsus 14,3%, nominaalvõimsus 185 W), mis põhineb vahveltehnoloogial ning õhukesekihilistel tehnoloogiatel põhinevad  $\mu\text{c}/\alpha\text{-Si}$  (valitud paneeli efektiivsus 9%, nominaalvõimsus 135 W) ja CdTe (valitud paneeli efektiivsus 11,1%, nominaalvõimsus 80 W) (Technical data sheets, 2011). Paneelide tootlikkuse arvutuste juures oli CdTe-paneeli puhul aluseks PVGIS-andmebaasi (Šúri 2007) ning teiste paneelide puhul TTÜ labori andmed.

Eramu PV süsteemi maksumuse arvutamiseks on võetud reaalne eramaja suurusega 124 m<sup>2</sup>, mille keskmine aastane elektrienergia tarbimine on ca 4000 kWh. Antud eramule sobiv süsteem katmaks aastast elektrienergia tarbimist on nominaalvõimsusega ca 6kWp. Maksimaalse tootlikkuse saavutamiseks arvestasime, et katuse serv on lõunasse orienteeritud, kaldenurgaga 45°. Vastavalt erineva tehnoloogiaga paneelide mõõtmetele ja võimsustele kalkuleerisime moodulite arvu ning leidsime iga süsteemi tegeliku nominaalvõimsuse nii katuse kui fassaadi jaoks. Tasandatud elektri hinna arvutamise aluseks on süsteemi projekteerimise, komponentide soetamise, installeerimise, investeeringu intresside ning hilisema haldamise kulud. Eestis on PV-tehnoloogia turu käive hetkel liiga väike, seetõttu on arvutuste aluseks võetud meile suhteliselt lähedal asuva Saksamaa turuhinnad, kuna tegu on maailma kõige arenenuma turuga PV-tehnoloogia valdkonnas. Seega on süsteemide maksumuse ja tasandatud elektri hinna leidmisel andmete allikaks erinevad Saksamaa fotoelektrilise tehnoloogia turu-uuringud (Photon International Aprill 2011, Photon International Nov 2010). Samuti viisime läbi e-posti teel turu-uuringu Saksa PV-firmade esindajate, projekteerijate ja edasimüüjatega (Päsik 2011).

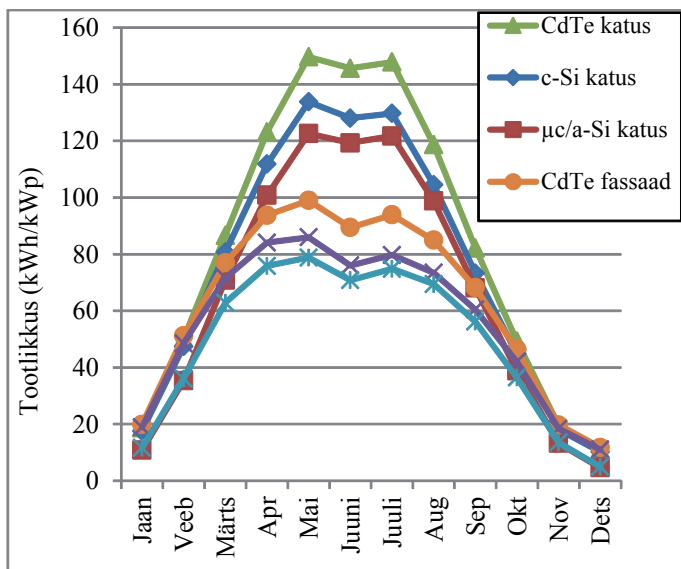
### **Tulemused ja arutelu**

TTÜ 2009. aasta mõõtmistulemused näitavad, et aastane kiirgushulk optimaalselt orienteeritud pinnal (kaldenurk ca 42°) oli 1174 kWh/m<sup>2</sup>, horisontaalsel pinnal 995 kWh/m<sup>2</sup> ning hajusa kiirguse hulk 470 kWh/m<sup>2</sup>.





Võrreldes omavahel erinevate PV-tehnoloogiatel baseeruvate PV-süsteemide tootlikkust, leidsime, et CdTe katusesüsteemi aastane tootlikkus ühikvõimsuse kohta (1003 kWh/kWp) on kõrgem kui pc-Si- (900 kWh/kWp) või  $\mu\text{c}/\alpha\text{-Si}$ -süsteemil (805 kWh/kWp) (joonis 3). CdTe kõrgem tootlikkus tuleneb madalast temperatuurikoefitsiendist ja kõrgemast efektiivsusest kehvemates päikesevalguse tingimustes, nagu pilvisus, hämarik või koit. pc-Si on temperatuuri tõusule tundlikum kui õhukesekihilised tehnoloogiad (Huld 2010). CdTe efektiivsuse temperatuurikoefitsient on  $-0,25\%/C$ . Kristalse räni puhul on vastav koefitsient  $-0,5\%/C$ . Seetõttu CdTe tootlikkus on suvekuudel kõrgem kui pc-Si või  $\mu\text{c}/\alpha\text{-Si}$  tootlikkus. pc-Si-mooduli keskmine hind Saksamaa turul on 1,41 €/W, samas  $\mu\text{c}/\alpha\text{-Si}$  si on 1,21 €/W ja CdTe puhul 1,20 €/W (Photon International, April 2011). Lisaks moodulitele on süsteemi üks kallemaid komponente inverter ning autonoomse süsteemi puhul veel laadimiskontroller ning akupank (Tabel 1). Kõikide süsteemide korral peab arvestama, et inverterit, laadimiskontrollerit ja akusid peab vahetama iga 10–15 aasta järel. Inverteri hind on



Joonis 3. Erinevate PV-süsteemide arvatud tootlikkus Eestis erinevatel kuudel.  
 Figure 3. Performance of different PV systems in Estonia. The first three are rooftop and the rest are facade systems.

üle 5 kW PV-süsteemi jaoks 336 €/kWp, laadimiskontrolleri hind 785 €. Akudesüsteemi hind (7x260Ah tagamaks 2päevase varu) on 4683 €. Võrku ühendatud PV-süsteemide hulgast on madalaim esialgse investeeringu kulu  $\mu\text{c-}/\alpha\text{-Si}$  paneelidega süsteemil, milleks kujunes arvutuste järgi 2272 €/kWp katusesüsteemil ja 2166 €/kWp fassaadisüsteemil.

Kümne ja kahekümne aasta tasandatud elektri hinnale lisandub ka panga-laenu intress. Taastuva energia tehnoloogiale on Saksamaa turul pankadel spetsiaalne 5% laenuintress 10- ja 20aastaseks perioodiks. Eestis pakub taastuva energia valdkonnale laenu Krediidi ja Ekspordi Garanteerimise Sihtasutus KredEx (hetkel vaid korterelamute energiasäästule suunatud tegevustele). Intressimäära arvestamisel tuginesime Saksamaa turuhindadele, mis osutusid sarnasteks KredExi määradega (Photovoltaic, 2011; KredEx, 2011).

Kuigi  $\mu\text{c-}/\alpha\text{-Si}$ -moodulid on odavad, on antud süsteemi tasandatud elektri hind 10- ja 20aastasel tööperioodil kõige kõrgem, mis on vastavalt 0,36 €/kWh ja 0,26 €/kWh katusele paigutatud süsteemi puhul (tabel 2).  $\mu\text{c-}/\alpha\text{-Si}$ - paneelide madalam tootlikkus on tingitud nende efektiivsuse sesoonsest varieeruvusest.

Nagu tulemused näitavad, on PV-tehnoloogiaga toodetud elektri hind hetkel märkimisväärselt kallim fossiilsetest kütustest toodetud elektri hinnast. Antud töös läbiviidud arvutused näitavad, et eramajale paigutatud ca 6 kW süsteemi puhul on 20aastase kasutusperioodi puhul soodsaim PV-süsteemi tasandatud elektri hind 0,21 €/kWh. Võrdluseks, fossiilsetest kütustest toodetud keskmine elektri lõpptarbimise hind kodumajapidamisele aastase tarbimisega 2000 kWh kuni 5000 kWh on hetkel 0,08 €/kWh (Eesti Statistikaamet, 2011).

Table 1. Erinevate PV-süsteemide esialgse investeeringu hinnad (Photon International, dets, 2010; veebr, märts, apr 2011, nov 2011; Taastuenergia.ee, 2011; mp-tec.de, 2011; moodulite tehniliste andmete brošüürid Yingly, Sharp, First Solar, 2011)  
 Table 1. The prices of the initial investment of different PV-systems

|                | Süsteemi võimsus (kW) | Moodulite arv | Moodulid (€/kW) | Inverter (€/kW) | Mehaanilised komponendid (€/moodul) | Projekteerimine (€/kWp) | Installeerimine (€/moodul) | Võrku ühendatud süsteem kokku |         | Autonoomse süsteemi lisakomponendid |            |        | Autonoomne süsteem kokku |  |  |
|----------------|-----------------------|---------------|-----------------|-----------------|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------------|---------|-------------------------------------|------------|--------|--------------------------|--|--|
|                |                       |               |                 |                 |                                     |                         |                            | (€)                           | (€/kWp) | Akad                                | Kontroller | (€)    | (€/kWp)                  |  |  |
| <b>Fassaad</b> |                       |               |                 |                 |                                     |                         |                            |                               |         |                                     |            |        |                          |  |  |
| mc-Si          | 5,92                  | 32            | 1692            | 336             | 22,2                                | 20                      | 27,8                       | 13 724                        | 2318    | 4683                                | 785        | 19 192 | 3242                     |  |  |
| µc/a-Si        | 3,24                  | 24            | 1452            | 456             | 18,6                                | 20                      | 27,8                       | 7360                          | 2272    | 4683                                | 785        | 12 828 | 3959                     |  |  |
| CdTe           | 5,12                  | 64            | 1440            | 336             | 16                                  | 20                      | 27,8                       | 11 999                        | 2344    | 4683                                | 785        | 17 467 | 3411                     |  |  |
| <b>Katus</b>   |                       |               |                 |                 |                                     |                         |                            |                               |         |                                     |            |        |                          |  |  |
| Mc-Si          | 5,92                  | 32            | 1692            | 336             | 21,6                                | 20                      | 27,8                       | 13 705                        | 2315    | 4683                                | 785        | 19 173 | 3239                     |  |  |
| µc/a-Si        | 6,075                 | 45            | 1452            | 336             | 20,5                                | 20                      | 27,8                       | 13 157                        | 2166    | 4683                                | 785        | 19 354 | 3186                     |  |  |
| CdTe           | 6                     | 75            | 1440            | 336             | 19                                  | 20                      | 27,8                       | 14 286                        | 2381    | 4683                                | 785        | 19 754 | 3292                     |  |  |

Table 2. Erinevate PV süsteemid tasandatud elektrihinnad 20 aastase kasutusperioodi jooksul (Kredex.ee 2011; Photovoltaik-web.de, 2011)

Table 2. The levelized cost of electricity of different PV systems during 20 year period

|                | Võimsus (kW) | Tootlikkus 20a perioodil (kWh) | Võrku ühendatud süsteemi kulud 20a perioodil |               |           |                            | Autonoomse süsteemi kulud 20a perioodil |               |           |                                |  |  |
|----------------|--------------|--------------------------------|--|---------------|-----------|----------------------------|---|---------------|-----------|--------------------------------|--|--|
|                |              |                                | Esialgne investeering (€)                    | Intressid (€) | Kokku (€) | Tasandatud el hind (€/kWh) | Esialgne investeering (€)               | Intressid (€) | Kokku (€) | Tasandatud elektrihind (€/kWh) |  |  |
| <b>Fassaad</b> |              |                                |  |               |           |                            |   |               |           |                                |  |  |
| mc-Si          | 5,92         | 73 013                         | 13 724                                       | 8220          | 23 933    | 0,33                       | 19 192                                  | 10 982        | 37 631    | 0,52                           |  |  |
| µc/a-Si        | 3,24         | 35 255                         | 7360   | 4272          | 13 110    | 0,37                       | 12 828                                  | 7268          | 27 041    | 0,77                           |  |  |
| CdTe           | 5,12         | 71 140                         | 11 999                                       | 6356          | 20 075    | 0,28                       | 17 467                                  | 9188          | 33 843    | 0,48                           |  |  |
| <b>Katus</b>   |              |                                |  |               |           |                            |   |               |           |                                |  |  |
| Mc-Si          | 5,92         | 98 044                         | 13 705                                       | 8220          | 23 914    | 0,24                       | 19 173                                  | 10 982        | 37 612    | 0,38                           |  |  |
| µc/a-Si        | 6,075        | 89 988                         | 13 157                                       | 7584          | 23 511    | 0,26                       | 19 354                                  | 10 758        | 38 350    | 0,43                           |  |  |
| CdTe           | 6            | 110 676                        | 14 286                                       | 7448          | 23 750    | 0,21                       | 19 754                                  | 10 203        | 37 441    | 0,34                           |  |  |

## **Kokkuvõte**

Töös võrdlesime omavahel pc-Si-,  $\mu\text{c-}\alpha\text{Si-}$  ja CdTe-materjalidel baseeruvaid ehitisintegreeritud PV-süsteeme. Kõrge tootlikkuse ning madalama kWp hinna tõttu on võrreldud PV-tehnoloogiast CdTe-süsteemi tasandatud elektri hind nii 10- kui 20aastase tööperioodi jooksul madalaim (võrku ühendatud katusesüsteemil vastavalt 0,31 €/kWh ja 0,21 €/kWh). Aastane tootlikkus ühikvõimsuse kohta CdTe katusesüsteemil (1003 kWh/kWp) on kõrgem kui pc-Si- (900 kWh/kWp) või  $\mu\text{c-}\alpha\text{Si-}$ süsteemil (805 kWh/kWp). Katusesüsteemide poolt toodetud elekter on võrguühenduse korral 1,3–1,4 korda odavam kui fassaadisüsteemide korral. Võrku ühendatud PV-süsteemide hulgast on madalaim esialgse investeeringu kulu  $\mu\text{c-}\alpha\text{Si-}$ paneelidega süsteemil (2166 €/kWp katuse- ning 2272 €/kWp fassaadisüsteemil).

Autonoomse süsteemi tasandatud elektri hind on 10aastase kasutusaja jooksul 1,4–1,7 korda ning 20aastase kasutusaja jooksul 1,6–2,1 korda kallim kui võrku ühendatud süsteemi hind.

Hetkel on PV-süsteemi poolt toodetud elektri tasandatud hind – 0,21€/kWh – tunduvalt kõrgem kui tavaelektri hind – 0,08 €/kWh. PV-tööstus areneb suurema efektiivsuse ning madalama hinna suunas. On oodata, et PV-süsteemi esialgse investeeringu hind langeb aastaks 2020 1,7 korda ning tasandatud elektri hind 1,85–2,6 korda (EPIA 2011). Võttes arvesse fossiilsetel kütustel baseeruva elektri hinna pidevat tõusu ning 2013. aastal Eestis avanevat elektriturgu, saab eeldada PV-elektri muutumist järjest konkurentsivõimelisemaks.

## **Kasutatud kirjandus**

Eesti Statistikaamet (2011) <http://pub.stat.ee/> (22.09.2011)

EPIA, Solar Generation 6, 2011

Evseev, E.G., Kudish, A.I., Renewable Energy 34 (2009) 112–119

Herring, G. (2011, March). Year of the tiger. Photon International , pp. 186–218.

- Hullmann, H. (2000). Photovoltaik in Gebäuden. Stuttgart, Germany: Fraunhofer IRB Verlag.
- Huld, T., Gottschalg, R., Beyer, H. G., & Topic, M. (2010, February). Solar Energy , 84 (2), pp. 324–338.
- Knoll, B. (2010, December). Photon International , pp. 108–109.
- Knoll, B., & Siemer, J. (2011, April). Photon International , pp. 116–120.
- Knoll, B., & Siemer, J. (2011, February). Photon International , pp. 183–221
- KredEx (2011): <http://www.kredex.ee/1534> (22.05.2011)
- Menna P., Gambi R., Howes T., Gillett W., Tondi G., Belloni F., Fantechi S., Getsiou M., Bonis P., 26th EU PVSEC, Hamburg, 5–9 Sept 2011  
Module technical datasheets First Solar, Sharp, Yingli. (Mai 2011).  
mp-tec GmbH & Co. KG, <http://www.mp-tec.de/Gestelltechnik> (22.05.2011)
- Mõttus, E (2009) „Päikesepaneelide energia reitingu mudelid põhjamaises kliimas“, TTÜ magistritöö
- Photovoltaik (2011): <http://www.photovoltaik-web.de/finanzierung/photovoltaik-kredit-solar-kredit.html> (25.05.2011)
- Päsik, A. (2011) „Performance of Building Integrated Photovoltaic Modules in Estonian Climate“, TTÜ (magistritöö)
- Skoplaki, E., & Palyvos, J. A. (2009). Solar Energy , 83, pp. 614–624.
- Šuri M., Huld T.A., Dunlop E.D. Ossenbrink H.A., 2007. Solar Energy, 81, 1295–1305, <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>.
- Taastuenergia OÜ: <http://www.taastuenergia.ee/kontrollerid-akud.html>. mai 2011)

## THE PERFORMANCE AND THE ECONOMICS OF BUILDING INTEGRATED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS IN ESTONIA 2011

Annika Päsik<sup>a</sup>, Andri Jagomägi<sup>b</sup>, Egris Mõttus<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Ministry of Economic Affairs and Communications

<sup>b</sup>Tallinn University of Technology

We investigated the performance of various building integrated photovoltaic (BIPV) modules in Estonia and estimated the levelized cost of electricity (LCOE) of the PV systems. We compared in detail the performance and LCOE of ca 6kW on-grid and off-grid BIPV systems that were based on pc-Si,  $\mu\text{c}/\alpha\text{-Si}$ , and CdTe technologies. Both the rooftop and the façade mounting options were considered. The lowest cost of initial investment is in the case of  $\mu\text{c}/\alpha\text{-Si}$  system (2,272 €/kWp). Nevertheless, the lowest LCOE for 10 and 20 years period were in the case of CdTe rooftop systems being 0.31 €/kWh, and 0.21 €/kWh, respectively. The lowest price is due to the highest performance and the lowest price per kWp. The estimated performance of CdTe system in Estonia is ca 1003 kWh/kWp. For pc-Si and  $\mu\text{c}/\alpha\text{-Si}$  the figures are 900 kWh/kWp and 805 kWh/kWp, respectively. The higher performance of CdTe system results from lower temperature coefficient and higher efficiency at low light conditions. The LCOE of off-grid system is 1.4–1.7 times higher for 10 years period and 1.6 –2.1 times higher for 20 year period than LCOE of on-grid system. The annual energy yield of south oriented façade systems is ca 25% lower than of 45 degrees tilted south oriented rooftop systems. Accordingly, the LCOE in the case of on-grid systems is 1.3–1.4 times lower than in the case of façade systems.



# FIKSEERITUD ASETUSEGA PÄIKESEKOLLEKTORI JA PÄIKEST JÄRGIVA PÄIKESEKOLLEKTORI ENERGIASALVESTUSE ERINEVUS

Veli Palge, Margus Arak, Erkki Jõgi, Kaido Jaanus  
Eesti Maaülikool

## Annotatsioon

Artiklis on kirjeldatud seoseid päikese liikumisteedkonna määramiseks suvalisel laiuskraadil horisontaalpinna suhtes ja ruumis suvaliselt paigaldatud päikesepaneeli pinna suhtes. Nende põhjal on esitatud graafikud, näitamaks päikese asendi erinevusi nende pindade suhtes erinevatel aastaaegadel. Selgub, et sõltuvalt paneeli paigaldusparameetritest võivad päikesekiirguse langemisnurgad paneeli pinnale oluliselt erineda ja vastavalt sellele võib erineda ka päikesepaistelisel päeval paneeli poolt arendatav võimsus. Mõõtmisandmete tulemused kinnitavad, et päikese olemasolul on paneel suuteline arendama suurt soojuslikku võimsust nii varakevadel, suvel kui ka sügisel.

*Märksõnad: päike, päikesepaneel, paneeli paigaldusnurgad.*

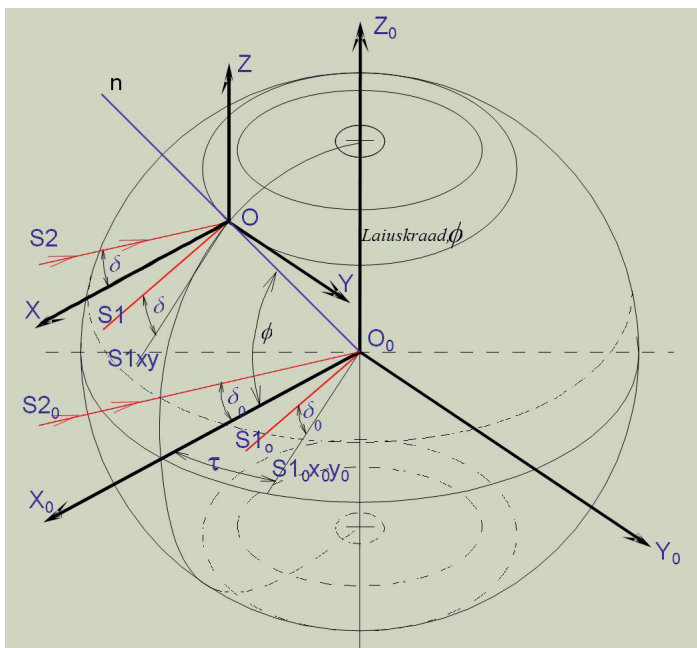
Esmalt selgitame, kuidas kirjeldada analüütiliselt päikese asendi muutumist sõltuvalt kuupäevast ja kellaajast maapinnal seisva vaateleja aspektist (see on sõltuv ka geograafilisest laiuskraadist), ja kuidas kirjeldada analüütiliselt päikese asendi muutumist paneeli pinna suhtes (kiirte langemisnurk paneelile) samadest teguritest sõltuvalt.

Tavaliselt kirjeldatakse inimestevahelises suhtlemises päikese asendit kõrgusnurga ja asimuudiga. Kuid mingile pinnale päikese kiiritustiheduse  $E_p$  ( $W/m^2$ ) määramisel on mugavam kasutada pinna normaali ja päikesekiirte vahelist nurka  $\gamma$ .

$$E_p = S_0 \cdot \tau_{at,H} \cdot \cos(\gamma), \quad (1)$$

kus  $S_0$  on solaarkonstant,  $\tau_{at,H}$  – atmosfääri läbipaistvustegur sõltuvalt päikese kõrgusnurgast,  $\gamma$  - pinna normaali ja päikesekiirte vaheline nurk. Sellest seosest selgub – mida väiksem on pinna normaali ja päikesekiirte vaheline nurk ehk teisiti öeldes, mida rohkem on kiired pinnaga risti, seda

suurem on kiiritustihedus. Samas, selle nurga suurenemine hakkab märgatavalt mõjuma alles 15 kraadist suuremate nurkade korral ( $\cos 10=0,98$ ,  $\cos 15=0,97$ ,  $\cos 20=0,94$ ,  $\cos 25=0,91$ ,  $\cos 30=0,87$ ). Pinna normaali ja päikesekiirte vahelise nurga määramiseks on vajalikud valemid, milles on argumentideks pinna asukoha geograafilised koordinaadid, info pinna paigutuse kohta ja ajahetk, mille jaoks nurka soovitakse määrata. Arvutusvalemite olemuse paremaks mõistmiseks on kasulik süveneda joonisel 1 kirjeldatud koordinaatide skeemi.



Joonis 1. Arvutusvalemites kasutatud koordinaatide süsteem.  
Figure 1. The coordinate system used in calculations.

Maakera pöörduv itta ja maa peal seisja seisukohast võttes tehakse täispööre 24 tunniga. Keskmine aasta pikkus on ligikaudu 365,25 päeva. Kuna kalendis arvestatakse aastaid täispäevades, siis iga kolme 365-päevase aasta järel on üks 366-päevane aasta ja aastaaegade vahetused leiavad aset igal aastal veidi erinevatel kuupäevadel ja kellaaegadel. Käes-

oleva analüüsi kestel arvestame aasta pikkuseks 365 päeva ja aastaegade vahetumine 2011. aastal Eestis algas/b kevad 21. märtsil (aasta 80. päev), suvi 21. juunil (aasta 172. päev), sügis 23. septembril (aasta 266. päev), talv 22. detsembril (aasta 356. päev).

Vaadeldaval juhul valime analüüsil koordinaatteljestikuks joonisel 1 näidatud teljestiku  $X_0Y_0Z_0$ , mille juures teljestiku keskpunkt asub maakera keskpunktis  $O_0$ , telg  $X_0$  on suunatud lõunasihis, telg  $Y_0$  on suunatud idasihis ja telg  $Z_0$  ühtib maakera pöörlemisteljega ja on suunatud põhjasihis. Selles teljestikus avaldub maakera pöördenurk (päikese asimuudi nurk)  $\tau$  seoses

$$\tau = (\pi/12) \cdot (t - 12), \quad (t = 0 \dots 24),$$

kus  $t$  on aeg tundides alates keskööst, väljendatud kohaliku päikeseaja järgi. Liige  $(t-12)$  tuleneb asjaolust, et pöördenurgale 0 vastab päikese asend keskpäeval (kohaliku päikeseaja järgi).

Ekvatoriaaltasandi jaoks on pöördenurga  $\tau$  muutumine ajas lineaarne. Meil Eestis ei ole horisontaalne tasapind paralleelne ekvaatoril asuva horisontaaltasandiga. Seetõttu ei saa päikese liikumist meil (või mõnes muus suvalises maakera punktis) kirjeldada lihtsate seostega. Eestis moodustab horisontaalpinna normaal  $n$  ekvaatoril asuva horisontaalpinna normaali (teljega  $X_0$ ) nurga  $\varphi$ , mille suurus on võrdne vaatlusaluse paiga laiuskraadiga (vaata nurka  $\varphi$  joonisel 1).

Päikesekiirgust saame kirjeldada vektoriga  $S$  (vaata joonis 1). Vektori  $S$  ja ekvatoriaaltasandi vaheline asend (iseloomustatakse deklinatsiooninurgaga  $\delta$ ) muutub aastas  $\pm 23,4$  nurgakraadi, meie suve alguses on  $\delta = 23,4$  kraadi (ekvatoriaaltasandist põhja pool) ja talve alguses  $\delta = -23,4$  kraadi (ekvatoriaaltasandist lõuna pool). Deklinatsiooninurga muutumist aasta kestel, kui lugeda maakera liikumine päikese ümber ringjooneliseks, saab arvutada seosega

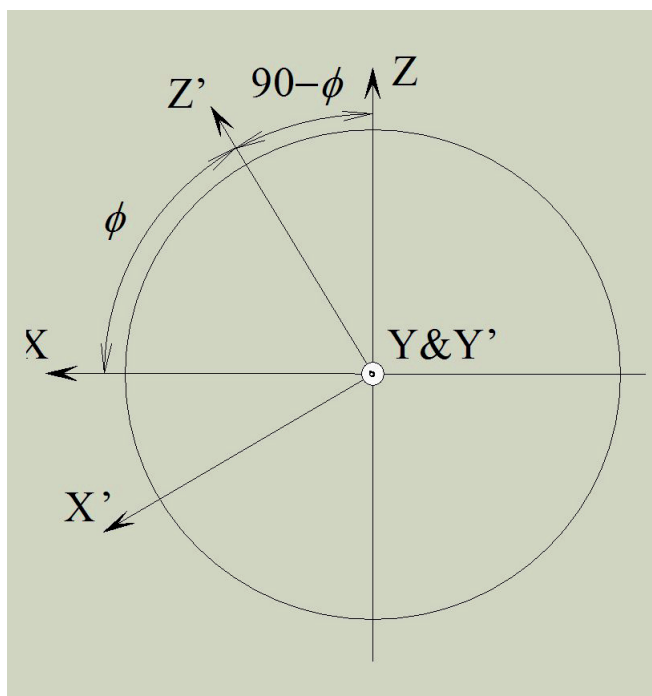
$$\delta_i = 23,4 \cdot \sin \left[ 2 \cdot \pi \cdot \left( \frac{p_i + 10}{365,25} \right) - \frac{\pi}{2} \right], \quad (3)$$

kus  $p_i$  on päeva järjekorranumber, lugedes aasta algusest.

Seoses (3) liige ( $p_i + 10$ ) arvestab asjaolu, et aasta alguses on päike madalaimast asendist juba 10 päeva kestel kõrgemale tõusnud. Reaalselt on maakera orbiit natuke ringjoonest erinev ja vahemaa Päikese ja Maa vahel aasta kestel natuke muutub, samuti muutub deklinatsiooninurk 18,6-aastase perioodiga. Täpsemaid andmeid deklinatsiooninurga kohta saab leida Tähetorni Kalendrist. Lähtudes joonisest 1, saame kirjutada seose, arutamaks meie laiuskraadil päikese kõrguse keskpäeval (kohaliku päikeseaja järgi)  $H_{pi}$  :

$$H_{pi} = 90 - \varphi + \delta_i \quad (4)$$

kus  $\varphi$  on meie huvipakkuva asukoha laiuskraad (Eesti asub laiuste piirides 57,5..59,75, põhjarannik asub ligikaudu laiusel 59,5 kraadi, Tõravere asub laiuskraadil ~58,26 kraadi).



Joonis 2. Ekvaatorist erineva asukoha koordinaatteljestik.  
Figure 2. Coordinate system for the point of interest.

Eestis elavatel inimestel ei sobi kasutada ekvaatoril elavate inimeste koordinaadistikku. Seepärast võtame kasutusele Eestis (üldisemalt analüüsitava asukoha jaoks) sobivama koordinaatide süsteemi. Sobivama koordinaatide süsteemi olemus on näha joonisel 2. Selles X'Y'Z'-koordinaatide süsteemis on telg X' suunatud piki meridiaani lõunasihis, telg Y' on suunatud idasihis ja on rööbiti teljestiku XYZ teljega Y. Telg Z' ühildub analüüsitava koha horisontaalpinna normaaliga. Teljestike vahel seoste leidmiseks võtame kasutusele ühikulise abivektori S, mille siht ühtib päikesekiirtega.

Koordinaadistikus XYZ avalduvad ühikvektori S projektsioonid telgedele XYZ seostega

$$\begin{aligned} S_x &= S \cdot \cos\delta \cdot \cos\tau \\ S_y &= S \cdot \cos\delta \cdot \sin\delta \\ S_z &= S \cdot \sin\delta \end{aligned} \quad (5)$$

Koordinaadistikus X'Y'Z' on sama ühikvektori projektsioonid avaldatavad seostega

$$\begin{aligned} S'x_{i,t} &= S \cdot \cos(\delta_i) \cdot \cos(\tau_i) \cdot \sin(\phi) + S \cdot \sin(\delta_i) \cdot (-\cos(\phi)) \\ S'y_{i,t} &= S \cdot \cos(\delta_i) \cdot \sin(\tau_i) \\ S'z_{i,t} &= S \cdot \cos(\delta_i) \cdot \cos(\tau_i) \cdot \cos(\phi) + S \cdot \sin(\delta_i) \cdot \sin(\phi) \end{aligned} \quad (6)$$

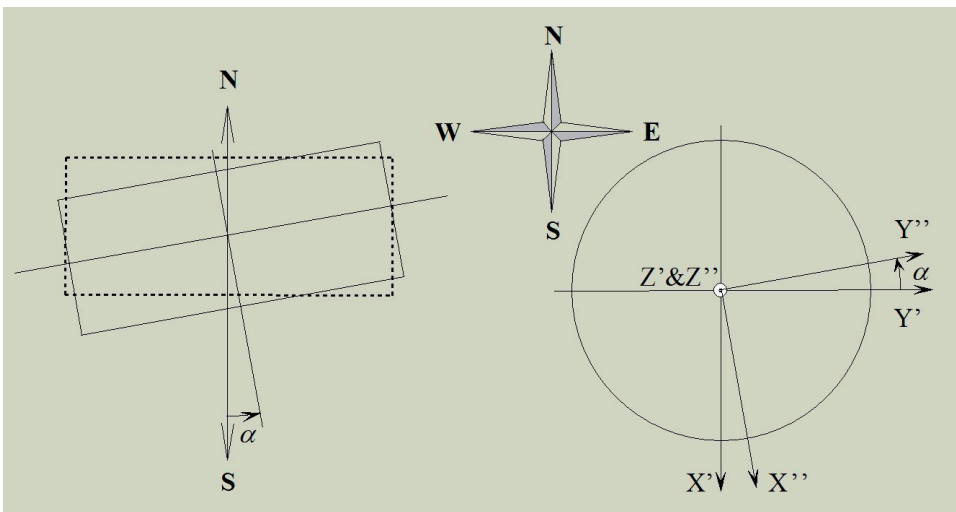
Kasutades ühikvektori projektsiooni S'xy(i,t) tasapinnale X'Y', saame leida tema nurga telje X' suhtes ehk päikese asimuudi analüüsitava asukoha jaoks.

$$\tau' = \text{atan} \left( \frac{S'y_{i,t}}{S'x_{i,t}} \right) \quad (7)$$

Kasutades vektori S projektsiooni teljele Z', saame leida päikese kõrguse

$$\varphi' = \text{atan} \left( \frac{S'z_{i,t}}{S'x_{i,t}} \right). \quad (8)$$

Seoste (7) ja (8) abil saame kirjeldada päikese liikumist inimese seisukohalt.



Joonis 3. Koordinaatide pööramine ümber telje  $Z'$  nurga  $\alpha$  võrra.  
Figure 3. Rotation of coordinate system  $X'Y'Z'$  around  $Z'$ -axis by  $\alpha$ .

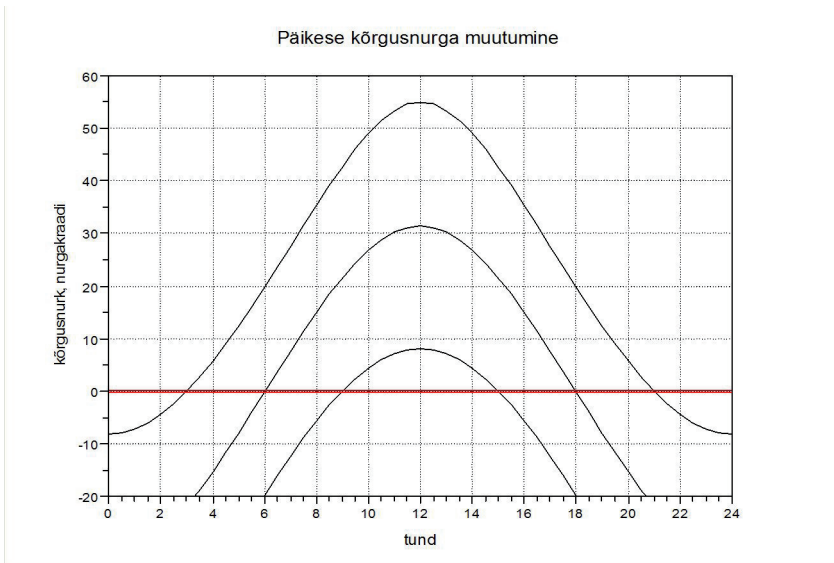
Joonisel 4 on näha päikese liikumisteedkonnad taevas pööripäevadel Tartus. Talvisel pööripäeval on (täisarvudega väljendades) päeva pikkus vaid 6 tundi ja päikese maksimaalne kõrgus 8 nurgakraadi, suvel seevastu vastavalt 18 tundi ja 54 nurgakraadi. See tekitab arvamust, et päikesepaneelid võivad kasulikuks osutada vaid suvisel ajal.

Päikesepaneeli ei paigaldata üldjuhul horisontaalselt, vaid horisondi suhtes mingi nurga alla. Seetõttu huvitab meid Päikese asendi muutus päeva kestel päikesepaneeli suhtes. Päikese liikumisvõrrandite saamiseks päikesepaneeli suhtes pöörame kõigepealt koordinaattelgi telje  $Z'$  ümber mingi nurga  $\alpha$  võrra (nagu on näidatud joonisel 3), kuni telg  $Y''$  ühtib paneeli pinnaga ja saame uue koordinaatteljestiku  $X''Y''Z''$ , kusjuures teljed  $Z'$  ja  $Z''$  ühtivad. Pärast seda pööramist on päikesekiire ühikvektori  $S$  projektsioonid uutele telgedele arvatavad seostega (9)

$$S'' x_{(i,t)} = S' x_{(i,t)} \cdot \cos(\alpha) + S' y_{(i,t)} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \quad (9)$$

$$S'' y_{(i,t)} = S' x_{(i,t)} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) + S' y_{(i,t)} \cdot \cos(\alpha)$$

$$S'' z_{(i,t)} = S' z_{(i,t)}$$

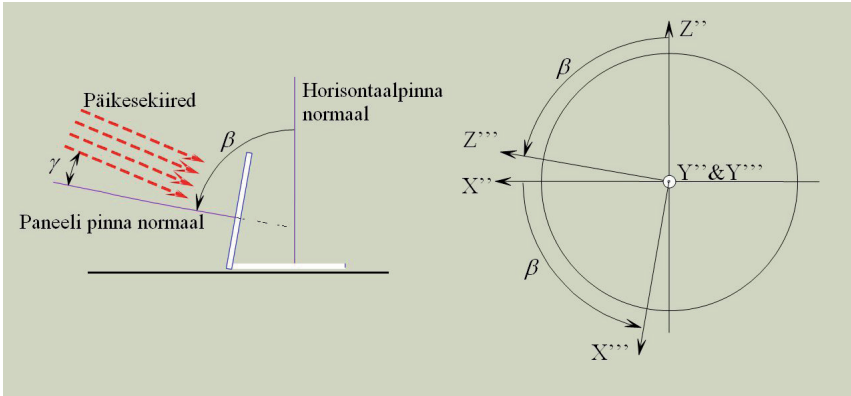


Joonis 4. Päikese kõrgusnurga muutumine Tartus talvisel pööripäeval (kõige madalam kõver), kevadisel pööripäeval (keskmine kõver) ja suvisel pööripäeval (ülemine kõver).

Figure 4. Change of Sun's angle of elevation in Tartu on winter solstice (lowest curve), vernal equinox (middle curve) and summer solstice (upper curve).

kus  $\alpha$  on koordinaattelgede pöördenurk telje  $Z'$  ümber. Selle tulemusena ühtib telg  $Z''$  ( $Z'$ ) horisontaalse pinna normaaliga, telg  $Y''$  asub paneeli tasapinnas ning telje  $X''$  ja lõunasuuna vahel on samuti nurk  $\alpha$ .

Kahjuks sellest pööramisest veel ei piisa. Järgmisena pöörame koordinaatteljestikku telje  $Y''$  ümber nurga  $\beta$  võrra nii, et  $Z''$  telg ühtib paneeli pinna normaaliga.



Joonis 5. Koordinaattelgede pööramine telje  $Y''$  ümber nurga  $\beta$  võrra teljestiku  $X''Y''Z''$  saamiseks..

Figure 5. The turning the  $X''Y''Z''$  coordinates around  $Y''$  axis by  $\beta$  degrees.

Projektsioonide arvutamiseks koordinaadistikus  $X''Y''Z''$  saab kasutada seoseid

$$\begin{aligned}
 S'''x_{(i,t)} &= S''x_{(i,t)} \cdot \cos(\beta) + S''z_{(i,t)} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \beta\right) \\
 S'''y_{(i,t)} &= S''y_{(i,t)} \\
 S'''z_{(i,t)} &= S''x_{(i,t)} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) + S''z_{(i,t)} \cdot \cos(\beta)
 \end{aligned} \tag{10}$$

kus nurk  $\beta$  on nurk horisontaalse pinna normaali ja paneeli pinna normaali vahel.

S-vektori projektsioonide  $S''x_{(i,t)}$  ja  $S''y_{(i,t)}$  kaudu saab arvutada S-vektori projektsiooni paneeli pinnale.

$$S'''x_{(i,t)} = \sqrt{[S''x_{(i,t)}]^2 + [S''y_{(i,t)}]^2} \tag{11}$$

Saadud tulemuse abil saame arvutada päikesekiirte ja paneeli pinna normaali vahelise nurga  $\gamma_{(i,t)}$  seosega

$$\gamma_{(i,t)} = \frac{180}{\pi} \cdot \arccos\left(\frac{S'''z_{(i,t)}}{S}\right) \tag{12}$$



ja päikesekiirte ja horisontaalpinna normaali vahelise nurga  $\phi_{p(i,t)}$

$$\phi_{p(i,t)} = \frac{180}{\pi} \cdot \arccos\left(\frac{S' z_{(i,t)}}{S}\right) \quad (13)$$

Paneeli  $i$ -ndal päeval neelduva energia saab arvutada seosega

$$E_i = K_{SOL} \cdot \sum_{k=0}^n S_k \cdot \sum_{t=0}^2 \cos(\gamma_{(k,i,t)}) \cdot \tau_{(k,\varphi)} \cdot \tau_{(a,i,t,H_{it})} \quad (14)$$

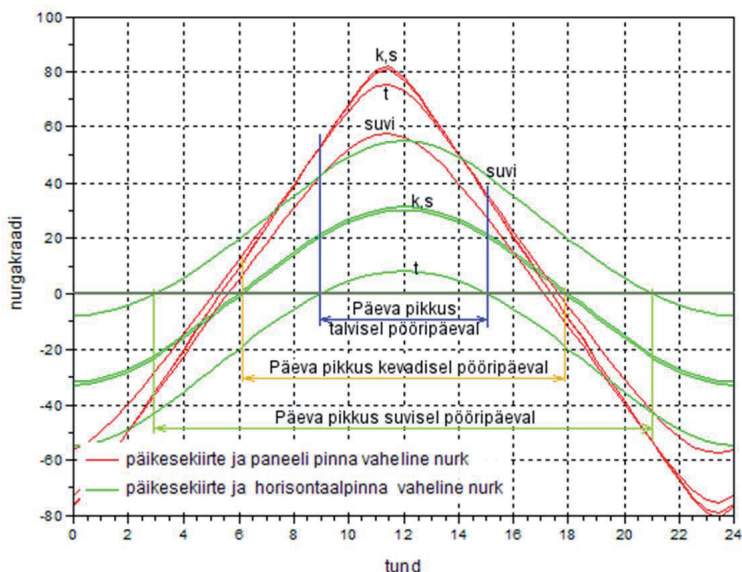
kus  $K_{SOL}$  on solaarkonstant,  $S_k$   $k$ -nda päikesepaneeli pindala,  $\gamma_{(k,i,t)}$   $k$ -nda paneeli päikesekiirte ja paneeli pinna normaali vaheline nurk  $i$ -ndal päeval ajahetkedel  $t$ ,  $\tau_{(k,\varphi)}$  paneeli katteklaasi läbilaskvus kiirte ja paneeli pinnanormaali vahelise nurga  $\gamma_{(i,t)}$  juures  $i$ -ndal päeval ajahetkedel  $t$ ,  $\tau_{(a,i,t,H_{it})}$  atmosfääri läbipaistvus päikese kõrgusnurga  $H_{it}$  juures  $i$ -ndal päeval ajahetkel  $t$ .

Kirjeldatud seoste abil on leitud päikese liikumisteedkonnad Tartus koht-kindlalt paigaldatud paneeli suhtes. Paneeli asetuse parameetrid: paigalduskoha geograafiline laiuskraad  $-\varphi = 58,5$ , kaldenurk horisontaalpinna suhtes  $-\beta = 68^\circ$ , paneeli pöördenurk  $\alpha = -10^\circ$  (pööratud 10 kraadi ida poole). Leitud liikumisteedkondade kõverad (esitatud punaste kõveratena) on esitatud joonisel 6 päikese horisontaalpinna suhtes liikumisgraafikute taustal (esitatud roheliste kõveratena). Joonisel 6 on esitatud kõverad talvise pööripäeva (tähistatud tähega „t“), kevadise-sügisese pööripäeva (tähistatud tähtedega „k, s“) ja suvise pööripäeva (tähistatud sõnaga „suvi“) jaoks. Joonisel 6 joon „0 nurgakraadi“ tähistab kas paneeli tasandit või horisontaaltasandit vastavalt vaadeldavale graafikule. Joonisel on tähistatud ka päevade pikkused talvisel (sinisega), kevad-sügisisel (tähistatud kollasega) ja suvisel pööripäeval (tähistatud rohelisega). Joonisel algab päev päikese tõusuga üle horisontaalpinna ja lõpeb päikese liikumisega horisontaalpinnast madalamale. Jooniselt selgub „inimese päeva“ erinevus „päikesepaneeli päevast“. Inimesele algab päev alati päikese tõusuga horisontaalpinnast kõrgemale ja lõpeb päikese loojumisega horisondi

taha. Päikesepaneelil ilmub päike talvapäeval kohe „kõrgele taevasse”, samuti ka kaob, olles kõrgel taevas. Teisiti öeldes liigub „paneeli maailmas“ päike taevas ainult kõrgel, justnagu oleks paneel kõrgete mägede vahel, millede tagant päike hommikul välja ilmub ja millede taha õhtul ära kaob. Kevadisel pööripäeval tõuseb paneeli jaoks päike ikka veel paneeli horisondist umbes 10 kraadi kõrgemal, kuid paneeli jaoks „loojub juba paneeli horisondi taha“. Samas pole inimese jaoks päike veel loojunud, vaid valgustab veidi aega enne loojumist paneeli tagakülge.

Suvisel pööripäeval valgustab päike pärast tõusmist umbes 2,5 tundi paneeli tagapoolt enne, kui „paneeli maailmas päike tõuseb“. Samuti loojub päike „paneeli maailmas“ umbes 4 tundi enne loojumist ehk teisiti öeldes – suvisel pööripäeval valgustab päike paneeli tagakülge vähemalt 6,5 tun-

Päikesekiirte ja paneeli pinna ning päikesekiirte ja horisontaalpinna vaheline nurk, kui  $\alpha_p = -10$ ,  $\beta = 68$



Joonis 6. Päikesekiirte ja paneeli vahelise nurga muutumise graafikud (punased jooned) päikesekiirte ja horisontaaltasapinna vaheliste nurkade muutumise graafikute (rohelised jooned) taustal.

Figure 6. Change of angle between Sun's rays and the panel (red), and change of angle between Sun's rays and horizontal plane (green) are shown.

di. Sellele vaatamata on paneel päikesekiirguse mõju all tervelt 12 tundi, mis võrreldes kevadise pööripäevaga on vaid 1 tunni võrra rohkem. Kui veel arvesse võtta, et suvisel pööripäeval „paistab“ päike paneeli pinnale „madalamalt“, siis selgub põhjus, miks kevadisel pööripäeval arendab paneel suuremat soojuslikku võimsust kui suvise pööripäeva lähedasel ajal.

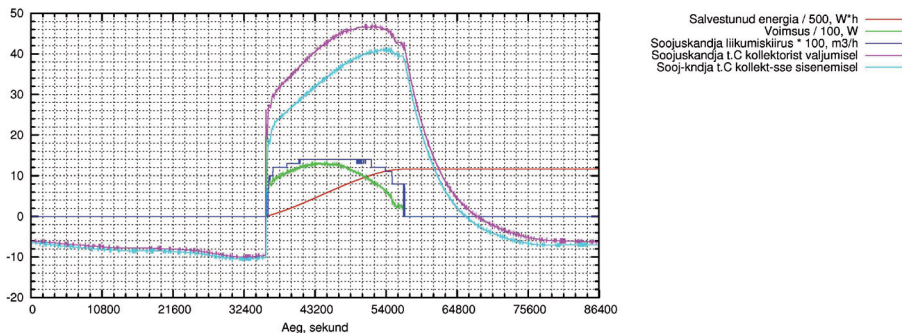
Kui panna paneel päikese liikumist jälgima, siis seoses (14) jääks ära osa liikmeid:

$$E_i = K_{SOL} \cdot \sum_{k=0}^n S_k \cdot \tau_{(a, i, t, Hit)} \quad (15)$$

ja paneeli võimsus ajas ei muutuks allpool esitatud graafikutel nähaolevate rohelisega esitatud kõverate kohaselt, vaid oleks peaaegu sirgjoon. Mõningal määral oleks võimsus väiksem hommiku- ja õhtutundidel, sest madalal asuva päikese korral on kiiritustihedus atmosfääri madalama läbipaistvuse tõttu väiksem. Graafikute alusel saab järeldada, et energiasaagikus kevad-sügisperioodil tõuseks 1,5 ... 2 korda. Eriti suureneks saagikus suvisel ajal, sest siis saab päikesekiirgust kasutada kogu päeva kestel ja saagikus peaks olema üle 2 korra suurem.

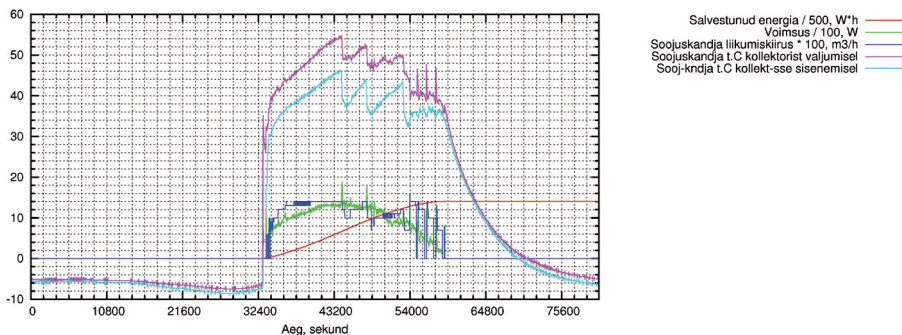
Käesoleva aasta (2011) esimene arvesse tulev energiasalvestuse päev oli 10. veebruaril, kui ligi 6-tunnise salvestusaja kestel küündis võimsus kuni 1,25 kW-ni ja akusse salvestati 5,8 kW·h energiat. Kui arvestada, et hommikul umbes 0,6 tunni kestel jäi paneel tornühiselanu varju, siis potentsiaalne tulemus oleks olnud umbes 6,6 kW·h. Allpool esitatud päikesepaneeli tööd iseloomustavad mõõteandmete alusel koostatud graafikud näitavad, et paneelist akusse salvestunud energia päikesepaistelisel päevadel oli vahemikus 7...8,8 kW·h. Ainult 9. oktoobril oli salvestunud energia vaid 6 kW·h. Väiksem energiakogus oli tingitud vahelduvast pilvitusest ja graafikute alusel saab väita, et täiesti selge taeva korral oleks salvestunud samuti ligi 8 kW·h energiat. Seega tuleks esialgu püstitatud eesmärk – saavutada aastaringelt püsiv salvestatud energia hulk - lugeda täitunuks. Veel tuleks tähelepanu pöörata võimsusele: 10. veebruaril 1,25 kW, 27. veebruaril umbes 1,4 kW, 18. märtsil samuti umbes 1,4 kW, 1. juunil 1,2 kW ja 09. oktoobril umbes 1,6 kW. Need numbrid on kooskõlas

joonisel 6 esitatud päikese ja paneeli pinna vastastikuste asendite graafikule – mida „kõrgemal“ asub päike paneeli pinna kohal, seda suurem on paneeli poolt arendatav võimsus.



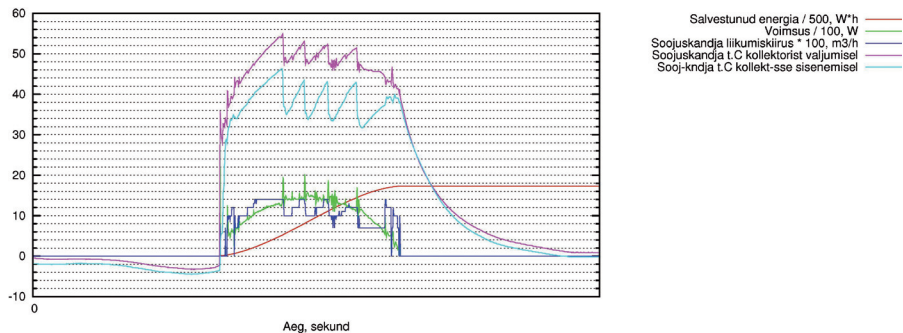
Joonis 7. Paneeli töögraafikud 10 veebruaril 2011. Kõverate olemus on selgitatud graafikul.

Figure 7. Graphs for the panel on 10 February 2011. See legend for detailed explanation.

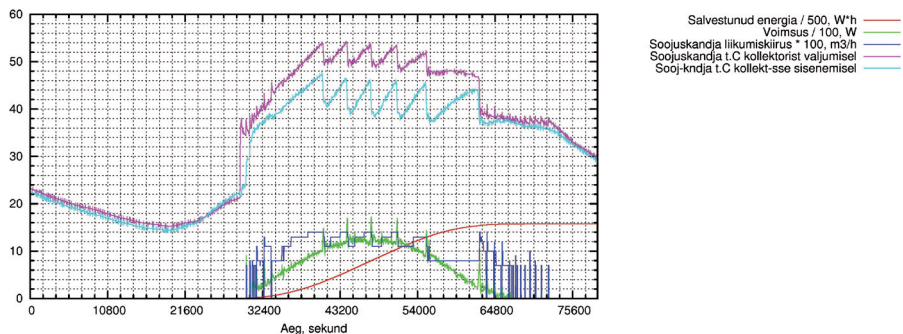


Joonis 8. Paneeli töögraafikud 27. veebruaril 2011. Kõverate olemus on selgitatud graafikul.

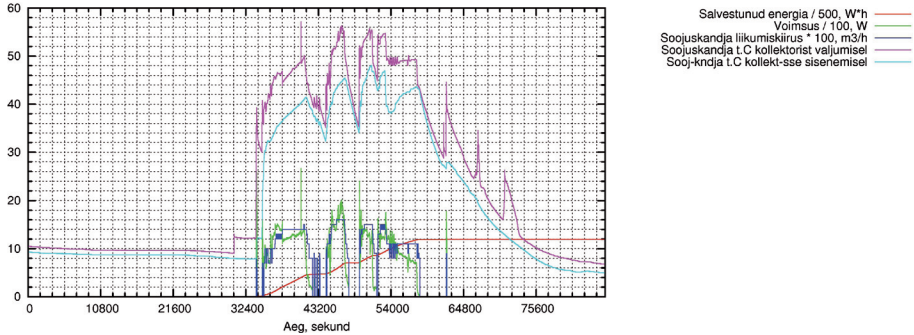
Figure 8. Graphs for the panel on 27 February 2011. See legend for detailed explanation.



Joonis 9. Paneeli töögraafikud 18. märtsil 2011. Kõverate olemus on selgitatud graafikul.  
 Figure 9. Graphs for the panel on 18 March 2011. See legend for detailed explanation.



Joonis 10. Paneeli töögraafikud 12. juunil 2011. Kõverate olemus on selgitatud graafikul.  
 Figure 10. Graphs for the panel on 12 June 2011. See legend for detailed explanation.



Joon. 11. Paneeli töögraafikud 09. oktoobril 2011. Kõverate olemus on selgitatud graafikul.

Fig. 11. Graphs for the panel on 09 October 2011. See legend for detailed explanation.

### Kokkuvõtteks

Eestis on passiivsed päikesepaneelid suutelised varustama majapidamist sooja veega selge taeva korral alates varakevadest (isegi juba veebruari lõpust) kuni sügiseni. Veel kord tuleb rõhutada, et see kehtib selge taeva korral. Pilves taevaga ei salvesta paneelid energiat isegi suvisel ajal, seda enam kevadel või sügisel. Pilvede mõju saab jälgida joonisel 10 esitatud graafikutelt. Päikese pilvede varju jäämisel langeb paneeli võimsus koheselt null-väärtusele. Kahjuks on Eestimaa kliimas pilvede olemasolu sügiseti sagedane ja paljudel juhtudel ka kevadel. Päikesepaneelid ei sisalda oma nimes ilmaaegu sõna päike. Inimese silm hindab keskkonna valgustingimusi. Valgustingimused on päikese kiirgusvõimsusega tihedalt seotud. Seepärast on paljud veendunud, et kui pilvise ilmaga on väljas piisavalt valge, siis peaks ju ka kiiritustihedus olema piisavalt suur. Kuid enamasti ei teata, et inimese silm omab logaritmitselt tundlikkuse graafikut, päikesepaneel aga lineaarset. Kui inimese hinnangul on valgustus ainult veidi halvem, siis kiiritustihedus võib olla juba mitukümmend korda väiksem. Seetõttu töötavad päikesepaneelid efektiivselt vaid päikese- paistelisel ilmadel.

## **DIFFERENCE IN ENERGY STORAGE BETWEEN FIXED SET AND SUN-FOLLOWING SOLAR COLLECTORS.**

Veli Palge, Margus Arak, Erkki Jõgi, Kaido Jaanus

Estonian University of Life Sciences  
veli.palge@emu.ee, margus.arak@emu.ee,  
erkki.jogi@emu.ee, kaido.jaanus@mail.ee

We derive equations describing the trajectory of Sun relative to a fixed horizontal and a dynamically changing plane for any latitude. Based on these equations, we get plots that demonstrate differences between the two types of trajectories. Since incident angles are different in the two situations, energy absorbed by the horizontal surface differs from energy absorbed by the solar panel. Measurements confirm that in the sunshine of early spring, summer and autumn the solar panel develops equally large heat capacities.

# EESTIS KASUTATAVAD PÄIKESEKÜTTESÜSTEEMID JA NENDE KÄITAMINE

Meeli Hüüs<sup>a</sup>, Ülo Kask<sup>b</sup>

<sup>a</sup>EBÜ, <sup>b</sup>TTÜ Soojustehnika instituut  
meelih@neti.ee, ykask@staff.ttu.ee

## Annotatsioon

Igal aastal kiirgab Päike Maale tuhandeid korda rohkem energiat kui inimkond tegelikult ära kasutada suudab. Päikeselt saadav energia on meie jaoks praktiliselt ammendamatu ja see võiks katta inimkonna energiavajaduse veel sajanditeks.

Päikese aktinomeetiline ressurss on Eestis keskmiselt 990 kWh/(m<sup>2</sup>·a) ja tehniline ressurss vahemikus 250–290 kWh/(m<sup>2</sup>·a) sõltuvalt geograafilisest asukohast<sup>1</sup>. Kasutamata keerulisi seadmeid ja lahendusi, on sellest võimalik kasutusele võtta umbes kolmandiku. Meie eesmärk võiks olla seda kõikjal eksisteerivat ja nn tasuta energiat võimalikult palju kätte saada ning võimalikult optimaalselt ka ära kasutada. Viimastel aastatel on päikesekiirgus saanud tänu tehnoloogiate tormilistele arengutele arvestatavaks alternatiiviks teistele energiaallikatele.

Seoses kütuste ja elektrihinna pideva tõusuga hakkavad ka Eesti eratarbijad üha rohkem tähelepanu pöörama uutele energia saamise võimalustele. Otsitakse alternatiivseid kütte- ja elektrienergia muundamise variante, mis tagavad odavama ning stabiilsema hinna.

Päikesekiirgust kui suhteliselt laialdaselt ja tasuta saadavat energiat on võimalik küllaltki lihtsate seadmetega muundada elektrienergiaks või soojuseks. Puuduseks võib lugeda algsete investeeringute mahukust. Eksploatatsioonijärgus tuleb vaid maksta seadmetele tehtavate suhteliselt odavate hooldusteenuste ja harvaesinevate remonditööde eest. Vastavalt arendustegevusega ja tootmisvõimsuste kasvamisega on päikesepaneelide (nii fotoelektriliste kui termaal- e päikesekollektorite) hinnad langenud ning kasutegurid tunduvalt suurenenud. Energiahindade pideva tõusuga

1 Teolan Tomson. Helioenergeetika. Humare, Tallinn, 2000, 136 lk



muutuvad iga päevaga investeeringud päikeseenergia muundamisseadmetesse veelgi tasuvamaks.

Eesti energiatehnoloogia programmi (ETP) üheks arendussuunaks on uute, peamiselt taastuvatel energiaallikatel (sh päikeseenergeetika lahendused) põhinevate energiatehnoloogiate ning nendega seotud energiasüsteemi talitluse optimeerimine.

Käesolev artikkel on osaliselt koostatud Tallinna Tehnikaülikooli Soojustehnika instituudis 2010. a lõpus valminud uuringu „Erinevate päikesekütteseadmete konstruktsiooni ja efektiivsuse võrdlev analüüs“ alusel. Uuringu üheks eesmärgiks oli Eestis tarnitavate päikesekollektorite tehniliste ja eksploatatsiooni-parameetrite kogumine ja süstematiseerimine (andmebaasi koostamine). Töö tarvis küsitleti ligi 75 inimest, kes on tegele-  
nud Eestis päikeseadmete tarnimise, paigaldamise ja nendest saadavate hüvede kasutamisega. Uuringu käigus tõdeti, et käesoleval ajal oleks Eestis kõige otstarbekam kasutada päikesekiirguse muundamisseadmeid tarbevee soojendamiseks, aga ka kütte- ja jahutussüsteemides toetava võimalusena.

*Märksõnad: päikesekiirgus, päikesekollektor, päikeseküttesüsteem*

### **Päikeseenergia kasutamisest ELis**

2006. aastaks oli Euroopas installeeritud nn solaar-termaal ehk päikesekütte süsteeme koguvõimsusega 13 GWth, mis tootsid ligikaudu 0,7 Mtoe kasutatavat energiat. Ainult väike osa installeeritud võimsustest (ca 30 MWth) tootis madalatemperatuurilist soojust tööstussektoris ca 1,5 ktoe aastas.

Päikesekiirguse abil käitatavate kütte- ja jahutussüsteemide potentsiaal on Euroopas suur, seda peamiselt ehitussektoris. Järgnevatel aastatel loodetakse Euroopa Liidus saavutada kiireid edusamme päikesepaneelide ja kollektorite kasuteguri tõstmisel, mis võimaldaks alustada päikeseküttesüsteemide tootmist ja nende kasutamise suurendamist ka Eestis.

Vastavalt EL-27 eesmärkidele peaksime päikesekütte süsteemide installeeritud võimsusteks saavutama 52 GW 2020. aastaks ja 135 GW 2030. aastaks. Maksimaalseks potentsiaaliks neile süsteemidele on aga hinnatud Euroopa Liidu (EL) liikmesriikide seas kuni 320 GW aastaks 2020 ja 700 GW aastaks 2030, mis loodetavasti moodustaks ELi soojuste vajadusest vastavalt ca 3% (2020) ja 7% (2030).

### **Päikesekollektorite tarnijate (edasimüüjate) kaardistamine Eestis**

Vajaliku info hankimiseks kasutati Eestis tegutsevate ettevõtete, kaupluskettide ja ehitusfirmade infobuklette ning Internetis avaldatud infot. Valikuliselt külastati ka päikesekollektoreid tarnivaid ettevõtteid ja objekte, kuhu neid on paigaldatud. Olulise osa moodustasid kirjavahetuste kaudu hangitud andmed.

Otskontaktide käigus selgus, et paljud ettevõtted on päikeseenergia seadmete müügi ja paigaldusega alles viimasel ajal tegelema hakanud ning otsivad kindlaid koostööpartnereid nii Euroopas – peamiselt Saksamaal, Itaalias, Hispaanias, Rootsis – kui ka Hiinas ja USA-s tegutsevate nn päikesekütteseadmete tootjate ning tarnijate hulgast. Vastava teemavaldkonnaga tegelejad on koondunud peamiselt Tallinna ja Tartusse ning mõnede filiaalid asuvad ka väiksemates linnades. TTÜ STIs koostati pidevalt täiendatav andmebaas firmadest ja nende pakutatavast, mis sisaldab 2010. ja 2011. aasta esimesel poolel kogutud andmeid.

### **Päikesekollektorite ekspluatatsioonist**

Kuna Eestis veel päikesekollektorite pikemaajalised käidukogemused puuduvad, siis on andmebaasis esitatud ettevõtted paljudel juhtudel viidanud välismaistelt koostööpartneritelt saadud kogemustele ja Eestis töötavate süsteemide positiivsetele näitajatele.

Käesolevaks ajaks pole veel ükski ettevõtte avaldanud andmeid ekspluatatsiooni jooksul tekkinud hooldus- ja remonditööde põhjuste, sageduste ja mahtude kohta, sest ilmselt ei peeta niisugust arvestust vajalikuks. Põhjalikuks analüüsiks oleks aga vaja objektiivseid andmeid, seda just meie

kliimatingimustes töötavate päikesekütteseadmete kasutamise kogemuste saamiseks ning süsteemide töökindluse ja materjalide vastupidavuse hindamiseks.

On ilmnunud, et majanduslikult raskes olukorras, kus tellimusi niisuguste süsteemide rakendamisteks on Eestis veel vähe ja puudub usk nende töökindlusse, püüavad kaasaegsete päikesekütte lahenduste pakkumisega tegelevad ettevõtted rakendada juba mingitele konkreetsetele standard-suurustele ja keskmistele tarbitavatele võimsustele arvutatud lahendusi, mida hangitakse välismaistelt koostööpartneritelt.

Teadaolevalt mitmete pilootprojektide käigus (Vändra haigla, EPMÜ Tehnikainstituut, Rõuge koolimaja, Keila SOS lasteküla, Tallinnas Tedre tn 10 ja Mustamäe tee 181, Kauge tn 4 jne) ehitatud päikeseküttesüsteemide tööd ei ole veel järjepidevalt analüüsitud, sest pole olnud vajadust või tehnilisi võimalusi vajalike parameetrite mõõtmiseks.

Teada on, et enamik Eestis kasutatavaid päikesekollektoreid on sertifitseeritud vastavalt EL standardile EN12975-2, mis sisaldab muuhulgas efektiivsuse ja väljundvõimsuse mõõtmist ning mehaanilise vastupidavuse testi, k.a rahekindlusele ning pikaajalisele ilmastikukindlusele. Tegelikult peaksid aga kõik mis tahes objektidele päikeseseadmete paigaldamisega tegelevad ettevõtted lähtuma standardist CEN/TS 12977-1.

### **Päikesekollektorite tüübid ja paigutus**

Päikesekollektorite suuremate tootjate kohta leiab andmeid välismaal avaldatavatest ajakirjadest ja Internetilehekülgedelt. Seisuga 20.09.2011 kontrolliti ka Patendiameti andmebaasist Eestis toodetavate päikesekollektorite teemaliste leiutiste ja kasulike mudelite olemasolu – sellekohased andmed nimetatud andmebaasis puuduvad.

Päikeseküttesüsteemides kasutatakse põhiliselt kahte tüüpi kollektoreid: tasapinnalisi plaatkollektoreid ja vaakumtorukollektoreid.

Mõnedele Eestis teostatud uurimustele tuginedes (Veli Palge, EMÜ; Mikk Maivel, Mustamäe tee 181) tuleks Eesti oludes eelistada vaakumtorudega päikesekollektoreid, sest need suudavad päikesekiirgust suuremas koguses soojuseks muundada ning on aastas keskmiselt 30–40% efektiivsemad sama pindalaga tasapinnalistest kollektoritest. Nende eelistamise kasuks räägib omadus, et vaakumtorudega küttesüsteem toimib samuti miinuskraadide juures ehk annab sooja ka talvel. Suureks plussiks vaakumtorudega päikesekollektorite kasutamisel on võimalus päikeseenergiat kasutada ka suhteliselt pilviste ilmadega. Vaakumtorukollektorite puuduseks on vajadus asetada need vähemalt 45° nurga alla, samas kui plaatkollektorid töötavad ka 90° nurga all – seega saab viimaseid paigaldada majade seintele.

Päikesekollektor paigaldatakse maja lõunapoolsele küljele ja tavaliselt katusele, kuid kollektoreid võib kinnitada ka seinale või maapinnale. Kollektori kaldenurk peab olema selline, et ta oleks enamiku päevaajast risti päikesega. Seega tuleb kollektori kaldenurga seadistamisel arvestada geograafilist laiuskraadi. Kui on soov kasutada rohkem kevadist ja sügist päikesekiirgust, võib kaldenurka veelgi suurendada. Kuid arvestada tuleb veel sellega, et kaldenurga suurenedes suureneb ka tuulekoormus kollektorile, eriti plaatkollektorile. Ülejäänud päikeseküttesüsteemi komponendid paigutatakse tavaliselt olemasolevasse kütte- või abiruumi.

### **Päikesekollektorites kasutatavad soojuskandjad**

Päikesekollektorite tarnijate väitel ei esine päikesekiirguse muundamiseks vajalike seadmete ja materjalidega nende paigaldamisel, töötamisel ega hilisemal utiliseerimisel mingeid probleeme.

Päikesekollektorites kasutatavate soojuskandjate (inimese tervisele ja keskkonnale ohtlikud ained) kasutamise ja käitlemisega pole Eestis väidetavalt siiani probleeme olnud või siis ei ole neist teada antud. Ajakirja SUN & WIND ENERGY 2011 septembrikuu numbris on aga pikalt juttu kasutatavate toksiliste soojuskandjate asendamisest veega ning vastavate tehniliste lahenduste (nn *drain-bac*–süsteemi) rakendamisega kaasneva-

test parendustest. Näiteks Eestis kõige enam soojuskandjana kasutatav etüleenglükool on mürgine. Organismi sattudes põhjustab see kesknärvisüsteemi ja neerude kahjustusi; surmav doos on 1,4 g/kg kohta. Töötsõnnis ei tohi ületada kontsentratsioon õhus 5 mg/m<sup>3</sup>.

Buderus OÜ (www.buderus.ee) pakub Eestis ainsa ettevõttena oma klientidele jäämete taaskasutuse võimalust, st pärast kasutusea lõppemist võib päikesekollektorid tootjale tagasi anda, kes suunab kasutatud materjalid keskkonnasõbralikku ümbertöötlusesse.

**Päikesekollektorite kasutamise perspektiivsemad valdkonnad Eestis**  
Päikeseküttesüsteemid annavad suurema kasuteguri, kui neid kasutada lisaks sooja tarbevee tootmisele ka ruumide kütteks või materjalide kuivatamiseks. Eriti hea ja lihtne on kasutada päikesekütet koos vesi-põrandaküttega. Selline süsteem vajab kahekontuurilist boilerit. Ühe kontuuriga köetakse tarbevett ja teine kontuur on põrandakütte jaoks. Järgnevalt esitatakse loetelu objektidest, mille energiavarustuses võiks kasutada päikesekütteseadmeid:

#### Väikeettevõtted, põllu- ja metsamajandusettevõtted

Kuna energiahinnad on pidevalt tõusuteel, on kasvamas päikesekütte seadmete kasutamine peamiselt sooja vee tootmiseks ja mitmetes töötusprotsessides vajamineva soojuskandja eelsoojendamiseks ning materjalide kuivatamiseks (temperatuuri vahemik 40–90°C). Seega sobiks Eestiski toiduainete-, tekstiili-, keemiatööstuses, pesumajades ning autode pesemisega tegelevates ettevõtetes hakata enam kasutama päikesekiirgust. Kasvumajade, väiksemate tööstushoonete, farmide (2000–3000 m<sup>2</sup>) kütmist ning vilja, metsamarjade ja seente kuivatamist on samuti võimalik korraldada aprillist kuni oktoobrini madalatemperatuurilise sooja vee või õhuga.

#### Korterelamud, tööstusettevõtted, kaubandus- ja veekeskused

Rootsi ettevõtte S-Solar andmetel on 100 m<sup>2</sup> pinnaga Orbiti lamekollektoritega aastas muundatav päikeseenergia hulk 45 000 kWh/a ning 20–30 aastaks planeeritud soojuse hind oleks siis ligikaudu 60 €/MWh ehk

938,80 kr/MWh<sup>2</sup>.

Eramud, sotsiaalhoolekandeesutused, kumblusvannid, lastebasseinid  
S-Solar andmetel toodetakse Rootsi eramutes päikesega keskmiselt 5500kWh/a ja samaaegselt on kogu energiatarbimist vähendatud ca 21%. Praeguste energiahindade juures on planeeritav tasuvusaeg 4,5 aastat ning hinnaks 30–70 ööri/kWh ehk 33–77 €/MWh (516–1205 kr/MWh) järgmise 20 aasta jooksul. Päikesekollektorid pakuvad hoonetele ka lisakütte võimalust.

On solaarküttesüsteeme, mida saab kasutada vaid tarbevee soojendamiseks, aga ka selliseid, mis kütavad hooned. Süsteemid, mis täidavad mõlemat eelnimetatud funktsiooni, võimaldavad Eesti kliimaatilistes tingimustes kogu aastast soojuse vajadusest katta 20–60%. Ainult tarbevee soojendamiseks ettenähtud solaarküttesüsteemid võimaldavad muu energia kasutuse vähenemist 5–15% kogu aastast energiavajadusest. Kombineeritud solaarküttesüsteemi hind on 2–2,5 korda kõrgem üksnes tarbevee soojendamise süsteemi hinnast, samas väheneks muu energia-kasutus kuni kaheksa korda. Solaarküttesüsteemi paigaldamine on ühekordne investeering (kuigi suur), päikesekiirus saabub tasuta, käidu- ja hoolduskulud on muude soojusmuundamisseadmetega võrreldes märksa väiksemad.

### **Päikesekollektorite ja saadava soojuse maksumus**

Päikesekollektorite hinnad on väga erinevad. Päikesekütte süsteemi koguhind jaguneb enam-vähem kolmeks: 1/3 kollektor, 1/3 akumulatsioonipaak ning 1/3 paigaldus- ja ühenduskulud. Oluline faktor alginvesteeringu tegemisel on kasutusaeg – mida pikem see on, seda kiirem on tasuvus. Tasuvusajaks arvestatakse praeguste kütusehindade juures kuni 15 aastat. Arvestades aga fossiilsete kütuste järjepidevat ning paratamatut kallinemist, lüheneb päikesekollektorite tasuvusaeg nende efektiivsuse tõusu ja kasutusse võetavuse suurenemisel. Enamik kollektoreid säilitab 100% tootlikkuse 25–30 aastaks. Erinevatest elementidest kohapeal katu-

<sup>2</sup> S-Solar, <http://en.ssolar.com/LinkClick.aspx?fileticket=2t0rVU9KagY%3d&tabid=633&mid=1734>

sele monteeritavate seadmete parameetrid pidavat püsima muutumatuna 50–60 aastat. Kollektorid ei lähe rivist välja päevapealt, kuid nende tootlikkus võib hakata langema esialgu märkamatuult.

Päikeseküttesüsteemist saadava soojuse hind on konkurentsivõimeline teistest energiaallikatest saadava soojuse hinnaga. Päikeseküttesüsteemis soojendatud vee hind on soodsam elektriga soojendatud veest samadel temperatuuridel (45–55 °C). Kaasaegne solaarküttesüsteem on täisautomaatselt töötav süsteem, mis teeb tema kasutamise mugavaks. Eksploataatsioonikuludeks on peamiselt kulutused pumba ja automaatika töös-hoidmiseks.

Näiteks viiekorruselise paneelelamu keskmise aastase arvutusliku sooja tarvevee soojuse vajaduse (155 MWh) juures on vaja kollektorit pinnaga ca 130 m<sup>2</sup> ja soojussalvestuspaaki mahuga 5,5 m<sup>3</sup>. Sellise hulga veega on võimalik ööpäevas keskmiselt varustada 135 inimest, kolme ööpäeva varuks oleks vaja vastavalt paaki mahuga 16,5 m<sup>3</sup>.

### **Riiklikest toetustest päikeseenergia projektidele**

Seni ei ole SA KredEx tegelenud nn päikeseprojektide finantseerimisega Eestis. Küll on KredExi korterelamute rekonstrueerimistoetuste ja renoveerimislaenuga lubatud taastuvenergiaseadmete paigaldamine ning vastavad kulud on abi- ja finantseerimiskõlblikud. Toetuse saamise tingimused on esitatud Internetiaadressil <http://www.kredex.ee/korterelamute-rekonstrueerimistoetus> ning renoveerimislaenu tingimused <http://www.kredex.ee/korterelamu-laen>.

SA Keskkonnainvesteeringute Keskus (KIK) on viimastel aastatel toetanud kahte päikeseenergia projekti. Üks nendest on Energy Smart OÜ projekt „**Energiasäästupoliitika pilootprojekt: esimene päikeseenergiarajanev energiapark Eestis Võrumaal Keema külas**”, mille teostamist toetas KIK 183 962 euroga, omafinantseeringuna lisandub 221 223 eurot. Projekti eesmärgiks on rajada Eestis esimene päikeseenergia park, millest saadud kogemusi ja tulemusi hakatakse kasutama Põhjamaades

ja Euroopas, eelkõige koostöös teadusasutustega. Projekti käigus peaks valmima 100 kW võimsusega, taraga ümbritsetud park, mille sees asuvad metallmastidele paigaldatud fotoelektrilised päikesepaneelid (555 tk). Samuti märgitakse, et projektiga on TTÜ teadlastel võimalus katsetada uusi tehnoloogilisi rakendusi. Park rajatakse Sõmerpalu valda, projekti hetkel teostatakse.

Teine on SA Raadi projekt „**Kõrveküla lasteaia energiavajaduse osaline katmine alternatiivsete energiaallikatega**”, mida KIK toetas 117 458,10 euroga ning millele lisandub omafinantseering. Projekti eesmärgiks on katta lasteaia energiavajadus osaliselt päikese- ja tuuleenergiaga (kokku 221 MWh aastas). Projekti tulemusena paigaldatakse 40 päikesepaneeli ja 5 kW tuulegeneraator. Projekt on hetkel teostamisel.

Lisaks on üks vallavalitus esitanud keskkonnaprogrammi viimasesse vooru (2011 II voor) taotluse päikeseenergia rakendamiseks lastaias ja gümnaasiumis. Kuna taotlust hetkel hinnatakse, siis konkreetsemad andmed puuduvad.

Päikeseenergia projekte toetatakse siseriiklikust keskkonnaprogrammist. Keskkonnaprogrammi eesmärgid ja toetatavad tegevused on toodud keskkonnaministri määruses nr 13 „Keskkonnakaitse valdkonna projekti rahastamise taotluse kohta esitatavad nõuded, taotluste hindamise tingimused, kord ja kriteeriumid, otsuse tegemise, lepingu täitmise üle kontrolli teostamise ning aruandluse kord“.

Atmosfääriõhu kaitse programmist toetatakse energeetika negatiivse keskkonnamõju vähendamiseks seotud tegevusi, milleks on erinevate põletusseadmete välisõhu saasteainete puhastussüsteemide ehitamine; elektri ja soojuste koostootmise arendamine ning säästliku energiakasutuse toetamine erinevate tehniliste lahenduste kaudu. Viimase punkti alla kuuluvad nn päikese-, maasoojus- ning taastuvenergia jne projektid.

KIKi finantseerimise korra p 4.8 kohaselt peab päikese- ja tuuleenergia ning soojuspumpadel põhinevate elektri- või küttesüsteemide ehitami-



sel omafinantseering olema vähemalt 50% projekti abikõlblike kulude maksumusest ja toetuse taotlejateks võivad olla ainult avalik-õiguslikud juriidilised isikud ning neile kuuluvad asutused. Sellekohast infot tasub jälgida KIKi kodulehelt [www.kik.ee](http://www.kik.ee).

### **Kokkuvõte ja järeldused**

Eestis tegeleb päikesekollektorite kasutusele võtmise propageerimisega palju ettevõtteid, kellel aga tegelikud kogemused ja analüüsimiseks vajalikud andmed päikeseenergia kasutamise tõhususe, käidukulude ning seadmete töö- ja ilmastikukindluse kohta on vähesed (riiklikud objektid) või puuduvad üldse (erasektoris). Kusagil ei leidu andmeid, et oleks püütud objektiivselt hinnata sooja tarbevee soojendamiseks kulutatud soojuste maksumust.

Väheste saadud andmete analüüsi tulemusel võib väita, et olulisem on paigaldada kollektorid meie laiuskraadidele vastava nurga alla ja kohtadesse (ka suunatuna ilmakaarde), kus päikesekiirgus neile ööpäeva jooksul maksimaalselt peale langeb. Eestis saadud andmetele tuginedes on optimaalne paigaldada kollektorid suunaga lõunasse 30–60° nurga all.

Päikesekiirgus muundub kollektoris ringleva soojuskandja (peamiselt vedelikud: TYFOCOR®, glükool, etüleenglükool, propüleenglükool) energiaks, mis omakorda kantakse üle soojussalvestisse (akumulatsioonipaak) või -vahetisse. Suurema võimsuse saavutamiseks lülitatakse ja-damisi mitu kollektorit.

Tulenevalt päikesekiirgusel põhinevate soojuste tootmise süsteemide suhteliselt väikesest kasutustundide arvust pole vaatamata võimsuse suurele kasvule toodetava energia hulk suur ja hoone soojusvarustuses ainukasutamiseks sobilik. Päikesekiirguse abil toodetava sooja vee vajaduse saaks aprillist kuni oktoobrini katta hinnanguliselt 50–70%,<sup>3</sup> mis tähendab, et päikesekütte seadmed tuleks Eesti tingimustes integreerida teiste energiat tootvate ja salvestavate süsteemidega.

---

<sup>3</sup> <http://setis.ec.europa.eu/technologies/Solar-heating-and-cooling>

Efipa AS on võrrelnud Mustamäe tee 181 vaakumtorukollektoreid ja Räägu 10a lamekollektoreid ning väidab, et päikeselisematel kuudel töötab lamekollektor paremini. Samas neeldub vaakumtorus paremini hajuskiirgus.

Eestis pole puhtalt päikesekiirgusega toodetud soojuse hinna kujunemist põhjalikult analüüsitud ja erinevate hoonegruppide (suuremad ja väiksemad majad ning tervisekeskused, ujulad jne) põhjal saadava soojuse hinna välja arvatud.

### **Eestis paigaldatud päikesekollektoreid**

1. Päikesekatus – 18m<sup>2</sup> päikesepaneele 45m<sup>3</sup> basseini- ja 200 l soojavee kütteks eramule Põlvamaal Vanakülas. Paigaldajad SunHeat OÜ ja Introne OÜ.
2. Pöördraamil muudetava kaldenurgaga 2,55 m<sup>2</sup> moodulkollektor EPMÜ Tehnikainstituudi hoonele Tartus Kreutzwaldi 56. Paigaldaja SunHeat OÜ.
3. Kaks moodulkollektorit kogupinnaga 5,1 m<sup>2</sup> eramu katusele Haaslaava vallas Kurepalus. Paigaldaja SunHeat OÜ.
4. 2,55 m<sup>2</sup> suurune moodulkollektor elamule Elvas Liiva tn 4. Paigaldaja SunHeat OÜ.
5. 1920 vaakumtoru korruselamule Tallinnas Mustamäe tee 181. Paigaldaja Anrebell OÜ.
6. 71,96 m kollektorid Valga Lasteaiale Kaseke aadressil Kase tn 6. Paigaldaja PassiveHouse OÜ.
7. Üheksa paneeli 108 vaakumtoruga korruselamule Järvakandis aadressil Staadioni tn 6. Paigaldaja Elysium OÜ.
8. Paneelkollektorid väikemajadele Keila SOS-lastekülas Ülase tn 11. Paigaldaja Copower OÜ.
9. 16 m<sup>2</sup> paneelkollektorid (6 tk) korruselamule Tallinnas Räägu tn 10a. Paigaldaja Efipa AS.
10. 43,2 m<sup>2</sup> paneelkollektorid Nõmme Sotsiaalmajale Kauge tn 4. Paigaldaja Domeni OÜ.
11. 32 m<sup>2</sup> paneelkollektorid (12 tk) Jõhvi lasteaiale Pillerkaar aadressil

- Puru tee 15. Paigaldaja Efipa AS.
12. 5 m<sup>2</sup> paneelkollektorid Tartu botaanikaiaiale Lai tn 40. Paigaldaja PG Ehitus OÜ.
  13. 206 m<sup>2</sup> paneelkollektorid Mäetaguse hooldekodule aadressil Kooli tn 25. Paigaldaja SunHeat OÜ.
  14. 5 m<sup>2</sup> paneelkollektorid Rõuge lasteaed-koolile Pargi 4/Haanja mnt 14. Paigaldaja Efipa AS.
  15. Kurtna lasteaed-alkool Sakus.
  16. Elva haigla, Supelranna tn 21.
  17. Peipsiveere hooldusravikeskus Alatskivil aadressil Päiksi tee 2.
  18. Õhkkütte- ja ventilatsioonipaneel ning veesoojenduspaneelid ja -kollektorid elamule Sakus. Paigaldaja Sol Navitas OÜ.
  19. 108 (8,64 m<sup>2</sup>) vaakumtorukollektorid (6 paneeli) Võrumaa Kutsehariduskeskuse Tehnomajale Väimelas. Paigaldaja Energy Smart OÜ.
  20. 160 m<sup>2</sup> vaakumtorukollektorid Kõrveküla lasteaiale Päikeseratas Tartu vallas. Paigaldaja Leidi Consult OÜ.

### **Täiendavat infot**

Video, kus päikeseenergiaga tegelevaid inimesi õhutab Ameerikas koostööle Seth Godin <http://www.renewableenergyworld.com/rea/blog/post/2011/09/video-balloon-animal-makers-pirates-and-leading-your-own-solar-tribe?cmpid=SolarNL-Thursday-September29-2011>

Igakuiselt ilmuv taastuvate energiaallikate ajakiri SUN&WIND ENERGY ([www.sunwindenergy.com](http://www.sunwindenergy.com)), kus avaldatakse andmeid enimkasutatavate päikesekollektorite ehitamisel kasutatud materjalide ja kollektorite tehniliste parameetrite ning päikeseprojektide kohta

Phil Manke Living the „Solar Sweetlife” <http://web.mac.com/manke2/iWeb/At%20T%20Bridge%20Home/Home%20.html>

European Solar Thermal Industry Federation : <http://www.estif.org/>

## **SOLAR THERMAL HEATING SYSTEMS AND ITS OPERATION IN ESTONIA.**

Meeli Hüüs<sup>a</sup>, Ülo Kask<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Estonian Biomass Association, <sup>b</sup>Tallinn University of Technology

Current article was prepared partly on the base of R&D study „The compared analyze of different solar thermal heating systems constructions and effectiveness“ of Thermal Engineering Department of Tallinn University of Technology in 2010. One of the aims of the study was to collect and systemize the technical data and operational parameters of solar thermal collector’s and to build up corresponding database. In this case were interviewed nearly 75 people, who were engaged to the supply of solar equipment, installation and of benefits from use of these. In the study was found, that at present time in Estonia would be best to use solar radiation conversion devices for heating hot tap water, but also to integrate as additional alternative with heating, cooling and drying systems. In the period from April to October 50-75% of the requirement of hot tap water by solar thermal systems could be cover.

## TAASTUVENERGIATE KASUTUS SAKSAMAAL MECKLENBURG-VORPOMMERNI LIIDUMAAL

Rünno Lumiste  
Ärikorralduse Instituut, Majandusteaduskond, Tallinna Tehnikaülikool  
runno.lumiste@tseba.ttu.ee

Antud artikli aluseks olevad intervjuud ja kohapealsed vaatlused sooritati ajavahemikus juunist augustini 2011. aastal teadustöö käigus Wismari Rakendusteaduste, Äri ja Disaini Ülikoolis. Teadustööd rahastas Saksamaa Akadeemilise Vahetuse Teenistus (DAAD).

### **Taastuvenergiate kasutus Mecklenburg-Vorpommerni (MV) liidumaal ja Saksamaa taastuvenergeetika klaster.**

Taastuvenergeetika kasutamine Mecklenburg-Vorpommerni liidumaal ning kogu Saksamaal on väga intensiivne. Ka naabruses asuv Taani kuningriik on taastuvenergeetika kasutamises üks intensiivsemaid riike. Saksamaa valitsus võttis juba 1991. aastal vastu seadusandluse, mis kohustas võrguettevõtteid ostma taastuvenergeetika teel toodetud elektri (Stromeinspeisungsgesetz 1991).

Mecklenburg-Vorpommerni liidumaa on ajalooliselt (kuigi antud territoriaalne kooslus eksisteerib pärast teist maailmasõda) põllumajanduslik piirkond, kus on tugeval järjel tehniliste kultuuride ning vilja- ja loomakasvatus. Tehniliste kultuuride kasvatamise tasemest annavad tunnistust juba üle 180 aasta tagasi kohaliku mõisniku ja agraarökonoomisti Johan von Thüneni poolt kirjutatud teosed (von Thünen 1826).

Kirde- ja Ida-Saksamaad on alati iseloomustanud suured põllumajandusettevõtted. Kas siis junkrumõisate, Saksa Demokraatliku Vabariigi kolhooside (Landwirtschaftliche Produktionsgenossenschaft) või muu nime all on majandite suurus olnud üle 500, aga enamasti üle 1000 hektari. Eestis algas rapsi intensiivsem kasvatamine alles möödunud sajandi 80-ndatel aastatel.

Elanikkonna tihedus MV liidumaal on ligikaudu kaks korda suurem kui

Eestis. Ühel ruutkilomeetril elab keskmiselt 70 inimest, kellest enamik on koondunud suurematesse linnadesse ning läänepoolses osas käivad paljud inimesed tööl Lübeckis ja Hamburgis. Saksamaa ja Kesk-Euroopa mõistes peetakse piirkonda suhteliselt vaeseks.

Geograafiliselt on Mecklenburg-Vorpommern tasane ning rannikul puhuvad intensiivsed tuuled. Läbi MV liidumaa suurima sadama Rostocki imporditakse kivisütt ning piirkonda läbib Venemaalt läbi Balti mere tulev North-Streami gaasijuhe.

Tulenevalt majanduse agraarsest iseloomust ning väiksemast rahvaarvust osalevad MV liidumaa ettevõtted taastuvenergeetikas enamasti seadmete tootmises ning paigaldamises.

Tuuleenergia klatri iseloomustamisel geograafilisest aspektist lähtudes saame öelda, et Saksa tuuleenergia „aju“ paikneb Hamburgis. Hamburgis paiknevad osad Siemens Wind Power müügi- ja juhtimisstruktuuridest, Nordex SE peakorter ning Hamburgi Tehnikaülikool (TUHH). Mecklenburg-Vorpommerni liidumaal paiknevad Nordex SE tootmiskeskus, mitmed meretuuleparkide rajamisega seotud sadamad, India investoritele kuuluv Kenersys' e tehas ja hulk väiksemaid tarnijaid.

Päikesepaneelide tööstuse „süda“ paikneb Saksamaal Rheini jõe ääres ning Lõuna-Saksamaal (München). Tulenevalt intensiivsest päikesest kattub antud piirkond ka veinikasvatuse regiooniga. MV liidumaal asuvad päikesepaneelide valmistamisega seotud ettevõtted ning mitmed suured päikesepargid. Väiksema asustustiheduse tõttu on maa antud piirkonnas odavam ning mõotmised on näidanud, et näiteks Rügeni saarel on päikese intensiivsus suhteliselt suur ja võrreldav mitusada kilomeetrit lõuna pool paiknevate piirkondadega.

Biogaasil põhinevaid energeetikaseadmeid toodetakse mitmetes riikides. MV liidumaal paiknevad seadmetes kasutatavate tehniliste kultuuride, maisi-, ja teraviljapõllud. Antud regioonis paiknevad ka seadmete projekteerimise ning projektijuhtimise bürood..

## **Taastuenergeetika sektori toimimine Mecklenburg-Vorpommerni liidumaal**

Antud sektori iseloomustamiseks kirjeldame kahte juhtumit (külaskäiku). Külastamise käigus intervjueriti Grevesmühlen Stadtwerke GmbH prokuristi Uwe Drammi ja Tuuleenergia assotsiatsiooni koordinaatorit Bent Christofferi.

### **Juhtum 1. Grevesmühlen GmbH**

Grevesmühlen on ligikaudu Paide suurune põllumajanduspiirkonna keskel paiknev kümne tuhande elanikuga linn. Kohalikul energeetikaeetevõttel Grevesmühlen Stadtwerke GmbH on klientideks 1700 korterit. Mitmed antud asulas paiknevad kortermajad on sarnased kogu idaplokkis püstitatud viiekorruseliste elamutele.

Kakskümmend aastat tagasi oli Grevesmühlen Stadtwerke GmbH sarnases seisus kogu Ida-Saksamaa energeetikaga, mil Venemaalt toodavate naftasaaduste hind kerkis kordades ning pruunsöökaevandusi hakati sulgema. Soojuse hind tarbijatele kerkis väga kiirelt ja vajalik oli leida uusi energeetikalahendusi. 1993. a hakati kütmiseks kasutama maagaasi. 1997. a asuti iseseisvalt elektrit tootma.

Erinevaid energiaprojekte rahastatakse koos pankade ja erinevate toetuste (mitmesugused abiprogrammid) abiga. Projektide tasuvusaeg on ligikaudselt kaheksa aastat, tuulikutel 9–10 aastat. Krediiti võetakse enamasti 12 aasta peale. Seadmete arvestuslikuks (ja ka füüsiliseks) elueaks arvestatakse 20 aastat.

Ettevõttele kuuluvad ka kaks tuulikut, mis osteti valmisprojektidena ning lähikavas on veel osta üks tuulegeneraator.

Ettevõtte jaoks on kohalike farmerite heaolu tähtis. Kohapealsed ehitusfirmad on olnud ehitusprojektide juures. Lähedal paiknevate ehitusfirmade eeliseks on kiire kommunikatsioon ja remonditeenus. Konkurentsi pakuvad lähiümbruses 55 elektri- ja 18 soojatootjat. Ettevõttele kuuluvad

soojatrassid, maagaasi võrgustik ja maagaasi müük balloonides.

Ettevõtte külastamise käigus õnnestus lähemalt tutvuda biogaasil põhineva elektri- ja soojatootmise ning päikesepaneelide pargiga.

Elektri ja soojuse tootmiseks vajalikku maisisilo kogutakse septembri lõpust oktoobrini Hektari saagikus on vahemikus 35–45 tonni haljasmassi hektarilt. Varem kasutati elektri tootmiseks ka teravilja, kuid vilja kõrge hinna tõttu pole seda viimastel aastatel kasulik teha. Soodsaks teguriks on maisi kasvatamise võimalikkus madalama viljakusega maal. Biogaasi käsitlemise skeem on toodud järgmisel lingil esitatud joonisel ([http://stw.loft-net.de/fileadmin/Dateien\\_Websites/PDF/5\\_bio.pdf](http://stw.loft-net.de/fileadmin/Dateien_Websites/PDF/5_bio.pdf)).

Ettevõttele kuulub kaks biogaasiseadet. Üks tarbib aastas 7000 ja teine 10 000 tonni haljasmassi, mille niiskusesisaldus on ligikaudu 30%. Biogaasi kasutusega kaasneb tugev käärimise lõhn, mistõttu sõlmiti biogaasijaama rajamisel lähemate elumajade (ligikaudu 100 meetri kaugusel) elanikega kompromisslepe.

Päikeseplatade park loodi aastal 2009. Hiinast osteti päikesepaneelid ja kohalik puusepp tegi päikesepaneelide raamid (vt lisatud joonised 1 ja 2). Paneelide ridade vahelt on vajalik niitmine.



Joonised 1 ja 2. Grevesmühlen GmbH päikeseplatade park  
Photos 1 and 2. Grevesmühlen GmbH solar panel park



Päikesepatareide pargi toimimine ja andmed on toodud järgneval Internetiivitel ([http://stw.loft-net.de/fileadmin/Dateien\\_Websites/PDF/fotovolt-aianlage.pdf](http://stw.loft-net.de/fileadmin/Dateien_Websites/PDF/fotovolt-aianlage.pdf)).

Huvitava lahendusena võib märkida õppenurgakesi tootmiseseadmete lähedal, kus õpilased saavad tutvuda biogaasist elektri ja sooja tootmise ning päikeseenergia elektri muundamisega.

## **Juhtum 2. Tuuleenergia Assotsiatsioon**

Rostockis paiknev Tuuleenergia Assotsiatsioon (Wind Energie Netzwerke) esindab tuuleenergiaga seotud firmade huve Mecklenburg-Vorpommerni liidumaal. Antud assotsiatsioon kuulub kogu Saksamaad ühendavasse Tuuleenergia Assotsiatsiooni (BWE), mille liikmete arv läheneb sajale ettevõttele ja institutsioonile. 2005. a loodud assotsiatsioon tegeleb tuuleenergia propageerimise, ettevõtete vaheliste võrgustike loomise, tehnoloogia alase ühistöö korraldamisega ning rahvusvahelistes programmides (EL raamprogramm, Interreg) osalemisega.

Tuuleenergia (eriti meretuuleenergia – *offshore windenergie*) propageerimiseks sõitis Läänemerel ringi tuuleenergiat tutvustav laev nimega Greundiek. Laeval oli näitus, jagati infotrukiseid ja meeneid ning toimus elektrooniline viktoriin. Greundiek külastas merepäevade ja teiste suure osalejate arvuga ürituste ajal Saksamaa Läänemere äärsed sadamaid. Laeval olev näitus püüdis vastata küsimustele, et kas meretuulepargid on ohtlikud loodusele, lindudele ning kuidas toimub meretuuleparkide rajamine (<http://www.wind-energy-network.de/news-wanderausstellung-faszination-offshore-2011.html>). Näitus oli külastajatele tasuta.

Assotsiatsioon tegeleb ka tehnoloogia alase arendusega. Veebruaris 2011 asutati Rostocki Ülikoolis firma Nordex AG toetusel tuuleenergia professor (õppetool). Firma toetab professuuri viie aasta jooksul (<http://www.iwr.de/news.php?id=17842>).

Stralsundi Rakendusteaduste Ülikoolis (Stralsund Fachhochschule) õpetatakse tuuleparkide ja meretuuleparkide hooldusspetsialiste ning teisi

taastuenergia valdkondi. Ülikool on Tuuleenergia Assotsiatsiooni liige.

### **Taastuenergia mõju kohalikele majandusele (masinaehitus, mere-tööstus, põllumajandus, ehitus).**

Mitmesuguste taastuenergeetika projektide hindamisel on olulisel kohal kohaliku tööhõive ja kohalike firmade panuse arvestamine. Mõiste „kohalik“ tähendab erinevatele inimestele erinevaid geograafilisi arusaamu. Näiteks Berliini BVMW peakorteris mõistetakse kohaliku all kogu Saksamaad, väiksemates asulates loetakse kohalikeks kreisis (ligikaudselt meie maakonna suurune üksus) ja ka samal liidumaal paiknevaid ettevõtteid. Sõltuvalt tehnoloogilisest keerukusest ja oskusteabest vaadatakse esmajoones lähemal paiknevate firmade suunas, üldehitustööde puhul kaasatakse lähiümbruses asuvaid firmasid ning inseneriprojektide puhul ettevõtteid samalt liidumaalt.

Vastavalt Saksa LV Keskkonnakaitse, Loodushoiu ja Tuumaohutuse Ministeeriumi tehtud uuringule töötas taastuenergeetikaga seotud tööstuses 340 000 inimest (2009), 367 000 (2010). 2004. aastal töötas antud tööstusharus 160 000 inimest (Lehr et al. 2011). Eelnimetatud töökohtadest 103 000 paikneb tuuleenergiatööstuses, 128 000 biomassi sektoris ja 81 päikeseenergia sektoris.

Töökohtade loomine oli ka üks Roheliste Partei (Grüne Partei) valimisloosungeid MV liidumaa valimistel koos lubadustega luua 20 000 uut töökohta. Sama partei valimiskampaania osaks olid ka tuumaenergia suhtes hoiatavad plakatid sõnadega „tikk-takk“, näitamaks ootust, et tuumaõnnetus on vaid aja küsimus.

### **Taastuenergia sektori mõju Mecklenburg-Vorpommerni liidumaa kohalikele poliitikale ja kogukonnale (poliitilised parteid, jalgpalliklubid, ülikoolid jt institutsioonid).**

Taastuenergeetikaga seotud tegevustel on Saksa ühiskonnas oluline roll. See kehtib erinevate huvigruppide – ettevõtete, parteide ja valitsuse kohta. Uute tuuleparkide ja päikeseпаркide rajamised leiavad kajastamist liidumaa kohaliku ajalehe „Ostsee Zeitung“ esimestel lehekülgedel.

Avalikkus on võtnud energeetika valdkonna poliitika kujundamisel aktiivse rolli. Sageli toimuvad demonstratsioonid tuumaenergeetika (tuumamaterjalide transport) vastu ja avalik arvamus ei ole väga soodne ka kaugelt toodava kivisöe kasutamise suhtes. Näiteks Greifswaldis loobuti kogukonna surve all kivisöe koostootmisjaama rajamisest Taani firma Dong Energy poolt.

Otsused energeetika sektori ümberkujundamiseks sünnivad hoopis teistel tasanditel kui need sündisid sotsialismiaegses idablokis. Strateegiliste küsimuste otsused sünnivad laiematel alustel kui vaid üksikute suurte firmade või väikese hulga teadlaste ja indiviidide ettepanekud. Taastuenergeetikaga seostatakse nii paremat keskkonda kui tekkivaid töökohti. Olulisel kohal on süsinikdioksiidi heitme vähendamine erinevatel elualadel.

Oluline ühiskondlik mõju kajastub ka sellises elutähtsas valdkonnas nagu seda on jalgpall. Tuuleenergiafirmade konsortsium Windstärke 11 on liidumaa jalgpalli lipulaeva Hansa Rostocki (Bundesliga 2) sponsori (http://www.windstaerke11.com/). Väiksemad taastuenergeetika firmad toetavad oma asukohtade jalgpallimeeskondi madalamates liigades. Rostocki Hansa staadioni katusele on paigaldatud päikesepatareid (http://www.ostsee-zeitung.de/rostock/index\_artikel\_komplett.phtml?param=news&id=2995850).

### **Saksamaa ja Eesti taastuenergeetika alase seadusandluse võrdlus. Mis aitaks kaasa taastuenergiate kasutamise ja ka vastava tööstuse tekkele? Järeldused, mõtisklused, arvamused**

Enamikus ülevaadetes loetakse taastuenergeetika valdkonnas vastuvõetud seadusandluse alguseks Saksamaal aastat 1991. Arvestades, et antud ajajärk oli ka Interneti tekkimise ja levimise ajaks, saame nentida, et varasemaid materjale Internetis eriti ei esine.

Kogu SLV taastuenergeetika seadusandluse alased trendid on nähtaval ka Mecklenburg-Vorpommerni liidumaal. Aktiivselt on viimase 15 aasta jooksul ehitatud tuuleparke ja biogaasiseadmeid. Praeguseks toodetakse juba üle poole kohalikult tarbitavast elektrist taastuenergiate abil. Antud

piirkonnas ei piirdu taastuenergeetika alane arendus mitte ainult eespool toodud tuule- ja päikeseenergia ning bio- ja prügilagaasi kasutamisega. Kohaliku keskmiste ja väikeste ettevõtete ühingu (BVMW<sup>1</sup>) spetsialistid olid seotud ka jõgedele (või pigem magistraalkraavidele) mõnekümne kilovatiste generaatorite ning merelainetele lainetuse jõul kiikuvate energiat salvestavate seadmete paigaldamisega.

Energiaalaste otsuste vastuvõtmisel mängib suurt rolli detsentraliseeritus. Riigil (üleriigilisel tasandil) on küll seadusandlik roll, kuid kohapealse tehniliste lahenduste üle otsustab kogukond laiemalt. Kaugemalt pärit firmad ning üksikud rikkad erainvestorid seda ainuisikuliselt ei otsusta.

Eestis on energiapoliitika tunduvalt heitlikum, tehniline oskusteave nõrgem ning kohapealne tööstus samuti suhteliselt nõrk. Suuri projekte võtavad ette põhiliselt väliskapitalil olevad firmad või turul ülitugevalt domineeriv Eesti Energia. Ilmseks näiteks on 2011. a juunis Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumi poolt vastu võetud otsus rajada Narva uus põlevkivienergia plokk. Antud otsusest ei teavitatud avalikkust enne selle vastuvõtmist ning üldist diskussiooni praktiliselt ei toimunud.

Detsentraliseeritud energeetika aitaks kaasa ka väikeettevõtluse arengule ning maaelu ja väikelinnade arengule tervikuna. Üks tuumajaam aitaks järjele tõenäoliselt ühe Ida-Viru väikelinna. Kakssada biogaasil tegutsevat jaama aga tuhandeid põllumehi ja mõnisada väikekeskustes tegutsevat energeetikaspetsialisti. Nagu ütles ühe Wismari lähedal naisinvestorite poolt ühiselt rajatud tuulepargi rajajad: tahtsime tuulikud püsti panna selleks, et tiivikud pöörleks ja kaugelt oleks näha, et külas on elu.

### **Kasutatud kirjandus**

Lehr U., Lutz C., Edler D., O'Sullivan M., Nienhaus K., Nitsch J., Breitschopf B., Bickel, Ottmüller M. (2011) Kurz- und langfristige Auswirkungen des Ausbaus der erneuerbaren Energien auf den deutschen Arbeitsmarkt. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Osnabrück, Berlin, Karlsruhe, 1 Kaubandus-Tööstuskojale sarnane institutsioon

Stuttgart im Februar 2011

von Thünen Johann Heinrich (1826) Der isolirte Staat in Beziehung auf Landwirtschaft und Nationalökonomie, oder Untersuchungen über den Einfluß, den die Getreidepreise, der Reichthum des Bodens und die Abgaben auf den Ackerbau ausüben. - Hamburg : Perthes, 1826

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Bmu)

(2010) Entwicklung Erneuerbare Energien Nationale und internationale in Zahlenreferat Öffentlichkeitsarbeit · 11055 Berlin Dipl.-ing.

(FH) Dieter Böhme, Dr. Wolfhart Dürrschmidt, Dr. Michael van Mark Bmu, referat Ki iii 1 (Allgemeine und grundsätzliche Angelegenheiten der erneuerbaren Energien)

Mecklenburg-Vorpommern Tuuleenergia Assotsiatsioon

[wind-energy-network.de/](http://wind-energy-network.de/)

Grevesmühlen Stadtwerke GmbH <http://stadtwerke-gvm.de/>

<http://www.unendlich-viel-energie.de/de/detailansicht/article/4/erneuerbare-energien-erreichen-erstmals-20-prozent-am-stromverbrauch.html>

<http://de.wikipedia.org/wiki/Erneuerbare-Energien-Gesetz>

## **DEVELOPMENT OF RENEWABLE ENERGY SECTOR IN MECKLENBURG-VORPOMMERN (GERMANY)**

Rünno Lumiste

Tallinn University of Technology

Author of current article visited in 2011 North-Eastern part of Germany, Mecklenburg-Vorpommern bundesland. In current article he analyses of use of renewable energy related problems. In Mecklenburg-Vorpommern more than half of electricity is generated from windpower and biogas. Article contains two short case studies.

# KOMPAKTNE BIOKÜTUS HOBUSTE OKASPUU- ALLAPANUST

Mart Hovi, Külli Hovi, Andres Menind  
Eesti Maaülikool  
mart.hovi@emu.ee

## **Annotatsioon**

Biokütus, mis on toodetud hobusetallide okaspuuallapanust võib olla hea ahjukütus. Proovipartii on valminud ja selle omadusi uuritakse. Samasugust kütust on juba kaua kasutatud näiteks Saksamaal ja Rootsis. Soomes on toimunud kohtuvaidluseid, sest EÜ määruse 1774/2002 sealse tõlgenduse kohaselt peaks tooraine olema käideldud kui biojääde (KHO 2009) ja kütusena seda kasutada ei saa.

*Märksõnad: ratsasport, sõnnik, brikett, biokütus*

## **Sissejuhatus**

Eesti Maaülikooli Tehnikainstituudis valmis sellel kevadel koostöös Luunja ratsakooliga esimene proovipartii uudset kütust, mille nimetuseks sai horsepower ehk „Hobujõud”. Kui õnnestub näidata, et kuivatatud ja briketeeritud 10%lise sõnnikulisandiga puidupuru on sobilik kütus väikekolletele, laheneb mitmete tallide jäätmekäitlusprobleem nii meil kui mujal.

Latritest väljaveetav materjal sisaldab hinnanguliselt 90% saepuru ja hõövlilaastu ning 10% hobusesõnnikut. Kui hobuste allapanuna kasutatakse okaspuupuru, pole jääkprodukti võimalik komposteerida, sest okaspuidust tekkiv happeline jääk ei lagune ka pikkade aastate vältel ja võib mõjuda mulla viljakusele negatiivselt.

Kuna materjali puidusisaldus on väga suur, võib seda käsitleda potentsiaalse kütusena. Sedalaadi kütus sobiks suurtele koostootmisjaamadele, kes ei ole aga koostööst huvitatud. Väikekolletes kasutamiseks on materjali struktuur ebasobiv ning niiskusesisaldus liiga kõrge. Kui materjali töödelda, võib siiski võimalikuks osutuda väikekolletes põletamine, nii nagu seda tehakse näiteks Saksamaal ja Rootsis.

Tallist väljuva materjali niiskusesisaldus on umbes 60%. 20%lise niiskusesisaldusega ainet oleks juba võimalik ahjus põletada, kuid saepuru põletamine eeldab spetsiaalset tehnikat. Käsitseenindatavas koldes põletamiseks peaks kütuse struktuur mingil määral sarnanema halupuiduga. Briketeerimise abil on see saavutatav (joonis 1), kuid püsiva partikli saamine eeldab tooraine niiskust vahemikus 10%–15%.

Puidutükikesed on sõltuvalt allapanu päritolust erineva suurusega, keskmise mõõtmega 1 kuni 20 mm. Väljaheide (pabulad) on tarvis enne kuivatamist peenestada või valtsida õhukesteks lehtedeks, lühendamaks vee teekonda osakese pinnale. Juhul, kui seda ei tehta, võivad valmistatud briketid ebahütlaselt jaotunud niiskuse tõttu laguneda. Samuti halvendab materjali jäänud niiskus toodangu kvaliteeti kütusena.



Joonis 1. Mart Hovi, Sven Šois ja väärindaja tutvuvad tahkekütusepartiiga „Hobujõud1“

Figure 1. Mart Hovi, Sven Šois and valuator looking the fuel set „Horsepower1“

Mida madalam on kuivatise mineva materjali algniiskus, seda lühem on kuivatamise aeg ja väiksem energiakulu. Toormaterjali kogumisel ja hoiustamisel peaks tarvitatud allapanu hoidla olema sademete eest varjatud ning võimaluse korral peaks olema tagatud õhu juurdepääs ka hoidla põranda kaudu. Materjalikihi paksus hoidlas on limiteeritud, tagamaks loomulikku konvektsiooni. Kuivamist võib soodustada nii materjali ise-soojenemine kihis kui ka materjali pneumaatiline transport, mis mõlemad soodustavad konvektsiooni ja kuivamist.

Kuna kuivatatava materjali omadused kütusena ei halvene, kui kasutada üle 100kraadist temperatuuri, võib kaaluda soojuslikku konvektiivkuivatust suitsugaasidega, mis peaks oluliselt vähendama kuivatamise energiakulu. Jälgida tuleks süttimisohtu. Sobivalt valitud tehnoloogia korral saab kuivatussoojuse tootmiseks kasutada kütuse toormaterjali enne briketeerimist.



Joonis 2. Kütusepartii „Hobujõud 2“ on pressimisele eelnevalt homogeniseeritud. Briketi tihedus  $950 \text{ kg/m}^3$ , niiskus 10% kogumassist  
Figure 2. Set of fuel „Horsepower 2“ before briquetting homogenized. Density  $950 \text{ kg/m}^3$ , moisture content 10% WB



Pressimiseks sobib juba 15% niiskusega toore, 10% niiskusega toore aga tolmab intensiivselt. Tolm on pressimise juures häiriv tegur ja selle vältimiseks tuleks hoiduda algmaterjali ülemäärasest kuivatamisest. Sobiva niiskusega materjal tuleb pressida ehk briketeerida. Briketeerimise käigus väheneb materjali puistemaht umbes kolm korda ja niiskus 1% võrra.

1 kg materjali niiskuse vähenemine 1% võrra tähendab 10 g vee eraldumist, mis aurustusenergiana on 25 kJ/kg. Kui võtta arvesse, et briketeerimisel kulub keskmiselt 0,1 kWh elektrienergiat pressi käitamiseks ühe kg toodangu kohta, on eelnimetatud vee aurustumine sellest 6,94 W·h ehk alla ühe protsendi. Soojus tekib materjali sees ja suundub materjalist välja. Seega ühtib soojus- ja niiskusvoo suund, mis kuivatuse seisukohalt on väga oluline. Järelikult võib pressimisega kaasnevat kuivamist käsitleda sarnaselt dielektrilisele kuivatusele, milles kõrgsagedusvälja asetatud keha kuivab keha sisemuses tekkiva soojuse toimetel.

Protsessi energiabilansi analüüs võimaldab suurendada protsessi efektiivsust. Kõige kergemini on jälgitav otseselt pressimiseks kasutatav energia, mis peaks muunduma lõpptulemusena briketi temperatuuri tõusuks, mis omakorda aitab vähendada valmistoodangu niiskust. Muud kulud vajavad tulevikus täiendavat analüüsi.

„Hobujõud“ on briketeeritud puidupõhine biokütus, mille tihedus on oluliselt suurem kui pressimata kütusel või isegi halupuidul. Saadud pallikesed sobivad põletamiseks kaminas, ahjus, tahkekütusekatlas ja võib-olla isegi grillis. Kuna kütus on puidust oluliselt tihedam ja kuivem, tuleb selle doseerimisel olla ettevaatlik. Väiksem kütusekogus jätab rohkem ruumi lendosa põlemiseks. Suurem kontsentratsioon parandab ka põlemisprotsessi. Puidust oluliselt madalam niiskusesisaldus vähendab korstnasadestiste tekkimise tõenäosust. Teisalt võib suure energiatihedusega kütus mahupõhisel doseerimisel anda ohtlikult intensiivse põlemise, sest võrreldes halupuudega on materjal kesktlābi kaks korda kuivem ja tihedam. Tulevikus tuleb võrrelda puhta puidu ja „Hobujõu“ keemilist koostist ning põlemisel tekkivaid suitsugaase, et veenduda uue kütuse sobivuses ja ohutuses.

Uuringut toetab projekt ECOHOUSING (Energy Efficient and Ecological Housing), mis on finantseeritud Central Baltic Interreg IV A programmist 2007–2013.

## Kirjandus

Korkein hallinto-oikeus Vuosikirjanumero KHO:2009:61 Antopäivä 22.6.2009 <http://www.kho.fi/paatokset/47100.htm> (26.09.2011)

### **SOLID BIOFUEL FROM CONIFER-CHIP HORSE BEDDING**

Mart Hovi, Külli Hovi, Andres Menind  
Estonian University of Life Sciences

A set of experimental biofuel called „Horsepower“ was produced in Estonian University of Life Sciences. The wood based compact fuel contains 90% cutter chips and 10% horse manure. Homogenized and pre-dried raw material was pressed into a briquette. There are special manners how the unprocessed substance should be preserved. The density of the fuel is higher than it is of wood logs.

Study was supported by the Central Baltic Interreg IVA programme 2007–2013. ECOHOUSING.



CENTRAL BALTIC  
INTERREG IV A  
PROGRAMME  
2007–2013



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

# BIOKÜTUSTE PÄIKESEKUIVATI-ÕPPEVAHEND

Mart Hovi, Külli Hovi  
Eesti Maaülikool  
mart.hovi@emu.ee

## **Annotatsioon**

Konstrueeritud katsekuivati kasutab päikeseenergiat nii soojuse kui elektrilise allikana. Kuivati töötab väljatõmberežiimil, mis võimaldab materjali pinna soojenemise tulemusel suurendada kuivatit läbiva õhu kuivatusvõimet. Seade on mõeldud tahke biokütuse proovipartiide ettevalmistamiseks enne briketeerimist.

*Märksõnad: päike, energia, kuivati*

## **Sissejuhatus**

Eesti Maaülikooli Tehnikainstituudis on konstrueeritud päikeseenergiat kaheti kasutatav katsekuivati. Tegemist on täiustatud konstruktsiooniga kihtkuivatiga, mis kasutab efektiivselt langevat päikese- või muud kiirgusenergiat (joonis 1). Kuivatatava materjali pind töötab soojuskiirguse vastuvõtjana ning lisatud elektrit tootvad päikesepaneelid (PV) toidavad ventilaatorit, mis tekitab kuivati põhjast väljatõmbe. Kui energiat jääb üle, salvestatakse see akusse. Kuivati saab pealt katta klaasiga, et hoida madalasageduslikku kiirgust kuivatis.

Kuivati on mõeldud kütuse proovipartiide ettevalmistuseks. Mahtuvus on ligikaudu 100 liitrit. Seadet saab kasutada abivahendina erinevate soojustehniliste õppeainete praktiliste tööde korraldamisel labori- või välitingimustes. Kui päikest on vähe, võib siseruumides kasutada lisaenergia tekitamiseks kiirgurit. Kui õhu temperatuur kuivatatava kihi pinnal ei ole piisavalt kõrge, lülitub seade automaatselt välja. Temperatuuri tõustes lülitub ventilaator uuesti tööle.

## **Materjal ja meetod**

Klassikalistes külmõhkkuivatites (tare-tüüpi kuivatid), kus õhk liigub tavaliselt alt üles, puhutakse suhteliselt õhukest kuivatatava materjali kihti läbi eelnevalt soojendamata või vähesel määral soojendatud õhuga. Seda

tüüpi kuivati ei kasuta efektiivselt kuivava materjali omadust võtta vastu kiirgust ning kuivati pinnal ja selle kohal olev soojenenud õhk liigub eemale. Samas juba minimaalne temperatuuri tõus suurendaks märgatavalt õhu kuivatusvõimet.



Joonis 1. Katsekuivati, mis kasutab päikesekiirgust soojuse ja elektrienergia allikana

Figure 1. Experimental dryer using solar heat and photo voltage as energy source

Töö ühe autori poolt eelmise sajandi lõpus tehtud uuringute kohaselt võib väljatõmbepõhisel kuivatusel olla teatud eeliseid klassikalise kuivati (sissepuhumisel töötav) ees (Hovi, 1999). Esiteks, võimalus kasutada kuivatamiseks päikese soojendatud õhku. Teiseks, alarõhust tingitud veeauru osarõhu langus peaks kergendama niiskuse väljumist uuritavast materjalist. Eksperimentaalsed tõendid selle kohta küll praegu puuduvad, sest looduses toimuvad õhurõhu muutused on suurusjärgu võrra suuremad kui õhukese kuivatuskihi takistusest tulenevad. Kolmandaks, seda tüüpi kuivatis seotakse kuivatiruumis lenduv tolmu kuivatuskihiga, mis parendab töötingimusi.

Väljatõmmet kasutab ka loodud katseseade. Lisaks alternatiivsele tehnoloogiale on seade varustatav kuivatusagensi parameetrite määramiseks vajaliku mõõtmistehnikaga. Õhutemperatuuri ja -niiskuse määramine ümbristavas keskkonnas ning kuivatist välja juhitava õhuvoos aitavad visualiseerida kuivatuskihist välja kantavat vee hulka.

Kuivatatav materjal kaalutakse enne kuivatisse paigutamist ja määratakse keskmine niiskus. Pärast kuivatamist kaalutakse materjali taas. Kuivatatava materjali temperatuurivälja alusel saab ülevaate kuivatusprotsessi kulgemise kohta. Hindamaks protsessi kulgu jooksvalt, on võimalik kuivati kogumassi määrata rippkaaluga ka siis, kui kuivati töötab.

Mobiilne lahendus ja autonoomne toide võimaldab kuivatit kergesti teisaldada ning vastavalt vajadusele pöörata. Tulevikus võib lisada protsesorjuhtimise ja samm-mootorid kuivati autonoomseks orienteerimiseks, mis võimaldab kiirgusenergiat veel efektiivsemalt ära kasutada.

### **Kokkuvõte**

Kuivati teoreetilise tootlikkuse saab määrata lihtsa arvutusega. Lähtudes solaarkonstandist ja kuivati asukohast ning asendist nii ajas kui ruumis, saab tuletada teoreetiliselt maksimaalse energiavoo. Teades kuivatamiseks teoreetilist vajaliku energia hulka, mis vaatlusalustel tingimustel on sisuliselt võrdne vee aurustussoojusega, saab võrrelda tegelikku ja teoreetilist olukorda ning määrata kuivati kasuteguri. Kui soojuslikel konvektiivkuivatitel on sellisel meetodil määratud kasutegur suhteliselt madal kadude jms tõttu, siis päikesekuivati energeetiline potentsiaal võib olla üsna kõrge. Lisaks päikesekiirgust soojuslikult absorbeerivale kuivatatava materjali pinnale on kuivati päikesepoolses servas kaks PV-elementi. Elementide elektritoodangut visualiseeritakse komplekti kuuluvate näidikutega ning andmed salvestatakse seadmega ühendatavasse datalogger'isse. Kuivatusprotsessi dünaamikat ning kadusid võimaldavad jälgida kuivati erinevatesse piirkondadesse paigaldatavad temperatuuri ja õhuniiskuse andurid.

Uuringut toetab projekt ECOHOUSING (Energy Efficient and Ecological Housing), mis on finantseeritud Central Baltic Interreg IV A programmist 2007–2013.

### **Kirjandus**

Hovi, M. 1999. Teravilja külmõhkkuivatuse strateegia ja energeetika – Väljaanne Põllumajandustehnika, -ehitus ja -energeetika = Agricultural machinery, building and energy engineering. Tartu, 1999. (Teadustööde kogumik / Eesti Põllumajandusülikool; 204). Lk. 85–89.

### **EXPERIMENTAL SOLAR DRYER**

Mart Hovi, Külli Hovi, Andres Menind  
Estonian University of Life Sciences

The experimental solar dryer was built in Estonian University of Life Sciences (EMÜ). The equipment uses solar energy in two different ways. Firstly, solar energy is used for the heating of air that is absorbed during the process. Second purpose is to produce electricity. 12V DC is used for the operation of a fan. Dryer is aimed to prepare fuel samples before briqueting or to perform other tasks if low moisture content is needed. Study was supported by the Central Baltic Interreg IVA programme 2007–2013. ECOHOUSING.



CENTRAL BALTIC  
INTERREG IV A  
PROGRAMME  
2007–2013



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

# TAHKEL KÜTUSEL TÖÖTAVATELE KÜTTESEADMETELE KEHTESTATUD NORMID EUROOPAS JA AHJUEHITUSE HETKESEIS EESTIS

Annes Andresson  
MTÜ Eesti Pottsepad

## **Annotatsioon**

Puidul töötavate kütteseadmete ökonoomikast on Euroopas uuesti hakatud rääkima 20. sajandi lõpul. 2010. aasta 1. jaanuarist kehtima hakanud norm EN 15544 on esimene üleeuroopaline norm, mis fikseeris nõuded halupuudega köetavatele ahjudele. Norm kehtestab minimaalse kasuteguri, heitgaaside ja lendtuha kogused. Eesti astub esimesi samme uute nõuete rakendamise suunas ja püüab kriitiliselt hinnata olemasolevaid kütteseadmeid.

*Märksõnad: taastuvenergia, kütiskvaliteet, kütteseadede, ahjude standardid, ahju kasutegur, Eesti ahjuehitus*

## **Tahkel kütusel töötavate kütteseadmete normid Euroopas**

Tulemas on talv ja inimestel on mure, kuidas tasuda üha suurenevaid küttekulusid. Eestis kestab kütteperiood u 220 päeva - mõnel aastal vähem, mõnel rohkem. Erinevate maakondade kütteperioodid on erinevad, aga selge on, et üha tõusvate küttehindadega toimetulek nõuab pingutusi.

Euroopas hakati kütmise ökonoomikast rääkima 18. sajandil, kui Preisi kuningas Friedrich II korraldas 1764. aastal Saksamaal konkursi ökonoomsema ahju saamiseks. Võitjaks tuli Paul Baumer. Võitja järgi hakati seda tüüpi ahju nimetama Berliini ahjuks ja selle nime all tuntakse ahju kogu Euroopas. Ahju iseloomustas reguleeritav õhjuurdepääs ja siiber. Kolde suurus ja kolderest ning ahju välispindala olid kindlas proportsioonis. Tõsiselt tegeleti kütteseadmete ökonoomikaga omaaegses SDV-s, kus tuntumaks uurijaks oli Karl Heinz Pfestorf, kelle saksakeelsed õpikud olid kättesaadavad ka meil juba 1970-ndatel.

1999. aasta alguses kehtestati Austrias küttepuudega köetavatele kahhel-

ahjudele nõuded kasuteguri ja emissiooni osas. Nende Ö-norm 8302 andis täpse juhendi mainitud parameetrite saamiseks. Kui nendest nõuetest on kinni peetud, siis vastab meistri poolt ehitatud kahhelahi oma soojustehniliste näitajate poolest normile. Alates 2010. aasta 1. jaanuarist kehtib Euroopa norm EN 15544, millega liitusid 27 Euroopa riiki, nende seas ka Eesti. Antud normdokumendis on fikseeritud soovitud pottsepade poolt ehitatavate ja tahkel kütusel töötavate kütteseadmete kohta. Ühekordsel kütmisel on küttepuude lubatud kogus 10-40 kg. Küttekeha salvestuskestus (nimikütteaeg) on 8–24 tundi, see sõltub küttekeha massist ja kütteseadme ehitusmaterjali soojasalvestusvõimest ja kütteseadme konstruktsioonist. Norm kehtestab kütteseadme kasuteguriks minimaalselt 78% ja selle mõõtmise meetodika, kolde ja lõõride mõõtmised, kütmisel maksimaalselt lubatud eralduva CO, NO, lendtuha ja põlemata orgaanika piirmäärad.

|                            |                                     |
|----------------------------|-------------------------------------|
| CO emissioon               | 1500 mg/m <sup>3</sup> (1000 mg/MJ) |
| NO <sub>2</sub> emissioon  | 225 mg/m <sup>3</sup> (150 mg/MJ)   |
| Orgaanikaga seotud süsinik | 120 mg/m <sup>3</sup> (80 mg/MJ)    |
| Lendtuhk                   | 90 mg/m <sup>3</sup> (60 mg/MJ)     |

Norm käsitleb salvestavat ahju, ühekordsel kütmisel peab ahju salvestuskestus olema 8-24 tundi. Selle aja jooksul peab ahi kindlustama keskmise nimivõimsuse. Salvestuskestuse pikkuse tellib klient. Üldiselt ei ole see lühem kui 12 tundi. Meister ehitab siis lähtuvalt kliendi soovist vastava massiga salvestava ahju, mis garanteerib sellise salvestuskestuse. Igasugused õhkküttega ahjud tavaliselt üle paari tunni sooja ei salvesta, rääkimata salvestavast kaminast või bullerjanist. Lähtume sellest, et meie ahi on põhikütteallikas, mille salvestuskestus on 12 tundi. Seda tuleb mõista nii, et salvestatud soojusest jätkub antud ruumi piirete soojapidavuse korral keskmist nimivõimsust 12 tunniks.

Muidugi tuleb lähtuda antud piirkonna arvestuslikust minimaalsest välisõhu temperatuurist, mis Eestis on mandril -22 kraadi ja saartel -19 kraadi. Arvestusliku minimaalse välisõhu temperatuuri saame kahe järjestikuse ööpäeva keskmisest temperatuurist. Seda mõõdetakse iga kolme tunni



tagant kahe ööpäeva jooksul. Kliima muutub ja seda näitajat korrigeeritakse 10 aasta tagant.

Kütuseks on võetud halupuud, mille niiskuse sisaldus on maksimaalselt 20%. Sellise niiskusega küttepuud saame üldjuhul siis, kui kuivatame küttepuid 1,5 aastat ja nad seisavad sel ajal vihma eest kaitstuna lõhult riidas. Soovitav on neid kuivatada lõunapoolsel küljel. Kui kasutame 20% niiskusega küttepuid, siis selle kütteväärtus on 4 kW/kg. Kütteseadme minimaalne keskmine kasutegur peab olema 78%, seega saame 1 kg küttepuudest sooja 3,12 kWh.

Kütteseadme arvutuste aluseks on maksimaalne lubatud küttepuude kogus ühekordseks kütmiseks. Maksimaalse kütusekoguse arvutame järgmiselt:

$$M_b = (Q \times t) / H \times \eta$$

Q - soojavajadus (kW)

t - salvestuskestus (tundi)

M<sub>b</sub> - maksimaalne kütusekogus (kg)

H - kütuse kütteväärtus (kW/kg)

η - kütteseadme kasutegur

Maksimaalse kütusekoguse põhjal saab arvutada küttekolde kubatuuri. Kuna küttepuu põleb pika leegiga, peab koldes olema piisavalt ruumi, sest puu põlemine vajab ruumi ja aega. Küttekolde kogu sisepindala arvutatakse järgmiselt:

$$A_o = 900 \times M_b$$

A<sub>o</sub> – kolde kogu sisepindala (cm<sup>2</sup>)

Küttekolde põhja pindala arvutatakse selliselt:

$$A_p = 100 \times M_b$$

A<sub>p</sub> – kolde põhjapindala (cm<sup>2</sup>)

Et koldes toimuks korralik põlemine, peab kolde pikkuse ja laiuse suhe

olema 1 : 1 - 2 : 1, kuid kolde laius peab olema vähemalt 25 cm.

Kolde kõrgus mõõdetakse kolde pörandast kuni kolde võlvi kõrgema punktini:

$$H_k = (A_o - 2A_p) : U_p$$

H<sub>k</sub> - kolde kõrgus (cm)

U<sub>p</sub> - kolde pörandi ümbermõõt (cm)

A<sub>o</sub> - kolde kogu sisepindala (cm<sup>2</sup>)

A<sub>p</sub> - kolde põhjapindala (cm<sup>2</sup>)

Ahju lõõride kogupikkusest sõltub kütteseadme kasutegur. Suitsulõõride pikkus peab olema selline, et suitsugaasid annaksid lõõris liikudes piisavalt lõõri seintele sooja ja väljuksid korstnasse u 160-180 kraadi juures. Muidugi tuleb arvestada korstna kõrgust, s.o kõrgus kütteseadme sülle lõikumispunktist kuni korstna otsani. See vahekaugus määrab korstna tõmbejõu.

Kütteseadme lõõride minimaalne pikkus meetrites:  $L_{min} = 1,3 \times \sqrt{M_b}$ .

Lõõride maksimaalne pikkus meetrites:  $L_{max} = L_{min} + 10\%$ .

Suitsulõõride ristlõike pindalad (cm<sup>2</sup>) leitakse koefitsient f-i abil:

| kütuse kogus | koefitsient f |
|--------------|---------------|
| <20 kg       | 30 - 35       |
| 20 - 30 kg   | 25 - 30       |
| 31 - 40 kg   | 20 - 25       |

Keskmine suitsulõõri pindala (cm<sup>2</sup>):

$$A_1 = f \times M_b$$

Esimese, kõige suurema lõõri ristlõike pindala (cm<sup>2</sup>):

$$A_1 = A_1 \times 1,333$$

Viimase lõõri ristlõike pindala (cm<sup>2</sup>):

$$A_v = A_1 \times 0,667$$

Nendest soovitustest kinnipidamine garanteerib ehitatud ahjule Euroopa normi täitmise ja kütteseade ei vaja täiendavaid soojustehnilisi mõõtmisi.

### **Olukord Eesti ahjuehituse alal**

Aastaid ehitasid meistrid ahjusid nagu neid oli õpetatud. Alati on meistreid, kes arendavad ennast, aga on ka neid, kes peavad tähtsaks ehitatud ahjude arvu ja arvavad, et nende ehitatud kütteseade on parim.

Kutsekoolist tuli viimane lend pottseppi 1993. aastal. Järgnesid soomlased oma koolitustega. Oli aeg, mil soomlased koolitasid meie pottseppi ja nädalase koolituse järel anti Euroopa pottsepa tunnistus. Tegelikult aga õpetati välja müürsepp-ahjuladujaid. Samas jäid unarusse ahjuehituse seadusandlus ja tuleohutuse normid. Huvitav on, et GOST 3000-45 soojust salvestava ahju kohta, mis on kinnitatud 14. novembril 1945. aastal Nõukogude Liidus, on põhjalikum, kui meil Eestis praegu kehtivad EVS-id.

Et Eestis ilmunud erialane kirjandus on vana ja aegunud, saab ka meie meistrite kohta öelda, et nende tööd on tehnilises arengus maha jäänud. Ökonoomikast kütteseadme puhul ei räägitud. Kütteseadme kasuteguri, võimsuse ja salvestuskestuse määramine oli veel 3-4 aastat tagasi tundmatu. Esimene katse viia meie meistrid kurssi arengutega Euroopas toimus 2007. aastal Tartu Kutsekeskuse poolt korraldatud kursustel.

Millised muutused on selle aja jooksul Euroopas toimunud? Kõigepealt muutus kütteseadme uks. Tema mõõtmed on suuremad ja ukse ees on tulekindel või keraamiline klaas. Küttekolde kõrgust tuli suurendada ja hakati otsima teid põlemistemperatuuri tõstmiseks koldes. Optimeeriti küttekolde gabariidid ja kolde külge- ja tagaseina toodi õhuavad, et parandada kolde sooja õhuga varustamist. Tuli juurde järelpõlemiskambri mõiste.

Järelepõlemiskambrisse juhitakse kolde suitsugaasid ja eelnevalt etteso-  
jendatud (650 kraadi) õhk, et CO põleks lõpuni. Hiljem on sellest kui  
raskesti teostatavast süsteemist loobunud. Järelepõlemiskambris toimuvat  
põlemist on väga raske juhtida, sest ettekuumutatud õhk ja suitsugaasid  
on väga raskesti segunevad. Kui põlemine kambris jääb ära, siis toimub  
seal lihtsalt suitsugaaside jahutamine.

Kogu põlemisprotsessi hakati juhtima automaatikaga, reguleerides õhu  
juurdepääsu ja väljuvaid suitsugaase. Kaasaja seadmed nõuavad ainult  
ahjus halupuude süütamist, kogu ülejäänud protsessi juhib automaatika,  
sulgedes põlemise lõpul ka siibri ja kolde avad, kust õhk koldesse pääseb.

Eraldi teema moodustab kütteseadmete ehituseks vajaminevate materjali-  
de sobivus. Kütteseadmete materjalid peavad taluma kuumutamise tsük-  
leid, salvestama hästi palju sooja - suur soojusmahtuvus - ja seda aeglaselt  
tagasi ruumi andma - väike soojusjuhtivus. Sellist materjali on looduslike  
materjalide seast raske leida, parimaks on osutunud savi ning keraamika.

Meie meistrite ahjude kolded on üldjuhul liialt väikese ruumalaga, seetõ-  
ttu jääb põlemise temperatuur koldes 600 kraadi lähedale. Maksimaalselt  
tõuseb meil ehitatavatel salvestatavatel ahjudel kolde lae all suitsugaaside  
temperatuur 720 kraadini. Suitsulõõride pikkuste, ristlõigete pindalade  
ja lõõride süsteemide välja kujunemine lähtus rohkem ehitusmaterjalide  
sobivusest ja lihtsusest, mitte aga kütteseadme ökonoomsusest. Euroopa  
ahjuehituses on viimase 20 aasta jooksul toimunud arengud, millest meie  
oleme kõrvale jäänud.

Vaja on uuringuid nende kütteseadmete kohta, mida kasutatakse meil  
Eestis. Analüüsides nende parameetreid, saame teada, kui kaasaegsed nad  
on. Nii kaua, kui vastavaid uuringuid ei ole tehtud, jätkub „muinasjutu-  
võistlus“ parima kütteseadme nimel ja inimeste valik sõltub sellest, kui-  
das kliendile kaupa suudetakse serveerida.

### **Kasutatud kirjandus**

Europäische Norm EN 15544. - Europäisches Komitee für Normung, juuli 2009.

Katajev, OV., Ahjuehituse saladused. Moskva: Aveont, 2007. Lk 39 - 49.

Kiitz, Chr., Steinofen-Baupläne. Kiel: Hansadruck, 2005.

Knieriemen, H., Frei, P., Heizen mit Holz ökologisch und gesund. AT Verlag Aaran und München, 2003, lk 13-20.

### **SOLID FUEL STOVE NORMATIVES IN EUROPE AND STOVE-BUILDING SITUATION IN ESTONIA**

Annes Andresson  
MTÜ Eesti Pottsepad

The economics of firewood stoves has been an actual topic in Europe since the end of 20th century. Normative EN 15544, which came into force on January 1<sup>st</sup> 2010, fixates the requirements for firewood stoves. Normative validates minimal operating efficiency as well as allowed amounts of exhaust gas and fly ash. Estonia is currently developing the system to meet these requirements and is in the process of critically evaluating our heaters.

# TAASTUVENERGEETIKA EMÜ ENERGIAKASUTUSE ERIALA ÜLIÕPILASTÖÖDES 2007...2011

Erkki Jõgi, Jaan Lepa  
Eesti Maaülikool, tehnikainstituut  
erkki.jogi@emu.ee, jaan.lepa@emu.ee

## **Annotatsioon**

Artiklis antakse ülevaade Eesti Maaülikooli energiakasutuse eriala 2007.-2011. aastal taastuenergia tootmist ja kasutamist käsitlevatest üliõpilastöödest. Vaadeldud on põhiliselt bioenergeetikat, tuuleenergeetikat ja päikeseenergeetikat käsitlevaid töid. Paralleelselt biokütuste kasutamise uurimisega on vaadeldud ka heitsoojuse ja soojuspumpade kasutamise majanduslikkust.

Magistritööde tulemina on antud rakenduslik panus EMÜ biogaasilabori loomisse ja päikeseenergia katseseadmesse. Lisaks on uuritud generaatorgaasi tootmise, väärindamise ja kasutamise küsimusi, kasvuhoonegaaside emissiooni bio- ja mineraalkütuste kasutamisel. On jõutud järeldusele, et biokütusel tekivad põhilised reostavad emissioonid tootmisel – mineraalkütusel kasutamisel.

*Märksõnad: biokütused, tuuleenergeetika, päikeseenergeetika, mõõtmine, juhtimine, andmehõive*

## **Sissejuhatus**

Eesti Maaülikooli energiakasutuse eriala esimeseks eelkäijaks oli 1972. aastal tookordses Eesti Põllumajanduse Akadeemias loodud põllumajanduse elektrifitseerimise eriala. Vajadus elektri- (energeetika-) inseneride järele oli tingitud suurmajandite väljaarendamisest, mis olid kujunenud ka tehnilisteks keskusteks maaoludes. Majandite energeetikaspetsialistid teenindasid kogu maaelanikkonda, samuti nende territooriumil või naabruses paiknevate väikeettevõtete energeetikaseadmeid. Kui Eesti Vabariigi taasloomisel võeti suund suurmajandite likvideerimisele ja maa tagastamisele seadusjärgsetele omanikele, vähenes eelkõige vajadus suurmajandite elektrispetsialistide järele ja kuna ka varem kuulus nende tööülesannete hulka tegelemine nii soojus- kui ka taastuenergeetika kü-

simustega, muudeti eriala nimetus 1993. aastal põllumajandusenergeetika erialaks.

Praeguse (energiakasutuse) nimetuse sai eriala 2000. aastal, kui Eesti Vabariigi majandus- ja hariduspoliitika olid välja kujunenud ning suurmajandite energeetikaosakonnad asendatud talude ja maal paiknevate ettevõtete energeetikaseadmeid teenindavate väikeettevõtetega. Energeetikaspetsialiste vajasis aga ka paljud maaoludes rajatud väikeettevõtted ja suuremate ettevõtete hajutatult paiknevad allettevõtted ja osakonnad (projekteerijad jne.).

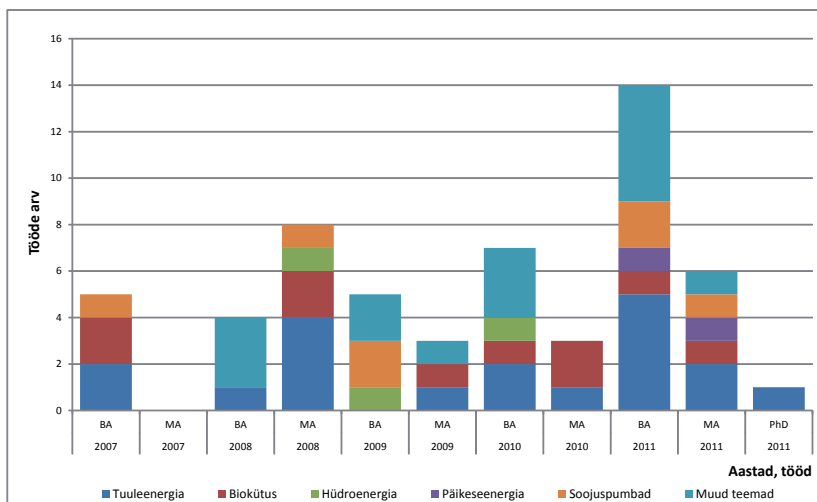
Omaette probleemiks on kujunemas hajaenergeetika ja kohalike väikeste taastuvenergeetikaseadmete väljaarendamisega seotud küsimused, mida kujukalt iseloomustavad just eriala magistritööd.

### **Üliõpilastöödest**

Eesti Maaülikooli energiakasutuse eriala üliõpilastööd jagunevad peamiselt referaatideks, kursuseprojektideks ning erineva astme lõputöödeks. Käesolevas artiklis leiavad käsitlemist peamiselt viimased kui enim kõlapinda omavad.

Aastatel 2007...2011 on EMÜ tehnikainstituudis energiakasutuse eriala üliõpilaste poolt kaitstud 53 erineva taseme taastuvenergia-alast lõputööd. Tööde jaotumist aastate vahemikus on näha jooniselt 1, kust on näha, et kaitstud töödest enamik on koostatud lähtudes tuuleenergia aspektist, nende hulgas ka üks doktoritöö. Neile lisanduvad tööd biokütuste tootmisest ja väärimisest ning päikese- ning hüdroenergia rakendustest. Vähesel määral analüüsitakse geotermaalenergiat ja selle kasutusvõimalusi Eestis ning referaadina on käsitlemist leidnud ka vihmapiiskades salvestunud energia muundamine elektrienergiaks.

Käesolevas artiklis on tööd grupeeritud järgmiselt: tuuleenergeetika, biokütused, hüdroenergia, päikeseenergia, soojuspumbad, muud tööd. Viimase jaotise alla on paigutatud tööd, mis käsitlevad energia salvestamise



Joonis 1. Kaitstud lõputööde arv ja valdkondade jaotus aastatel 2007...2011  
 Figure 1. Defended theses and division of different topics from 2007 to 2011

küsimusi, hoonete autonoomset ja säästlikku energiavarustust ja alternatiivenergeetika õppelabori koostamist.

### Tuuleenergeetikaalased tööd

Tuulest saadavat elektrienergiat on käsitletud kokku 18 töös. Koostatud on nii teemat terviklikuna haaravaid (Tuuleenergia kasutusvõimalused, Tuule- ja päikeseenergeetika sisemaal, Tuulte energeetilise saagise hindamine, Hoone lisaküte tuulegeneraatori abil), üldist hetkeseisu analüüsivaid (Eesti tuuleenergeetika 2007, Eesti tuuleenergeetika 2008), konkreetse tuulikutüübi või asupaiga analüüs (Moderniseeritud Savonius tüüpi tuulik, Aseri tuulepark, Aulepa tuulepark, Tuuleenergia tootmise võimalused Kesk-Eesti idarajoonides, Elektrienergia tarbimise sobivus tuulegeneraatorite võimsusega). Teemat on puudutatud ka esmapilgul natuke tehnikaugemal, kuid siiski väga olulisel ühiskonda sobitumise teemal (Tuuleparkide sotsiaalsed ja majanduslikud mõjud). Tuuleenergeetikaalastes töödes on jõutud järeldusele, et Eestis on suhteliselt soodsad tingimused tuuleenergeetika arendamiseks ning tuleks luua tingimused nende paremaks kasutamiseks. Analüüsitud on tuuleenergia kasutusvõimalusi



vabariigi tuulevaesemates – kesk- ja idarajoonides. Teises analoogses töös on uuritud samas regioonis väikeelamute lisakütteenergia tuulest saamise teemat.

### **Biokütustega seotud tööd**

Biokütuseid erineval kujul on käsitletud 10 lõputöös, peamiseks teemaks biogaas ehk biometaan, selle tootmise (Torma biogaasijaam; Prügilagaaenergia allikana) ja/või kasutamise (Biogaasi kasutus koostootmisjaamas) erinevad aspektid. Lisaks on üliõpilastöodes teostatud ka insenertehniliste ülesannete lahendamist (Metaantanki soojustehnilised parameetrid; Biogaasilabori katsereaktori mõõte-, juhtimis-, ja andmehõive- süsteem). Peale biogaasi on uuritud biomassist saadavate kütustena nii biodiisli (Biodiisli tootmise võimalused Eestis) kui ka bioetanooliga seonduvat (Bioetanooli tootmistehnoloogia tselluloosest materjalist). Puidupõhiste kütustena puudutatakse puitu ennast vähe, seda vaid paaris töös osaliselt (Kuressaare soojus- ja elektrikoostootmisjaam; Maagaasi alternatiivid soojusenergia allikana Värskas Sanatooriumis). Siiski leiab puidul baseeruva kütusena lähemalt käsitlemist generaatorgaas (Generaatorgaasil töötav koostootmisseade; Generaatorgaasi väärimise tehnoloogia). Analüütiliselt on biokütuseid fossiilsete kütustega võrreldud ühes üliõpilastöös (Bio- ja mineraalkütuste tootmise ja kasutamise võrdlus kasvuhoonegaaside emissiooni põhjal).

### **Hüdroenergiateemalised tööd**

Hüdroenergeetika on Eestis teenimatult tagaplaanile jäänud, seda peamiselt sobivate veekogude vähesuse tõttu. Sellest tulenevalt on selle valdkonnaga seotud töid vähe ja needki peamiselt ülevaatliskust aspektist (Hüdroenergeetika Eestis aastal 2008). Siiski on märgata üliõpilaste huvi kasvu mittetraditsiooniliste hüdroenergialahenduste vastu (Väikehüdroelektrijaama teostatavuse analüüs Amme jõel; Pumpelektrijaamad).

### **Päikesenergia käsitlevad tööd**

Päikeselt maapinnale langeva energia otsesele kasutamisele on vaadeldava perioodi jooksul täielikult pühendatud vaid üks töö (Päikesekollektor

väikeelamu soojavee varustuses), kuid valdkonda on käsitletud analüütiliselt väiksema osana üsnagi mitmes erineva taseme lõputöös (Väikeelamu alternatiivenergia varustus; Talu autonoomne elektrienergia varustus; Energiasäästlik väikemaja; Väikese energiatarbega ühepereelamu). Lisaks on tõstatatud ja lahendatud insenertehniline küsimus suunatava päikesepaneeli teemal (Päikesekollektori asendi juhtimine ja andmehõive). Kaudselt puudutatakse päikeseenergeetika teemat ka erinevatele alternatiivsetele energiaallikatele spetsialiseerunud labori sisustamist käsitlevas töös.

### **Soojuspumbad üliõpilastöodes**

Õhku, pinnasesse ja vette salvestunud soojuse kasutamist käsitlevad seitse lõputööna koostatud üliõpilastööd. Kirjutatud on need nii ülevaatliskust aspektist (Õhksoojuspumbad; Geotermaalse energia kasutamise võimalused; Väikeelamu alternatiivenergia varustus, Energiasäästlik väikemaja), analüütilisest vaatenurgast (Soojuspumpade võrdlev analüüs) kui ka rakenduslikult silmas pidades juba konkreetseid objekte (Korteriühistu Mikitamäe 38 maasoojuspumba tasuvusarvutus; Maagaasi alternatiivid soojusenergia allikana Värskas Sanatooriumis).

### **Muud valdkonnaga haakuvad teemad**

Taastuvate ressursside kasutamine on muutunud tänapäeval üsna laialdaseks. Seetõttu on nii mõnedki üliõpilastööd koostatud peamiselt energiasäästu kui –salvestamise teemadel, kus valdkonna piirid kipuvad natuke hägustuma, jäädes samas otseselt seotuks taastuvate energiaallikate kasutamisega (Hooratas-energiasalvesti; Hooratas-energiasalvesti koostöös taastuvenergiaallikatega; Vesiniku tootmise ja salvestamise võimalusi; Energiasääst veepumpade sujuvreguleerimisel; Targa maja energiaravustus). Lisaks on koostatud huvitavaid töid elektriajamiga sõidukitest (Elektriauto omadused ja võimalused; Autode elektriajamid).

### **Kokkuvõte**

Kui vaadata üldist üliõpilastööde arvu, siis võib täheldada valdkonnast huvitatud üliõpilaste arvu väikest kasvutrendi, seda eriti bakalaureuseast-

me üliõpilaste hulgas. Samas on toimunud ka kvalitatiivne edasiminekuks ülevaatliselt teemadelt on liigunud pigem rakendusvaldkonda või keskendunud teema kitsendusele. Kindlasti lisavad huvi taastuenergiaalaste tööde koostamiseks ka valdkonnaga tihedalt seotud nii juba pikemalt kavas olnud kui ka üsna värsked õppeained (Päikeseenergia kasutusvõimalused; Katel- ja koostootmisseadmed; Kütused; Taastuenergiaallikad; Hoonete energiavarustus ja energiaauditid; Päikese tuule ja maasoojuse energeetika, Energiavarustuse alused). Mainimata ei saa jätta ka mitmete Euroopa Liidu poolt rahastatavate regionaalarengu projektide juurde kaasatud üliõpilasi, kes, aidates kaasa uuringute ja projektiülesannete läbiviimisel, saavad hea võimaluse koguda ainekogude oma üliõpilastööde kirjutamiseks peamiselt tuule, biogaasi ja briketeeritud kütuste valdkondades. Eesti Maaülikooli tehnikainstituudi energeetika osakonna juures kaitstud lõputööde loetelu leiab instituudi kodulehelt (<http://te.emu.ee/struktuur/energeetika-osakond-ek/kaitstud-loputood/>), töödega on võimalik tutvuda instituudi raamatukogus (Kreutzwaldi 56, Tartu).

## **EMÜ STUDENT WORKS RELATED TO RENEWABLE ENERGY IN FIELD OF ENERGY USAGE FROM 2007 TO 2011**

E. Jõgi, J. Lepa

Estonian University of Life Sciences, Institute of Technology  
erkki.jogi@emu.ee, jaan.lepa@emu.ee

The purpose of this article is to give an overview of student works related to renewable energy with focus on theses on different level. These works cover mostly wind energy related topics, but also on bio-fuels (producing and upgrading), hydro- and solar energy and heat-pumps. The reviewed period of the topics is from 2007 to 2011.

# KAEVANDUSVESI – RESSURSS IDA-VIRUMAA ENERGIASÄÄSTLIKU ARENGU KAVANDAMISEKS

Veiko Karu  
Tallinna Tehnikaülikooli mäeinstituut, Ehitajate tee 5, Tallinn 19086  
veiko.karu@ttu.ee

## Sissejuhatus

Eesti vabariigi energeetiline alustala on põlevkivi, millest toodetakse enamik elektrienergiast. Põlevkivi on Eestis kaevandatud üle 90 aasta, selle aja jooksul on maa alt välja veetud enam kui miljard tonni põlevkivi. Kogu kaevandamise ajal on järjest kasutusele võetud keskkonnasõbralikumaid kaevandamisviise ja pööratud rõhku keskkonnakaitsele. Nüüdseks on loodud põlevkivi kaevandamise arengukava ja rakendusplaan, mis tagavad põlevkivi optimaalse kasutamise.

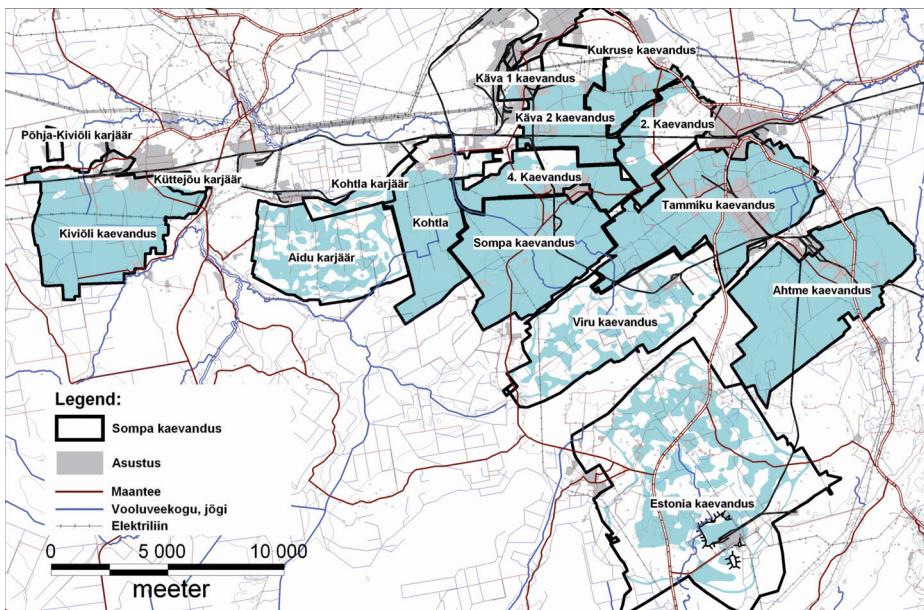
Põlevkivi kihind asub enamasti põhjavee tasemest allpool. Põlevkivi kaevandamiseks tuleb põhjavee taset alandada. Nii on tekkinud Ida-Virumaale põhjavee alanduslehter. Kaevandamise lõppedes ei pumbata kaevandusest ja karjäärist enam vett välja ja põhjavee tase hakkab taastuma, saavutades kaevandamiseelse taseme. Nii täituvadki suletud kaevandused veega. Eesti põlevkivimaardlas on suletud kaevandustest veega täielikult täitunud Ahtme, Tammiku, Sompä ja osaliselt täitunud kaevandus nr 4, kaevandus nr 2, Käva, Käva 2, Kohtla, Kiviõli ning Kukruse. Kaevanduste vahele on jäetud tõkketervikud, nii on tekkinud kaevanduste piires nn allmaabasseinid. Tõkketervik jäetakse kaevanduste (kaevanduste) vahele, tõkestamaks vee sissevoolu naaberkaevandusest, kui viimane peaks suletama. Suletud põlevkivikaevanduste vee kasutamine soojusenergia või kineetilise energia allikana on üks võimalusi moodustunud tehnoloogilise veekogumi otstarbekaks kasutamiseks.

## Allmaabasseinid

Allmaabasseinid on üksteisest eraldatud tõkketervikutega, allpool oleval joonisel (joonis 2) on toodud kolme põlevkivimaardla allmaabasseini läbilõige. Joonisel olev lõige algab kaevanduse Käva 2 põhjaosast ning liigub põhjast lõunasse kuni Viru kaevanduse põhjaosani. Näha on, et

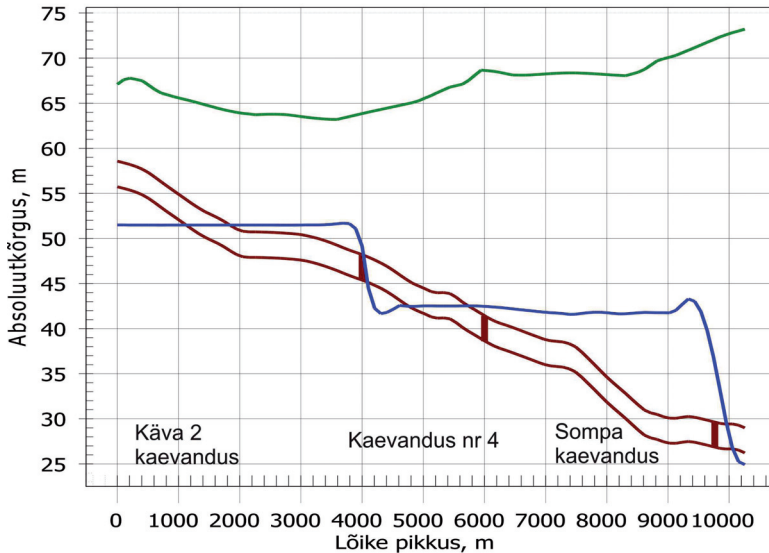
kaevandus Käva 2 on põhjaosas kuiv. Samuti on kuiv kaevanduse nr 4 põhjapoolne osa. Käva 2 on kuiv seetõttu, et põlevkivi kihind on lõunasse kaldu ning kogu vesi voolab mööda kihindi põhja lõuna suunas. Juhul kui sademeid oleks rohkem, täituks samuti Käva 2 põhjaosa teatud määral veega. Kaevanduse nr 4 põhjaosa on kuiv seetõttu, et Käva 2 ja kaevanduse nr 4 vahel on tõkketervik ning vee infiltrerumine Käva 2-st kaevandusse nr 4 võtab aega. Samas ei ole kaevanduse nr 4 ja Sompa kaevanduse vahel analoogset olukorda tekkinud, kuna põlevkivikihindi sügavus on juba nii suur, et Sompa kaevandus on täielikult veega täitunud (Reinsalu jt 2006).

Kui palju võib suletud kaevandustes vett olla? Erinevad uuringud on hinnanud põlevkivi kihindis olevaks veehulgaks 160...170 mln m<sup>3</sup> (Reinsalu jt 2006, Erg jt 2007). Kui arvesse võtta ka kivimite lõhelisust ja poorsust kaevanduste kohal, siis on sellel alal olev veehulk üle 500 miljoni m<sup>3</sup>.



Joonis 1. Veega täitunud kaevandused  
Figure 1. Oil shale mines filled with water

## Allmaabasseinid lõige põhjast lõunasse



Joonis 2. Läbilõige põlevkivimaardlast (põhjust lõunasse). Märkus: roheline joon – maapind; sinine joon – veetase; pruun joon – põlevkivi kihind.  
Figure 2. Cross-section from North to South. Note: green line – ground surface; blue line – water level; brown line – oil shale seam.

### Allmaabasseinides oleva vee omadused

Pärast sulgemist täitub kaevandus veega kolme-nelja aasta jooksul. Suletud kaevandustesse tuleb vesi peamiselt sademetest. Vee liikumine kaevanduses sõltub kaevandatud ala kivimite veejuhtivusest, poorsusest, veemahutavusest, kaevandamisviisist (mida igas kaevanduses oli kasutusel mitu) (Reinsalu jt 2002). Ilmne on fakt, et kaevandused on veega täitunud, veemaht kaevandustes suur ja seal olev vesi omab aastaringset stabiilset temperatuuri 7...9 °C. Soojem temperatuur on suvel ja sügisel (Savitski, Savva 2010). Eesti Energia Kaevanduste monitooring näitab, et umbes kolme aastaga omandab suletud kaevanduste vesi joogivee kvaliteedi. Kaevandustes olev vesi puhastub veelgi, kuid see vältab aastaid.

## Metoodika

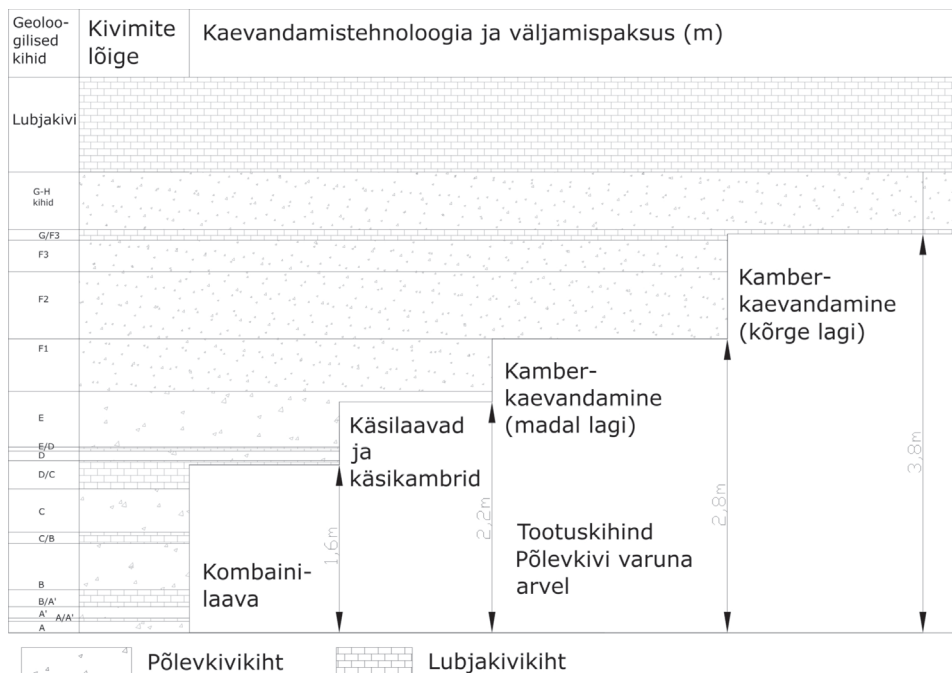
Suletud põlevkivikaevanduste vee kasutamine soojusenergia allikana on üks võimalusi moodustunud tehnogeense veekogumi otstarbekaks kasutamiseks. Kasutamise otstarbekuse analüüsi teostamiseks on peamisteks kasutatavateks meetoditeks matemaatilised mudelid ning GIS (geoinfosüsteemi) andmete analüüs. Tehnogeense veekogumi kasutamise hindamiseks tuleb arvutada võimalik vee maht ja vooluhulk, analüüsida võimalikke kohti veevõtuks, vee pumpamiseks või soojuspumba paigutamiseks. Analüüsiks tuleb koostada mäenduslik geoinfosüsteemi mudel, mis sisaldab kivimikihtide ja maapinna geomeetrilist mudelit, kaevanduse tehnoloogilist ruumilist mudelit ja vee voolu hüdrogeoloogilist dünaamilist mudelit. Töövahenditena kasutatakse MapInfo Professionali kaartide haldamiseks, Vertical Mapperit interpoleerimiseks ja mahuarvutuseks ning ModFlow Professionali dünaamilise veemudeli koostamiseks.

## Tulemused

Kaevandatud maa-ala olukord sõltub peamiselt sellest, millist kaevandamisviisi on kasutatud (Reinsalu jt 2002). Kaevandamisviisist ning geoloogilistest tingimustest sõltub tervikute ja kambrite suurus, lae käitlemiskord, paeriitade ladumine ning lae langetamine kombainkaevandamisel. See paneb paika piirid, kui palju tühja ruumi pärast mäetööde lõppu kaevandatud alasse jääb. Allpool oleval joonisel (joonis 3) on näidatud kaevanduse võimalik maksimaalne vaba ruum, mis olenevalt põhjavee tasemest täitub veega. Analüüsides erinevaid mäetööde plaane, kaevanduste kaarte, geoloogilisi tingimusi, tootmisgraafikuid ning teisi aspekte, saab arvutada võimalikud allmaabasseinide veekogused (tabel 1).

Suletud põlevkivikaevanduste vee ehk kaevandusvee kasutamine soojusenergia allikana on üks peamisi võimalusi moodustunud tehnogeense veekogumi otstarbekaks kasutamiseks, kuna kaevandusvee temperatuur on aastaringelt stabiilne. Nii saabki olemasolevat ressursi kaevandusvee näol kasutada Ida-Virumaa energiasäästliku arengu kavandamiseks. Arvestades soojusenergia vajadusi, soojusteguri COP (*Coefficient of Performance*) (Eesti Soojuspumba Liit 2010) optimaalset väärtust, saame

hinnata protsessi majanduslikku efektiivsust ja leida sobivaimad kohad soojuspumpade paigaldamiseks.



Joonis 3. Kaevandatud maa-alale jääva ruumi maksimaalne suurus  
 Figure 3. Underground mining methods and maximum size of free space

Analüüsi tulemusena saab väita, et suurarbijana on kõige potentsiaalsem rajada soojuspumbajaam Ahtme soojuselektrijaama juurde, et vajadusel kasutada olemasolevat jaama vee temperatuuri tõstmiseks soovitud tasemeni, kui soojuspump ise seda ei võimalda (eriti väga külmade õhutemperatuuride korral). Sellisel juhul on kaevandusveena kasutatav kuni 28 mln m<sup>3</sup> Ahtme kaevanduse vett. Optimaalsel režiimil toodaks soojuspumbajaam 10 MW soojust, kasutades selleks kaevandusvett 2151 m<sup>3</sup>/h ning vajades 3,3 MW elektrienergiat.



Tabel 1. Kaevandusvee mahuarvutamise andmestik ja tulemused  
Table 1. Data for minewater calculation and results

| Omadused   | Kukuruse     | Kaevandus nr 2 | Käva        | Käva 2       | Kaevandus nr 4 | Tammiku      | Sompa        | Kohtla       | Ahtme        |
|--|--------------|----------------|-------------|--------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Kaevanduse avamine                                       | 1921         | 1949           | 1924        | 1924         | 1953           | 1951         | 1948         | 1937         | 1948         |
| Kaevanduse sulgemine                                     | 1967         | 1973           | 1972        | 1972         | 1975           | 1999         | 1999         | 2001         | 2001         |
| Kaevandamisae, aasta                                     | 46           | 24             | 48          | 48           | 22             | 48           | 51           | 64           | 53           |
| Kaevvälja pindala, km <sup>2</sup>                       | 13,20        | 12,30          | 3,47        | 14,05        | 12,70          | 40,00        | 33,60        | 18,30        | 43,30        |
| Kaevandatud ala, km <sup>2</sup>                         | 15,13        | 8,57           | 1,84        | 11,72        | 10,43          | 19,26        | 18,14        | 12,14        | 26,36        |
| Kaevandamata ala, km <sup>2</sup>                        | 0,00         | 3,73           | 1,63        | 2,33         | 2,27           | 20,74        | 15,46        | 6,16         | 16,94        |
| Katendi paksus, m  | 11           | 13             | 21          | 10           | 12             | 23           | 23           | 15           | 37           |
| Põlevikivi kihindi paksus, m                             | 2,83         | 2,81           | 2,83        | 2,82         | 2,8            | 2,8          | 2,77         | 2,76         | 2,79         |
| <b>Tühi ruum<br/>põlevikivihindis, mln m<sup>3</sup></b> | <b>42,82</b> | <b>24,08</b>   | <b>5,22</b> | <b>33,05</b> | <b>29,20</b>   | <b>53,92</b> | <b>50,24</b> | <b>33,52</b> | <b>73,53</b> |
| <b>Väljatud põlevikivihindi paksused, m</b>              |              |                |             |              |                |              |              |              |              |
| Käsilaava  | 2,2          | 2,2            | 2,2         | 2,2          | 2,2            | 2,2          | 2,2          | 2,2          | 2,2          |
| Käsiakambrid   | 2,2          | 2,2            | 2,2         | 2,2          | 2,2            | 2,2          | 2,2          | 2,2          | 2,2          |
| Kamberkaevandamine                                       | 2,83         | 2,81           | 2,83        | 2,82         | 2,8            | 2,8          | 2,77         | 2,76         | 2,79         |
| Strekid  | 2,83         | 2,81           | 2,83        | 2,82         | 2,8            | 2,8          | 2,77         | 2,76         | 2,79         |
| Kombainilaava  | 1,5          | 1,5            | 1,5         | 1,5          | 1,5            | 1,5          | 1,5          | 1,5          | 1,5          |
| <b>Kaevandatud maa-ala, km<sup>2</sup></b>               |              |                |             |              |                |              |              |              |              |
| Käsilaava  | 11,28        | 6,87           |             | 9,16         | 7,71           | 4,36         | 12,70        | 3,80         | 6,33         |
| Käsiakambrid   | 3,50         | 0,00           | 1,84        | 1,73         | 0              | 0            | 0,06         | 1,36         | 0,05         |
| Kamberkaevandamine                                       | 0,29         | 1,70           |             | 0,79         | 1,08           | 11,81        | 1,86         | 0,55         | 19,22        |
| Strekid  | 0,06         | 0,00           | 0,00        | 0,04         | 0,69           | 0,36         | 0,00         | 0,02         | 0,30         |
| Kombainilaava  | 0            | 0              |             | 0            | 0,95           | 2,74         | 3,52         | 6,41         | 0,46         |
| <b>Kaevandatud ala, km<sup>2</sup></b>                   | <b>15,13</b> | <b>8,57</b>    | <b>1,84</b> | <b>11,72</b> | <b>10,43</b>   | <b>19,26</b> | <b>18,14</b> | <b>12,14</b> | <b>26,36</b> |
| <b>Kaevandusvee maht kihtides, mln m<sup>3</sup></b>     |              |                |             |              |                |              |              |              |              |
| Veemaht Kvaternaari setetes                              | 3,96         | 3,69           | 1,04        | 4,22         | 3,81           | 12,00        | 10,08        | 5,49         | 12,99        |
| Veemaht katendilubjakivis                                | 3,94         | 3,40           | 1,37        | 3,56         | 3,48           | 17,33        | 14,46        | 5,30         | 27,62        |
| Veemaht väljatud põlevikivihindis                        | 17,05        | 9,54           | 1,74        | 13,29        | 16,92          | 23,51        | 21,93        | 16,14        | 28,75        |
| <b>Kokku</b>   | <b>24,96</b> | <b>16,62</b>   | <b>4,15</b> | <b>21,06</b> | <b>24,21</b>   | <b>52,84</b> | <b>46,47</b> | <b>26,93</b> | <b>69,36</b> |
| <b>Kaevandusvee jagunemine kihtide vahel, %</b>          |              |                |             |              |                |              |              |              |              |
| Veemaht Kvaternaari setetes                              | 15,9         | 22,2           | 25,1        | 20,0         | 15,7           | 22,7         | 21,7         | 20,4         | 18,7         |
| Veemaht katendilubjakivis                                | 15,8         | 20,4           | 32,9        | 16,9         | 14,4           | 32,8         | 31,1         | 19,7         | 39,8         |
| Veemaht väljatud põlevikivihindis                        | 68,3         | 57,4           | 42,0        | 63,1         | 69,9           | 44,5         | 47,2         | 59,9         | 41,4         |

## Arutelu

Mäetaguse valla initsiatiivil ehitati soojuspump Kiikla asulasse. Kiikla asula paikneb Mäetaguse valla lääneosas. Asula ümbrusesse jäävad suletud Sompa kaevandus, töötav Viru kaevandus ning rajatav Ojamaa kaevandus. Ehitatud soojuspump kasutab soojusallikana Sompa kaevanduses

olevat kaevandusvett. Kaevandus piirneb põhjas endise kaevanduse nr 4 kaevandatud alaga, idas Tammiku, lõunas Viru ja läänes Ojamaa kaevandusega (joonis 1). Rajatud soojuspumbajaama võimsus on 500 kW soojusenergiat, mis kasutab kaevandusvett maksimaalselt 74 m<sup>3</sup>/h. Rakendatud tehnoloogia näeb ette, et kaevandusvesi pumbatakse maa peale. Mööda torustikku juhitakse see soojuspumbani (umbes 1000 m), soojuspumbas alandatakse vee temperatuuri nelja kraadi võrra ning seejärel suunatakse jahenenud vesi mööda torustikku uuesti Sompka kaevanduse veebasseini tagasi, umbes 300 m kaugemale väljapumpamiskohast. Nii jõuab tagasi lastud vesi kaevanduses uuesti soojeneda. Vastav torustik on rajatud külmumispiirist allapoole, et minimaliseerida talvise ilma mõju välja pumbatavale ning tagasi suunatavale kaevandusveele. Vastav projekt ei ole veel jõudnud majandusliku optimumini, kuid kui see peaks lähiaegadel saavutatama, siis on reaalne, et taolisi soojuspumbajaamu võib Ida-Virumaal suletud kaevanduste piirkonda veel teisigi tekkida.

Käesolevas artiklis tutvustatud asjaolusid arvestades saab põlevkivi-kaevanduste eluiga vaadata järgnevalt. Kaevandus rajatakse põlevkivi kaevandamiseks, mida kasutatakse elektrienergia saamiseks. Samuti toodetakse sellest erinevaid keemilisi ühendeid – põlevkiviõli. Pärast põlevkivi ammendumist täitub kaevandus aja jooksul veega. Veega täitunud kaevandusi saab uuesti kasutada, seda küll mitte otseselt elektrienergia tootmise eesmärgil, vaid soojusallikana soojuspumpades. Suletud põlevkivikaevandustes oleval veel on aastaringelt stabiilne temperatuur 7...9 °C. See on hea argument, mis soodustab kaevandusvee kasutamist soojuspumpade soojusallikana. Nii võime energiat ammutada isegi suletud põlevkivikaevandustest.

### **Kokkuvõte**

Põlevkivi on Eestis kaevandatud üle 90 aasta. Selle aja jooksul on maa alt välja veetud enam kui miljard tonni põlevkivi. Kui kaevanduses ei ole enam võimalik põlevkivi kaevandada (kas tehnoloogilistel või majanduslikel põhjustel, varu ammendumisel), siis vastavalt kehtestatud korrale see suletakse. Eesti põlevkivimaardlas on praeguseks suletud kümme

kaevandust maardla keskosas, viimased neist suleti 1999–2002 (Sompa, Tammiku, Ahtme ja Kohtla kaevandused). Kuna põlevkivi kihind asub enamasti põhjaveetasemest allpool, siis põlevkivi kaevandamiseks tuleb põhjavee taset alandada. Nii on tekkinud Ida-Virumaale põhjavee alanduslehter. Kaevandamise lõppedes kaevandusest ja karjäärist vett enam välja ei pumbata ja põhjavee tase taastub, saavutades selle taseme, mis tal oli enne kaevandamist. Nii täituvadki suletud kaevandused veega.

Suletud põlevkivikaevanduste vee kasutamine soojusenergia allikana on üks võimalusi moodustunud tehnogeense veekogumi otstarbekaks kasutamiseks. Veekogumi kasutamise hindamiseks tuleb arvutada võimalik vee maht ja vooluhulk, analüüsida võimalikke kohti veevõtuks, vee pumpamiseks või soojuspumba paigutamiseks. Analüüsiks on otstarbekas koostada mäenduslik geoinfosüsteemi mudel, mis sisaldab kivimikihtide ja maapinna geomeetrilist mudelit, kaevanduse tehnoloogilist ruumilist mudelit ja veevoolu hüdrogeoloogilist dünaamilist mudelit.

Mäetaguse vallas rajatud soojuspumbajaam kasutab soojusallikana Sompa kaevanduses olevat kaevandusvett. Sompa kaevandus, mis jääb Kiikla asula kirdeossa, suleti 12.02.2000. Soojuspumbajaama võimsus on 500 kW, mis kasutab maksimaalselt 74 m<sup>3</sup>/h kaevandusvett. Rakendatud tehnoloogia näeb ette kaevandusvee ringluse. Vastav projekt ei ole veel jõudnud majandusliku optimumini, kuid kui see peaks lähiaegadel saavutatama, siis on reaalne, et taolisi soojuspumbajaamu võib Ida-Virumaal suletud kaevanduste piirkonda veel teisi tekkida.

### **Tänu sõnad**

Käesolev artikkel ning vastav uurimistöö on seotud TTÜ mäeinstituudi teadusuuringuga ETF grandiprojekt 7499 „Säästliku kaevandamise tingimused”, ETF grandiprojekt 8123 “Täitmine ja jääkide (jäätmete) haldamine Eesti põlevkivitööstuses”, Euroopa Liidu Läänemere piirkonna projektiga “MIN-NOVATION Mining and Mineral Processing Waste Management Innovation Network”.

## **Kasutatud kirjandus**

Eesti Soojuspumba Liit. <http://espel.ee/> (11.11.2010)

Erg, K., Karu, V., Lind, H., Torn, H., Mine pool water and energy production. - Doctoral school of energy- and geo-technology January 15–20. Estonia, 2007.

Reinsalu, E., Toomik, A., Valgma, I., Kaevandatud maa. TTÜ mäeinstituut, 2002.

Reinsalu, E., Valgma, I., Lind, H., Sokman, K., Technogenic water in closed oil shale mines. - Oil Shale Vol 23, No 1, 2006, lk 15-28.

Reinsalu, E., Vesi suletud põlevkivikaevandustes. 2006. <http://www.ene.ttu.ee/Maeinstituut/mgis/ere.pdf> (11.11.2010)

Savitski, L., Savva, V., Ahtme kaevanduse veevaruhindamine AS Kohtla-Järve Soojus tehnilise vee vajaduse rahuldamiseks. Uuringu aruanne. Eesti Geoloogiakeskus OÜ, 2010.

## **MINEWATER AS RESOURCE FOR HEAT PUMPS TO DEVELOPMENT ENERGY SYSTEM IN IDA-VIRU COUNTY**

Veiko Karu

Tallinn University of Technology

The main aim of this paper is to analyze the feasibility of using minewater as heat source for heat pumps and to find suitable places to set up such systems. Estonian Oil Shale deposit is located in Eastern part of Estonia. Underground oil shale mining has been performed for 90 years in the middle-north part of Baltic oil shale basin in Estonian deposit. Underground oil shale mining creates underground pools of water called technogenic water bodies. In the oil shale deposit are ten mines which are closed and filled fully or partly with water. It would be useful to use this minewater like heat source for heat pumps to produce heat. For defining underground space properties, classification of used mining technologies is created and evaluated for defining hydrogeological parameters. Classification helps defining space that is available for water in abandoned mines. 3D model was built with geometrical data from mine plans, mine

closing acts and borehole data and from land survey data. The main tools chosen for spatial modelling were spreadsheets and MS Access databases for systemising and querying data, MapInfo for georeferencing, Vertical Mapper for interpolating and grid calculations and Modflow for pumping simulation. With help of interpolated grids, surface elevations, layer thicknesses and required properties were calculated.

# PROGRASS – POOLLOODUSLIKE ROHUMAADE SÄILIMISE TAGAMINE BIOENERGIA TOOTMISE KAUDU

Indrek Melts<sup>1</sup>, Katrin Heinsoo<sup>1</sup>, Lutz Bühle<sup>2</sup>, Michael Wachendorf<sup>2</sup>, Iain Donnison<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Põllumajandus- ja keskkonnainstituut, Eesti Maaülikool, Kreutzwaldi 5, Tartu 51014;  
indrek.melts@emu.ee, katrin.heinsoo@emu.ee

<sup>2</sup>Rohumaateaduse ja taastuvate taimeressursside osakond, Kasseli ülikool, Steinstrasse 19,  
37213 Witzenhausen; buehle@uni-kassel.de

<sup>3</sup>Bioloogia, keskkonna- ja maateaduste instituut (IBERS), Aberystwythi ülikool,  
Gogerddan, Aberystwyth, SY23 3EB

## Annotatsioon

Regulaarne kesksuvine poollooduslike rohumaade niitmine on vajalik bioloogilise ja maastikulise mitmekesisuse säilimiseks. Samas on selle söödaväärtus juba väike ning kõrge ligniinisaldusega rohtse biomassi kasutamine efektiivseks energiatootmiseks keeruline. Kasutusvõimaluste parandamiseks on välja töötatud innovatiivne tehnoloogia „Kombineeritud tahkekütuse ja biogaasi tootmine biomassist“ (KTBB), millest lähtuvalt on konstrueeritud mobiilne bioenergia tootmiseade. Rakendusuuringu PROGRASS ([www.prograss.eu](http://www.prograss.eu)) eesmärgiks on välja pakkuda terviklik lahendus poollooduslike rohumaade säilitamiseks, tootes nende biomassist energiat.

*Märksõnad: poollooduslikud rohumaad, rohtne biomass, eeltöötlus, tahkekütus, biogaas.*

## Sissejuhatus

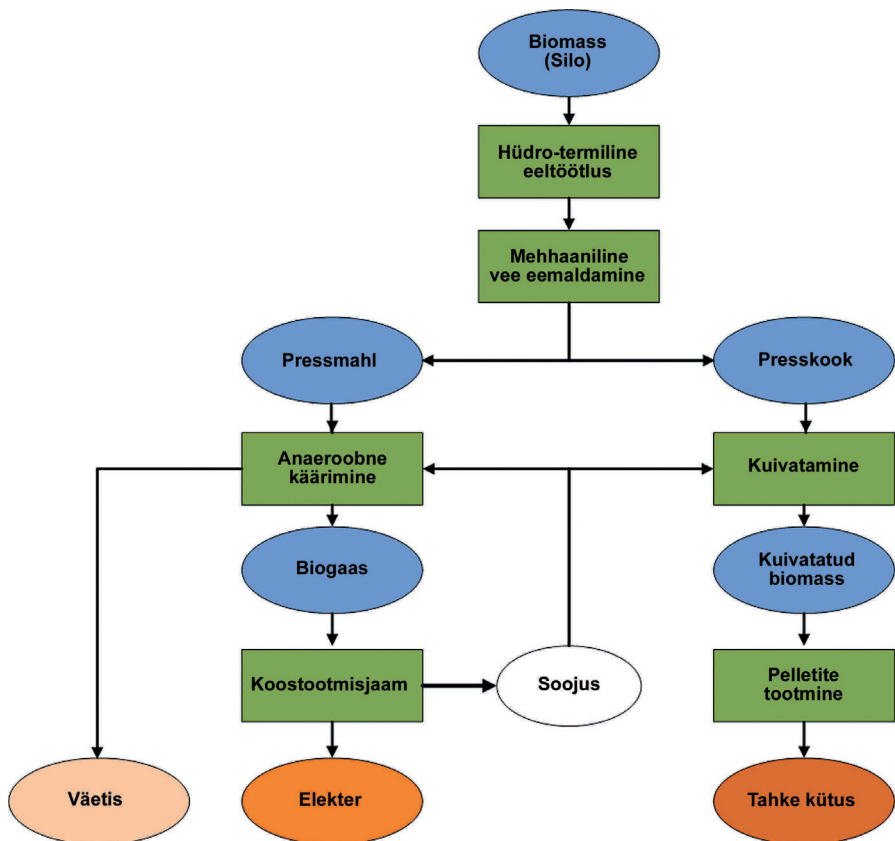
Projekti PROGRASS keskmes on üleeuroopalise kaitstavate alade võrgustiku Natura 2000 poollooduslikud rohumaad. Need poollooduslikud rohumaad on kõrge looduskaitseväärtusega ja olulised bioloogilise mitmekesisuse säilimisel. Euroopa Liidu nõukogu direktiiviga 92/43/EMÜ (EÜT L 206) on liikmesriigid, sh Eesti võtnud kohustuse tagada nende elupaikade kaitse.

Eestis on hinnanguliselt üle 100 000 ha poollooduslikke rohumaad (Kukk jt 2006). Sellest vähem kui 20 000 hektarile on Keskkonnaameti ja PRIA

(Põllumajanduse Registre ja Informatsiooni Amet) andmetel taotle- tud poollooduslike koosluste hooldamistoetust (ES 2010) ja neid niide- takse üks kord aastas alates juuli keskpaigast. Hooldamiseks (niitmine või karjatamine) makstakse riiklikku toetust 185,98 eurot hektari kohta (238,07 eurot, kui tegu on puisniiduga) (RT I, 21.04.2011, 5). See toetus on ilmselt ebapiisav, sest vastavalt Eesti Keskkonnategevuskavale 2007- 2013 peaks aastaks 2013 olema hooldatavate poollooduslike koosluste pindala Eestis 30 000 ha.

Poollooduslike rohumaade püsimise vältimatuks tingimuseks on regu- laarne traditsiooniline majandamine – niitmine ja/või karjatamine. Eks- tensiivse põllumajanduse vähenemise tõttu on alanenud rohtse biomassi kasutamine loomasöödaks. Probleeme tekitab ka selle biomassi kasutu- selevõtt efektiivseks ja keskkonnasõbralikuks energiatootmiseks, kuna traditsioonilise biogaasi tootmise tehnoloogia kasutamisel on see lignii- nirikas biomass vähe lagunev ja seetõttu väikse biogaasipotentsiaaliga (Richter jt 2009). Samuti on poollooduslike rohumaade heina põletamine raskendatud, kuna see sisaldab suhteliselt palju mineraalaineid, lämmas- tikku ja ka väävlit. Nende ainete suurem kontsentratsioon tekitab puidu põletamiseks seadistatud kateldes probleeme tuha sulamise, korrosiooni ja suureneva õhusaastega (Oberberger jt 2006). Uus, väljatöötatud teh- noloogia „Kombineeritud tahkekütuse ja biogaasi tootmine biomassist“ (Wachendorf jt 2009) (joonis 1) võimaldab biomassi kvaliteeti põletami- seks ja biogaasi tootmiseks parandada.

Biomassi kvaliteedi parandamiseks kasutatakse eeltötlust. Alustuseks kastetakse sileeritud rohtne biomass üle sooja veega (40-60 °C). Järg- nevalt eraldatakse leotatud biomass tigupressiga tahkeks kiudaineterik- kaks osaks (presskook) ja biokeemiliselt hästi lagunevaks mineraalaine- terikkaks vedelikuks (pressmahl). Presskooki on võimalik kasutada tahke kütusena briketi või pelleti kujul. Presskoogil on paremad põlemisoma- dused, võrreldes eeltöötlemata rohtse biomassiga (nt hein, põhk), kuna hüdrotermilise eeltötlusega väheneb mineraalainete sisaldus ning tõuseb tuha sulamise temperatuur. Pressmahla saab kasutada biogaasi tootmi- seks: tänu hüdrotermilisele eeltötlusele laguneb pressmahl anaeroobsel



Joonis 1. Kombineeritud tahkekütuse ja biogaasi tootmine biomassist  
 Figure 1. Integrated Generation of Solid Fuel and Biogas from Biomass (IFBB).

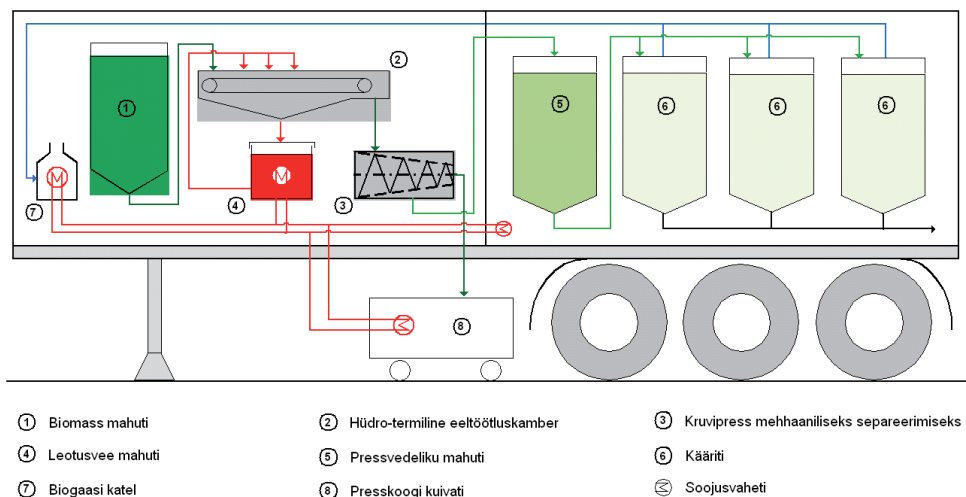
käärimisel kiiremini ja see on kõrgema biogaasisaagisega. Biogaasist saadavat soojusenergiat kasutatakse seadmes endas presskoogi kuivatamiseks, leotusvee soojendamiseks ja käärimisprotsessiks vajaliku temperatuuri hoidmiseks. Biogaasi tootmise kõrvalsaadusena tekkivat käärimisjääki oleks võimalik kasutada väetisena.

Käesoleva artikli eesmärgiks on anda ülevaade projekti PROGRASS esialgsetest uurimistulemustest.



## Materjal ja meetodika

Rohtse biomassi kvaliteedi uuringuteks valiti tüüpilised poollooduslikud rohumaad Eestis, Saksamaal ja Walesis (kuus rohumaad riigi kohta). Eri-nevadelt aladelt pärinev rohune biomass koguti, purustati ja konserveeriti kolmes korduses 2009. aasta suvel õhukindlates tünnides. Biomassi eeltötlus viidi läbi spetsiaalselt konstrueeritud mobiilse bioenergia seadmega (joonis 2) 2010. aastal.



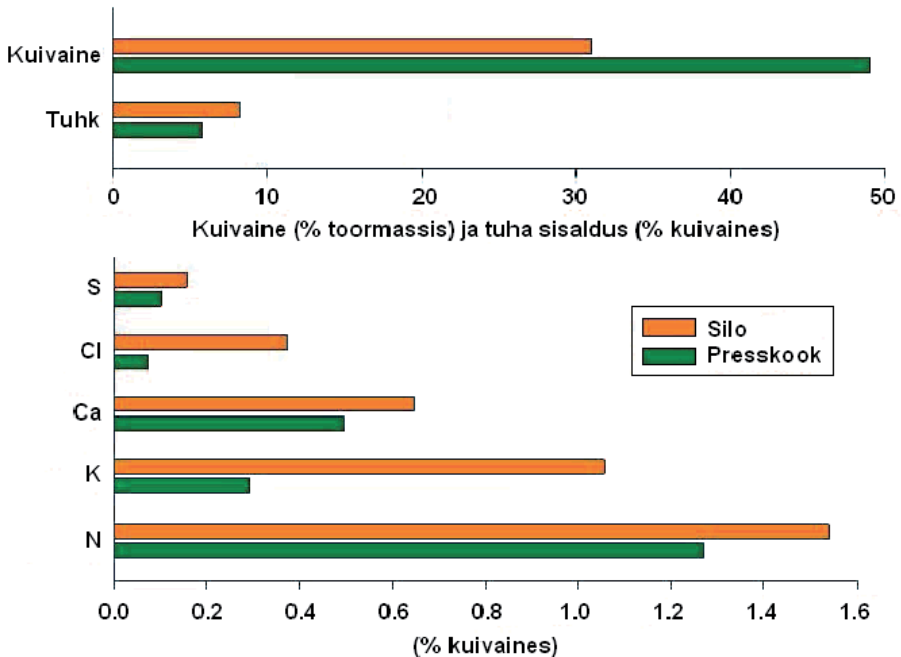
Joonis 2. Mobiilne bioenergia seade  
Figure 2. Mobile bioenergy plant.

Eeltötluse käigus kasteti silo 25 °C veega (silo ja vee suhe 1 : 8) 30 min jooksul ja separeeriti tigupressiga tahkeks ja vedelaks osaks. Kasse-li Ülikooli laboris määrati nii silo kui ka presskoogi paljude keemiliste elementide (C, H, N, S, K, Mg, Ca, Cl) ja tuha sisaldus kuivaine (KA) ühiku kohta. Tuha sulamise temperatuur arutati K, Ca ja Mg sisalduste põhjal Hartmanni (2009) järgi. Silo ja presskoogi ülemine kütteväärtus arutati C, H ja N sisalduste põhjal, kasutades empiirilist valemit (Friedl jt 2005), mis on spetsiaalselt biokütuste jaoks välja töötatud. Pressvedelikust määrati biogaasi produktsioon kolmes korduses vastavalt standardile VDI 4630 (2004) ning Richteri jt (2009) kirjeldusele.

## Tulemused ja arutelu

Presskoogis on siloga võrreldes põleva orgaanilise aine osakaal suurem ja tuha sisaldus väiksem, mistõttu selle kütteväärtus tõuseb rohkem kui  $1 \text{ MJ kg}^{-1}$  KA kohta.

Eeltöötlus vähendab samuti mitmete keemiliste elementide sisaldust presskoogis. Kõige olulisemalt väheneb K ja Cl kontsentratsioon, vastavalt 80% ja 70%. Nende elementide sisaldused presskoogis jäävad



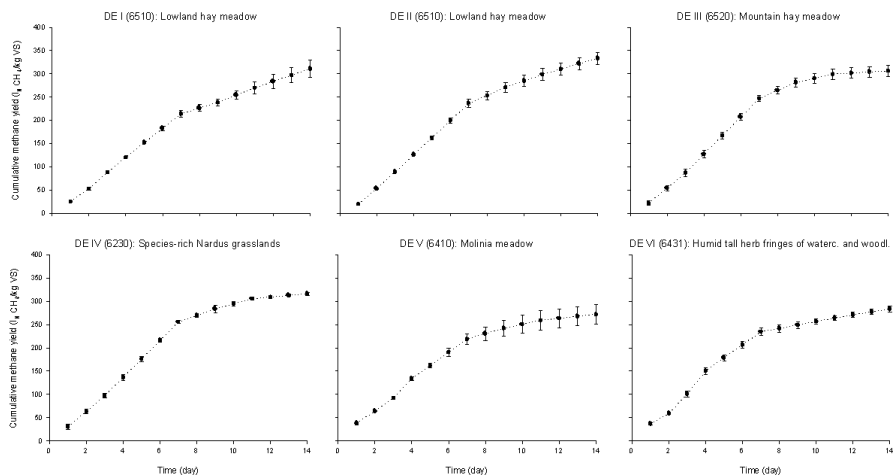
Joonis 3. Poollooduslike rohumaade rohtse biomassi omadused enne ja pärast eeltöötlust

Figure 3. Quality of herbaceous biomass from semi-natural meadows before and after pretreatment.

põletamiseks soovituslikesse piiridesse, mis on Obernbergeri jt (2006) järgi  $< 1 \text{ g Cl kg}^{-1}$  KA ja  $< 70 \text{ g K kg}^{-1}$  tuhas. Peamiselt tänu K efektiivsele eemaldamisele presskoogist tõuseb selle tuhasulamistemperatuur

võrreldes silo omaga (vastavalt 1186 °C ja 1085 °C). Mõnevõrra väheneb ka S ja N sisaldus, kusjuures S kontsentratsioon on peale eeltötlust madalam kui soovituslik piirmäär (< 1 g kg<sup>-1</sup> KA) (Obernberger jt 2006). Lämmastiku osakaal jäi katses ka peale eeltötlust soovitatust kõrgemaks (< 6 g kg<sup>-1</sup> KA).

Bioloogilise metaanipotentsiaali uuringutes kasutati Saksamaa poollooduslike rohumaade biomassist saadud pressvedelikku. Pressvedelikust, mis on kogutud madaliku- ja mäginiiudelt (Natura koodid vastavalt 6510 ja 6520), ning samuti liigirikka jussheinarahke (Nardus spp.) rohumaad (kood 6230) biomassist, saadi rohkem kui 300 l CH<sub>4</sub> kg<sup>-1</sup> VS (*volatile solid* 'orgaaniline kuivaine') (joonis 4). Sinihelmika (Molinia spp.) niidult (kood 6410) ja märjalt serva-kõrgrohustult (kood 6431) pärit pressvedeliku potentsiaalne metaanisaagikus oli vähem kui 300 l CH<sub>4</sub> kg<sup>-1</sup> VS. Eri-nevused võisid olla tingitud rohumaade taimede teistsugusest liigilisest koosseisust.



Joonis 4. Metaani saagis Saksamaa kuuel poolloodusliku rohumaad biomassist pressvedelikust  
 Figure 4. Methane yields of press fluids derived from six semi-natural grasslands in Germany (DE).

## **Kokkuvõte**

Poollooduslike rohumaade biomassi eeltöötlemine vähendab oluliselt põletamiseks mittedobilike toitainete sisaldust presskoogis, kuna neid on võimalik pressvedelikuga eemaldada. Sellega paranevad presskoogi põlemisomadused ja tõuseb pressvedeliku biogaasisaagis.

Senised uuringud näitavad, et poollooduslikel rohumaadel on seni kasutamata energeetiline potentsiaal. Selle rohtse biomassi efektiivsemaks kasutamiseks energiatootmises on välja töötatud tehnoloogia, mis vajab täiendamist ja rakendamist. Tulevikus on tehnoloogia rakendamisega võimalik ühildada nii energiatootmine kui ka looduskaitse.

## **Tänuavaldused**

Käesoleva projekti rahastamist toetab Euroopa Komisjon (raamprogramm LIFE+). Eestipoolseid uuringuid on kaasfinantseeritud EMÜ baasfinantseerimise ja HTM sihtfinantseerimise nr SF0170052s08 abil.

## **Kasutatud kirjandus**

Eesti keskkonnategevuskava aastateks 2007-2013. [[http://www.envir.ee/orb.aw/class=file/action=preview/id=1131705/Keskkonnategevuskava\\_2007-2013\\_uuendatud.pdf](http://www.envir.ee/orb.aw/class=file/action=preview/id=1131705/Keskkonnategevuskava_2007-2013_uuendatud.pdf)] 23.09.2011

Eesti statistika aastaraamat. Tallinn: Statistikaamet, 2010.

[[http://www.stat.ee/publication-download-pdf?publication\\_id=19991](http://www.stat.ee/publication-download-pdf?publication_id=19991)] 23.09.2011

Friedl, A., Padouvas, E., Rotter, H., Varmuza, K., Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition. - *Analytica Chimica Acta* 544, 2005, lk 191-198.

Hartmann, H., Brennstoffzusammensetzung und -eigenschaften (Composition and characteristics of fuels). - Kaltschmitt, M., Hartmann, H. and Hofbauer, H. (eds), *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Berlin: Springer-Verlag, 2009, lk 333-374.

Kukk, T., Sammul, M., Loodusdirektiivi poollooduslikud kooslused ja nende pindala Eestis. - Eesti Loodusuurijate Seltsi aastaraamat, kd 84, 2006, lk 114 -155.

- Looduslike elupaikade ning loodusliku taime- ja loomastiku kaitse kohta. - Euroopa Nõukogu direktiiv 92/43/EMÜ. EÜT L 206.
- Obernberger, I., Brunner, T., Bärthaler, G., Chemical properties of solid biofuels – significance and impact. - Biomass and Bioenergy 30, 2006, lk 973-982.
- Poolloodusliku koosluse hooldamise toetuse saamise nõuded, toetuse taotlemise ja taotluse menetlemise täpsem kord aastateks 2007–2013. Vastu võetud põllumajandusministri 08.03.2010 määrusega nr 19. - RT I, 21.04.2011, 5.
- Richter, F., Graß, R., Fricke, T., Zerr, W., Wachendorf, M., Utilization of semi natural grassland through integrated generation of solid fuel and biogas from biomass. II. Effects of hydrothermal conditioning and mechanical dehydration on anaerobic digestion of press fluids. - Grass and Forage Science 64, 2009, lk 354-363.
- VDI 4630. Vergärung organischer Stoffe (Fermentation of organic materials). - Verein Deutscher Ingenieure. Düsseldorf, Germany, 2004.
- Wachendorf, M., Richter, F., Fricke, T., Graß, R., Neff, R., Utilization of semi-natural grassland through integrated generation of solid fuel and biogas from biomass. I. Effects of hydrothermal conditioning and mechanical dehydration on mass flows of organic and mineral plant compounds, and nutrient balances. - Grass and Forage Science 64, 2009, lk 132-143.

## **PROGRASS - SECURING THE CONSERVATION OF SEMI-NATURAL GRASSLAND WITH A DISTRIBUTED ENERGY PRODUCTION**

Indrek Melts<sup>1</sup>, Katrin Heinsoo<sup>1</sup>, Lutz Bühle<sup>2</sup>, Michael Wachendorf<sup>2</sup>, Ian Donnison<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Estonian University of Life Sciences

<sup>2</sup>University of Kassel

<sup>3</sup>University of Aberystwyth

Large areas in European countries are covered by extensive and increasingly abandoned grasslands due to the withdrawal of livestock grazing. Due to the rich diversity in both flora and fauna, many of these grasslands are listed among the habitats within the NATURA 2000 ecological framework. Regular and late harvesting are typical management options, but often not cost-effective due to low nutritional value of the biomass and absence of substrate-adapted conversion techniques to produce energy from the highly lignified biomass. This biomass has low degradability in conventional biogas plants and of high mineral and nitrogen concentrations in combustion systems.

An innovative technical approach (IFBB – integrated generation of solid fuel and biogas from biomass) has been developed to produce solid fuel with improved combustion characteristics through hydrothermal conditioning and mechanical dehydration of the biomass, whereas the remaining liquid is a suitable substrate for biogas production. The PROGRASS project is aimed at the demonstration and investigation of a technical approach to produce bioenergy from semi-natural grasslands in Germany, Wales and Estonia. In addition, ecological, economic and social consequences of the adoption of such energy production in extensive grasslands is also considered.

The basic principle of the technology is the separation of silage in a liquid fraction for biogas production and a solid fuel to be used for combustion. The silage is treated on a band-conveyor over a defined retention time, under constant percolation with the circulating mash water at about 25-40 °C. Afterwards the biomass is separated into a press cake and a press

fluid by a screw press. Digestion of the press fluid takes place in three semi-continuous fermenters. The biogas is used by a burner to produce heat for the water mashing process, the digestion and drying of the press cake.

The aim of the present study is to investigate quality changes of herbaceous biomass from 18 European semi-natural grasslands according to the procedure of the integrated generation of solid fuel and biogas from biomass (IFBB). The paper also shows first results of methane yields from the derived press fluids.

Combustion characteristics of biomass from semi-natural grasslands could be significantly improved by water mashing and subsequent mechanical dehydration and resulted in high transfer rates into the press liquid particularly in terms K and Cl, leading to improved combustion characteristics in view of corrosion and ash melting behaviour. Nitrogen and sulphur content also decreased leading to less potential of emissions. Furthermore, mechanical dehydration led to increased dry matter content in the fuel improving overall efficiency of thermal use. Methane yields from press fluid digestion showed that the liquid fraction is a suitable substrate for biogas production due to its high anaerobic digestibility.

# TSELLULOOSIRIKASTE MATERJALIDE JA JÄÄTMETE VÄÄRINDAMINE BIOKÜTUSTEKS EESTI MAAÜLIKOOI TEHNIKAINSTITUUDI BIOKÜTUSTE LABORIS

Andres Menind<sup>1</sup>, Liis Oper<sup>2</sup>  
Eesti Maaülikool

<sup>1</sup>tehnikainstituut, <sup>2</sup>majandus- ja sotsiaalinstituut, Kreutzwaldi 1, Tartu

## **Annotatsioon**

Eesti Maaülikooli biokütuste labor otsib lahendusi tselluloosirikaste materjalide ja jäätmete parimaks kasutamiseks, reostuskoormuse vähendamiseks ja optimaalsete tehnoloogiate ja kasutusvalade leidmiseks. Artikkel põhineb Eesti Maaülikooli biokütuste laboris läbiviidud katsete andmetel. Käsitletud on materjalide eeltöötlemist, biogaasistamist ja briketeerimist ning samuti on välja toodud mõningate brikettide tootmise kulukomponendid. Silode puhul on käsitletud fraktsioneeritud osiste kääritamise kiiruse erinevusi ja keemilise kompositsiooni muutuste mõju brikettide kvaliteedile. Artiklis antakse ülevaade biokütuste laboris teostatud ning laboriga seotud uuringutest.

*Märksõnad:*

## **Sissejuhatus**

Looduskaitsealade majandamisel ning põllumajanduses ja tööstuses tekkiva tselluloosirikka materjali ja jäätmete käitlemine on ühelt poolt oluline keskkonnareostuse vähendamise aspektist lähtuvalt, teiselt poolt võimaldab käitlemine ressursina kasutusele võtta seni vähest otstarvet leidnud biomassi.

Eesti Maaülikooli tehnikainstituuti rajatud biokütuste labor võimaldab uurida, arendada, välja töötada ning katsetada tselluloosirikka materjali ja jäätmete eel- ja lõpptöötlemise ning uute materjalide või kütustena kasutamise optimaalsemaid viise. Eeltöötlemise viis ja ulatus mõjutavad otseselt nii kääritamise kui ka fermenteerimise protsessi ja sellega ka substraatide energeetilise potentsiaali ärakasutamist. Samuti mõjutab eeltöötlemine oluliselt briketi omadusi ja võimaldab kõrvaldada problee-



me, mis esinevad sarnase materjali tavapõletamisel. Tehnoloogiate rakendamise ja arendamise eesmärk on olnud samuti uurida eeltöötlemise ja töötlemise käigus kulutatud energiamahukust ja saasteainete vähenemist. Uurimise all on olnud järgnevad materjalid: põhk, hein, silo, looduskaitse majandamise käigus kogutud materjalid, ettevõtte Estonian Cell jäätmed ja jääkmaterjalid, muud jäätmed ja materjalid lignotselluloosete sideainetega, paberihundi hake, hobuste allapanu (sõnnik), saepuru, puukoor, pilliroog, päideroog jt. Lignotselluloosseid materjale ja jäätmeid saab kasutada ka teiste materjalide sideainena briketeerimisel (Križan et al, 2011).

Uuring vastab keskkonnaministri määruse nr 13 (2006) § 7 lg1, 2 p 4 eesmärgile töötada välja ja juurutada integreeritud tehnilised meetmed vähendamaks saasteainete sattumist õhku, vette ja pinnasesse ja § 7 lõige 7 punkt 3 eesmärgile toetada säästlikku energiakasutust läbi erinevate tehniliste lahenduste.

## **1. Biokütuste laboris teostatud uuringud**

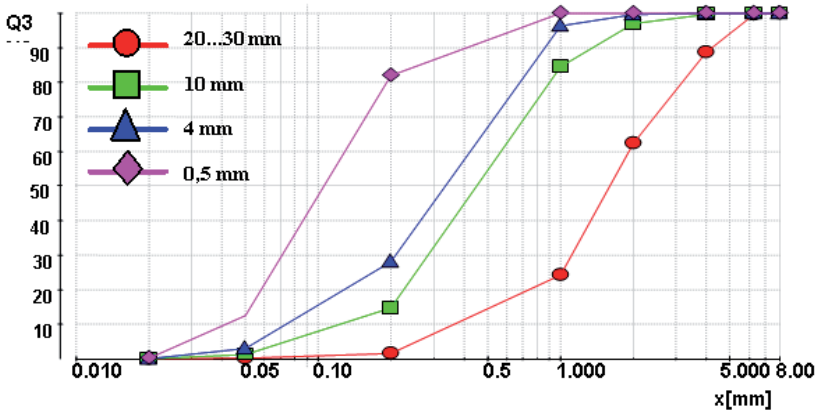
### **1.1. Rohtsest biomassist biogaasi tootmine**

Rohtse biomassi biogaasistamise katsetes kasutati kuue erineva liigilise koostise ja kasvufaasiga heina. Nende hulka kuulusid ka proovid looduskaitse majandamise all olevatelt maadelt. Uuriti peenestusastmest (materjali välieripindalast) ja keemilisest koostisest (ligniini) (Tabel 1) tulenevaid seoseid ja biogaasi potentsiaali (Menind, Normak 2010). Katsete läbiviimiseks kasutati purustit Retsch SM 100 ning fraktsioonide uurimiseks sõelumistorni Sieve shaker AS200 (Retsch GmbH, Germany) ja EasySieve tarkvara. Materjalidele määrati keemilised analüüsid ja teostati biogaasistamise katsed.

Katsematerjalide kiu ja ligniini sisalduse põhjal valiti välja neli materjali - kaks kõrgema ja kaks madalama ligniini sisaldusega proovi. Katsematerjalid purustati nelja erineva peenestusastmega: 20-30 mm, mis purustati käsitsi, 10 mm, 4mm, 0,5 mm sõelaavadega, kasutades purustit Retsch GmbH.

Table 1. Biogasification test substance characteristics

| Materjal   | Toorproteiin, % | Tselluloos, % | Ligniin, % | Hemi-tselluloos, % | NDF, % | ADF, % | DDM, % |
|------------|-----------------|---------------|------------|--------------------|--------|--------|--------|
| Agro       | 11.18           | 30.10         | 4.08       | 23.37              | 57.55  | 34.18  | 62.27  |
| Leilovi    | 10.04           | 33.37         | 7.14       | 34.90              | 75.41  | 40.51  | 57.34  |
| Märja      | 9.10            | 36.12         | 7.35       | 25.82              | 69.29  | 43.47  | 55.04  |
| Agro Timut | 9.63            | 38.06         | 4.90       | 29.59              | 72.55  | 42.96  | 55.43  |
| Polder     | 11.10           | 38.57         | 5.10       | 33.67              | 77.65  | 43.98  | 54.64  |
| Puurmani   | 7.76            | 35.10         | 8.78       | 22.35              | 66.22  | 43.88  | 54.72  |

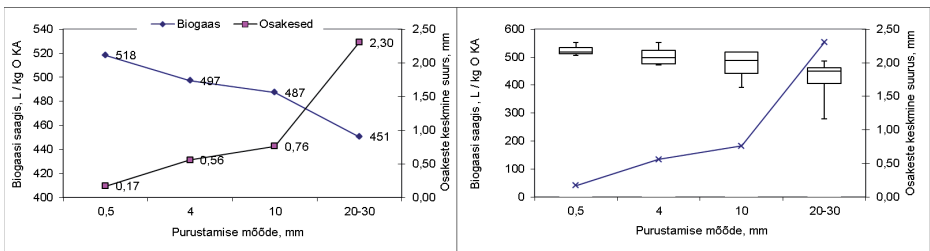


Joonis 1. Katsematerjali sõelumise analüüs, %  
Figure 1. Analysis of test material sieving, %

Materjalide tegelikku peensusastet iseloomustab joonis 1, millelt on loetav materjalide tegelik jaotumine fraktsioonidesse, sõltudes peenestusastmest. Easy Sieve programmi kasutamine võimaldab määrata materjalide erivälipindala, mis on olulisemaid kriteeriume, millest sõltub mikroorganismide elutegevuse aktiivsus ja biogaasi saagis. Joonisel 1 väljendab Q3 protsentuaalselt katsematerjalide peenestusastmest sõltuvalt x-teljel esitatud sõelaava suuruse läbimist. Näiteks 0,5-millimeetrise sõelaga peenestatud katsematerjal läbis ligikaudu 80 % ulatuses 0,2-millimeetrise sõelaava.

Valitud kaks kõrgema ja kaks madalama ligniini sisaldusega proovi (niimetused) olid nii ligniini sisaldusest kui ka peenestusastme määrast tuleneva biogaasi potentsiaali uurimise aluseks. Biogaasi tootmise katse pikkus oli 40 päeva, seega on tulemus 40 päeva biogaasi saagikus. Heina purustusastme ja biogaasi tootluse analüüsist on eemaldatud üks äärmuslik tulemus.

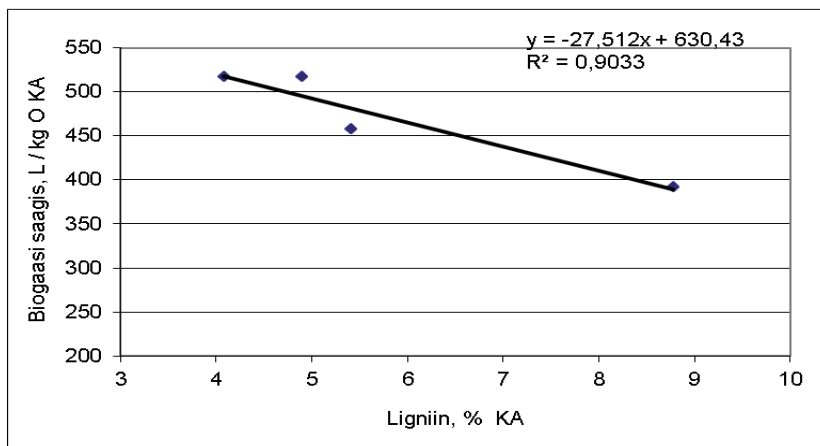
Katsete tulemuste põhjal võib öelda, et mida madalam on materjali ligniinisaldus ja suurem materjali peenestusaste, seda suurem on materjali biogaasi saagikus. Peenestusastme positiivset mõju biogaasi saagikuse suurenemisele materjalide samadel tingimustel kääritamisel iseloomustab joonis 2.



Joonis 2. Biogaasi saagis sõltuvalt materjali peenestusastmest, L / kg O KA  
Figure 2. Biogas yield depending on degree of material dispersion, L / kg O DM

Materjalide väiksema peensusastmega purustamine on küll energiamahukam, ometi on peenestusprotsess tasuv, arvestades suuremat biogaasi enamsaagist. Purustamise protsess tekitab lisaks materjalide mõõtmete vähenemisele lisapoorsust, tselluloosi kristalse struktuuri lõhkumist ning paremat ensüümset hüdrolyüsi.

Lisaks materjali peenestusastme positiivsele mõjule biogaasistamisel sõltub biogaasi saagis samuti materjali ligniinisaldusest, vähenedes oluliselt materjali ligniinisalduse kasvades (joonis 3).



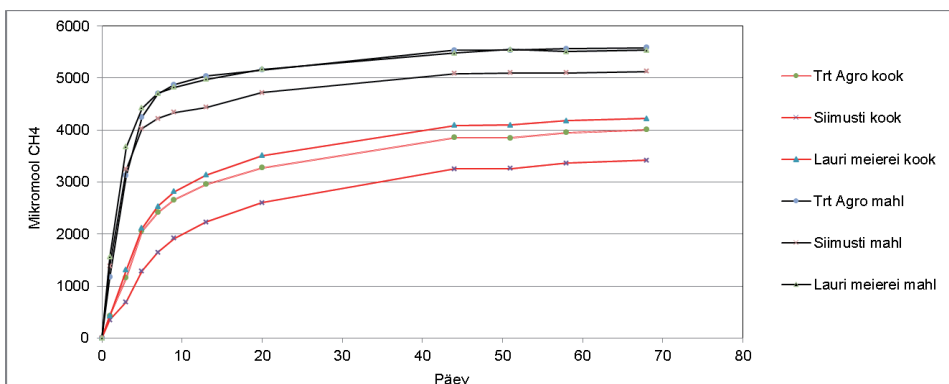
Joonis 3. Biogaasi saagis sõltuvalt katsematerjali ligniinisaldusest, L / kg O KA  
 Figure 3. Biogas yield depending on test substance lignin content, L / kg O DM

Rohtse biomassi ligniini sisaldus sõltub taimede kasvufaasist, suurenedes taime vanusega. Sõltuvalt biomassi ligniini sisaldusest tuleks valida biomassi sobivaim töötlemise viis. Ligniini on küll inhibeeriva toimega biomassi biogaasistamise seisukohalt, kuid materjalide briketeerimisel on just ligniini peamiseks sidusaineks.

## 1.2. Silode separeerimine

Teise rühma moodustavad katsed, mis on seotud erinevate silode separeerimisega. Lisaks sellele uuriti silode erinevate fraktsioonide biogaasistamise kiirust ja potentsiaali (joonis 4). Katses kasutati nii looduskaitsealadelt hilise niite silosid kui ka kõrge kvaliteediga loomasööda eesmärgil toodetud silosid. Silodele ja separeeritud fraktsioonidele viidi läbi keemilise kompositsiooni analüüs ja uuriti keemiliste elementide Ca, P, Mg ja K jagunemist erinevate fraktsioonide vahel. Tulenevalt keemilise kompositsiooni muutusest silokoogis väheneb pärast separeerimist biomassist valmistatud brikettide tuhasus. Tuha sulamise muutused leiavad aset tunduvalt kõrgematel temperatuuridel ja seega lähenevad selliste brikettide optimaalsed põletamise temperatuurid puidupõhiste kütuste näitajatele. Proovide ettevalmistamiseks kasutati purustit RS06. Materjalide fraktsioneerimine viidi läbi veetustamise pressiga Vicent CP4. Biogaasistamise

protsessi kiiruse ja potentsiaali väljaselgitamiseks kääritati kõiki fraktsioone ja samuti silo. Kuivatatud presskooki briketeeriti ning viidi läbi tuha sulamise karakteristikute analüüs. Mõõtekilpidega uuriti energiakulu kõigis töötlemise mehhaanilistes etappides (purustamine, separeerimine, briketeerimine). Briketeerimine teostati pressiga Weima C 150. Erinevate fraktsioonide (presskook, silomahl) käitumist biogaasistamisel iseloomustab joonis 4.



Joonis 4. Silomahla ja -kooki metaani toodangu kiirus ja potentsiaal,  $\mu\text{mol}$   
 Figure 4. Methane production speed and potential of silage juice and cake,  $\mu\text{mol}$

Silomahla kääritamise kiirus on silokoogiga võrreldes oluliselt kõrgem. Separeerimise tehnoloogiat rakendades on võimalik vähendada biogaasi reaktorite mahtu ja protsessi kiiruse arvelt silomahla reaktoris viibimise aega. Separeeritud silo erinevate fraktsioonide biogaasistamise ja briketeerimise energiabilans ning majanduslik tasuvus vajavad võrdlemist tavalise briketeerimise ja biogaasistamise vastavate näitajatega. Silo separeerimise positiivseks lisaväärtuseks, võrreldes rohtse biomassi otsebriketeerimisega, antakse kääritusjäädiga oluline osa lämmastikku, fosforit, kaaliumi ja muid elemente tagasi põllule. Silokoogi kuivatamine on tehnoloogiliselt keeruline, energiamahukas ning lisab kulusid.

### 1.3. Rohtsest biomassist brikettide tootmine

Kolmanda rühma moodustavad uuringud rohtsest biomassist toodetud brikettide kvaliteedi standarditele vastavuse (kütteväärtus, tihedus, tuhasus, puistetihedus, niiskus, transpordi püsivus, mehaaniline tugevus, suurus ja konfiguratsioon) kohta. Samuti selgitati briketeerimise protsessi energiakulu, mis on mõõdetud biokütuste laboris mõõtekilpidega, ning määrati briketeerimisega seotud kulukomponendid ning kalkuleeriti brikettide maksumus kuivaine tonni kohta 2010. aasta hinnatasemetel. (Meinind et al, 2011)

Briketeerimise uuringu läbiviimisel kasutati erinevaid katsematerjale: heina, päderoogu ja rukki- põhku. Katsematerjalid peenestati purustiga RS06, briketeeriti pressiga Weima C 150. Operatsioonide täpseks energiakulu mõõtmiseks kasutati mõõtekilpe.

Tabel 2. Briketi maksumus, €/KA t  
Table 2. Cost of the briquette, €/DM t

|  | Katsematerjal |              |               |              |               |
|--|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|
|  | Hein 1        | Hein 2       | Hein 3        | Rukis        | Päderoog      |
| Biomassi saagikus, t KA ha <sup>-1</sup>         | 2,8           | 5            | 3,1           | 4,6          | 8,6           |
| <b>Kasvatamise ja koristamise kulud, €/ KA t</b> | <b>21,32</b>  | <b>17,97</b> | <b>20,42</b>  | <b>12,04</b> | <b>29,35</b>  |
| <b>Transpordikulud, €/ KA t</b>                  | <b>1,1</b>    | <b>1,1</b>   | <b>1,1</b>    | <b>1,1</b>   | <b>1,1</b>    |
| Biomassi töötlemine:                             |               |              |               |              |               |
| peenestamine                                     | 31,11         | 30,95        | 31,39         | 31,84        | 30,75         |
| edastamine                                       | 1,88          | 1,88         | 1,88          | 1,88         | 1,88          |
| briketeerimine                                   | 31,53         | 31,13        | 31,37         | 30,56        | 31,54         |
| laadimine  | 20,06         | 20,06        | 20,06         | 20,06        | 20,06         |
| <b>Töötlemise kulud kokku, €/ KA t</b>           | <b>84,58</b>  | <b>84,02</b> | <b>84,69</b>  | <b>84,34</b> | <b>84,23</b>  |
| <b>Briketi maksumus, €/ KA t</b>                 | <b>106,99</b> | <b>103,1</b> | <b>106,21</b> | <b>97,48</b> | <b>114,68</b> |

Briketeerimise protsessi kulude analüüsis arvestati lisaks biomassi töötlemiskuludele ka biomassi tootmiskuludega (päideroog) ja koristamis- ning transpordikuludega (päideroog, heina proovid).

Rohtsest biomassist toodetud briketi omahinna kujunemisel moodustavad kulud toorainele ligikaudu viiendiku briketi maksumusest. Seejuures tuleb arvestada, et heinade ja rukkist saadava biomassi puhul on võetud arvesse vaid niitmise ja koristamise kulud. Biomassi töötlemise protsessidest olid kulukaimad tööoperatsioonid peenestamine ja briketeerimine.

#### 1.4. Bioetanooli tootmise katsed

Biogaasistamise protsessiks ettevalmistatud katsematerjalide (ptk 1.1.) proove kasutati samuti bioetanooli tootmise ja selle potentsiaali väljaselgitamise katsetes (Tutt, Olt 2010). Katsetes kasutati materjale Agro (PI), Agro Timut (PII), Polder (PIII) ja Puurmani (PIV) (Tabel 1). Suuremate katsepartiide katsetamiseks kasutati termokeemiliseks töötlemiseks autoklaavi ja katelt Electrolux Variomix 50L. Parimad tulemused saavutati proovist PII, mis oli kõrge tselluloosi- ja madala ligniinisisaldusega ning mille etanooli saagis oli 80,4 g/kg. Leiti ka etanooli kogused kg tselluloosi kohta, mille alusel osutus parimaks prooviks PI (Tabel 3).

*Tabel 3. Toodetud etanooli kogus kg tselluloosi kohta koos potentsiaalse saagisega (%)*

*Table 3. Amount of produced ethanol per kg of cellulose with potential yield (%)*

| <b>Tähis</b> | <b>Etanooli kogus (g/kg)</b> | <b>Saagis %</b> |
|--------------|------------------------------|-----------------|
| PI           | 224,40                       | 44,00           |
| PII          | 211,26                       | 41,42           |
| PIII         | 200,73                       | 39,36           |
| PIV          | 194,91                       | 38,22           |

Parimaid tulemusi annab seega materjal, millel on suurim tselluloosi ja väikseim ligniini ning hemitselluloosi sisaldus. Kasutades termokeemilist töötlemist, millele järgnes ensüümide toimetel hüdrolyüs, selgus, et proovi osakeste suuruse ja saadud etanoolikoguse vahel puudub otsene seos.

Rohtse biomassi katsematerjalide biogaasistamise ja bioetanoolistamise võrdlev energeetilise tulemi analüüs võimaldab otsustada töötlemisprotsesside energeetilise efektiivsuse üle. Lõplike otsuste langetamisel tuleb arvestada ka tehnoloogiliste protsesside juhtimise keerukust ning maksustust.

### **Kokkuvõte**

Biokütuste labori nelja peamise uurimissuuna katsed võimaldavad hinnata tselluloosirikkaid materjale ja jäätmeid kui biokütuse ressursi, selle ressursi tehnoloogilisi, keskkonna-alaseid ja majanduslikke aspekte. Senised uuringud on keskendunud materjalide kas briketeerimisele või biogaasistamisele, biokütuste laboris on uuritud katsematerjale, mille tulemusel on võimalik ühest materjalist saada erinevaid liike biokütuseid.

Looduskaitsealade majandamisel ning põllumajanduses ja tööstuses tekkinud tselluloosirikka materjali ja jäätmete energeetilise potentsiaali hindamine võimaldab selgitada nende materjalide biokütuse ressursina kasutusele võtu optimaalseid tehnoloogilisi viise ning erinevate töötlemisviiside majanduslikku mõttekust.

### **Tänuavaldused**

Uurimistööd toetab Keskkonnainvesteeringute keskus projekt nr 47 raames.

### **Kirjandus**

- Alaru, M.; Kukk, L.; Olt, J.; Menind, A.; Lauk, R.; Vollmer, E.; Astover, A. (2011). Lignin content and briquette quality of different fibre hemp plant types and energy sunflower. *Field Crop Research*, 124(3), 332 - 339.
- Križan, P.; Matúš, M.; Šooš, L.; Kers, J.; Peetsalu, P.; Kask, Ü.; Menind, A. (2011). Briquetting of municipal wastes by different technologies for quality and properties evaluation . *Agronomy Research*, 19, 115 - 123.



- Menind, A. Normak, A. (2010). Study of Grinding Biomass as Pre-treatment for Biogasification. *Agromomy Research*, 8, 155 - 164.
- Menind, A., Oper, L., Kers, J., Melts I. Preliminary investigation of technological, physical and economic parameters of herbaceous biomass briquettes. Artikkel avaldamisel kogumikus *Agronomy research*
- Tutt, M.; Olt, J. (2010). Rohtest biomaterjalist vedela biokütuse tootmisvõimaluste uurimine. In: *Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine: TEUK XII. (Toim.) Vollmer, E.; Normak, A.. Tartu, Eesti: Eesti Maaülikool, 2010, 106 - 114.*

**CONVERTING MATERIALS AND WASTES RICH IN CELLULOSE INTO BIOFUELS IN THE BIOFUELS LABORATORY OF ESTONIAN UNIVERSITY OF LIFE SCIENCES**

Andres Menind, Liis Oper  
Estonian University of Life Sciences

Biofuels Laboratory of Estonian University of Life Sciences (EULS) is investigating the possibilities of using materials and wastes rich in cellulose, reducing the pollutions and environmental risks and finding optimal technologies and spheres of usage. Current article is based on the data from the experiments conducted in the Biofuels Laboratory of EULS. Considered are pretreatment of the materials, biogasification, bioethanol production and briquetting; also the cost components of some briquettes are indicated. In the case of fractionated silages the speed of biogasification process and the potential of biogas are investigated. Influence of changes of chemical composition in silage press cake during fractionation and its impact to the quality of briquettes is reviewed. In article there are references of the detailed studies.

# TEHNIKAINSTITUUDI ÕPPE- JA TEADUSTÖÖLABOR

## KATLATEHNIKA SOOJUSTEHNILISTEKS

### KATSETUSTEKS

Maido Märss  
Eesti Maaülikool, Tehnikainstituut  
Kreutzwaldi 56, 51014, Tartu, e-post: maido.marss@emu.ee

#### **Annotatsioon**

Antud artikkel annab ülevaate Eesti Maaülikooli Tehnikainstituuti rajatavast katelseadmete laboratooriumi arendusprojektist. Artikli ilmumise ajal on labor loomisel ning seetõttu käsitletakse käesolevas ettekandes projektlahendusel põhinevat visiooni lõpptulemusest. Planeeritav labor võimaldab uurida katlatehnika soojustechnilisi protsesse ning lahendada erinevate kütuste kasutamiseiga seotud tehnoloogilisi probleeme, püüeldes soojusenergia säästlikuma kasutamise ning keskkonnasõbralikuma tootmise poole. Projekti eesmärk on tehnilise lahenduse kavandamine väikekatelde seadmetiku ja kütuste katsetusteks, protsessi juhtimiseks, visualiseerimiseks ning mõõtmistulemuste arhiveerimiseks.

*Märksõnad: soojustechnika, katelseade, kütus, õppetöö, mõõtmised*

#### **Sissejuhatus**

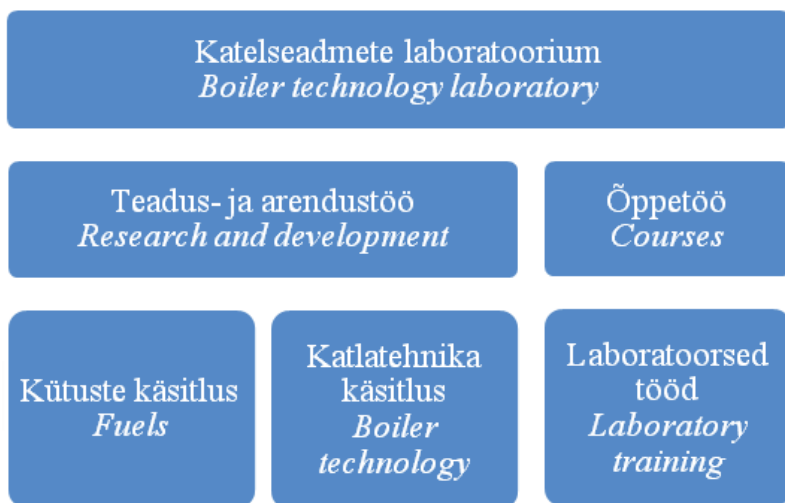
Fossiilsete kütuste varude ammendumine ning kasvav nõudlus puitkütuste järele sunnib soojuse tootmisel mõtlema energiasäästlikumate või alternatiivsete lahenduste kasutusvõtule nii erasektoris kui tööstusettevõtetes. Lisaks kütuse hinnale on oluline roll soojuse tootmisel kütuse kättesaadavusel ning kasutusmugavusel. See eeldab üldjuhul kohaliku tooraine ning vastavate tehnoloogiate olemasolu. Põletustechnika võib küttesüsteemi kasuteguri ning automatiseerituse arvelt tagada kallima kütuse kasutamisel suurema efektiivsuse soojuse tootmisel kui odavamale kütuse korral.

Lisaks halupuudele on teiste biokütuste kasutamise osatähtsus väikekateldes suurenenud tänu vastavate põletustechnoloogiate arengule, muutes selle automatiseerituse seisukohalt konkurentsivõimeliseks võrreldes fossiilsete kütustega. Katlatechnika ja kütuste põlemisprotsessi ning juhtimise sisuliste uurimistööde läbiviimiseks on 2010. aastal alguse saanud Eesti

Maaülikooli Tehnikainstituudi õppehoone rekonstrueerimisprojekti pla-  
neeritud ruum katelseadmete õpelaboratooriumile.

### **Laboratoorium**

Katelseadmete laboratoorium rajatakse Tehnikainstituudi õppehoone  
keldrikorrusele. Ligipääsu tagamiseks tehnika ning kütuste transportimi-  
seks on ruumini loodud hooneväline kaldtee. Labori põhilisteks tegevus-  
suundadeks on kütuste ning katlatehnikaga seotud teemade käsitlemine  
nii teadus- ja arendustöö kui ka õppetöö eesmärgil (joonis 1).



Joonis 1. Katelseadmete laboratooriumi tegevussuunad  
Figure 1. Boiler technology laboratory courses of action

Laboratooriumi ruumi on projekteeritud kaks sõltumatu kütteveetorus-  
tiku, õhuvarustuse ja suitsuärastusega katla katsestendi. Katsetegevuste  
läbiviimiseks ning selle käigus tekkiva soojusenergia ära kasutamiseks on  
labor seotud hoone soojussõlmega. Soojussõlm on varustatud automaati-  
kaga, mis vastavalt algoritmile kasutab hoone kütteks esmalt laboratoo-  
riumist ning seejärel kaugkütte trassist saadavat energiat. Küttekontuurid  
on omavahel eraldatud soojusvahetitega.

## Stendid

Katelde ja kütuste soojustechnilisel katsetamisel tekkiv soojusenergia seab piirid stendide soojusvõimsustele. Hoone arvutusliku küttevõimsuse ning ruumi gabariitide alusel on stendide soojusväljastuse võimsusteks dimensioneeritud 100 ja 200 kW. Mõlemal stendil on vastavalt võimsustele väljavõtted küttesüsteemiga, suitsukäiguga ning mõõtetehnikaga ühendusteks. Põlemisõhu tagamiseks on välisseinas õhuvõturedid. Uuritava katla komplekti kuuluva seadmestiku tarbeks on elektrivarustuse väljavõtted. Soojusseadme katsetamisel ei pea mõõtmistulemuste väljastamiseks olema kõik süsteemi osad ühendatud. Näiteks soojuspumpade ning enami-ke elekterkuumutusseadmete katsetamisel pole vaja kasutada suitsugaasi käiku ning ahjude testimisel kütteveesüsteemi.

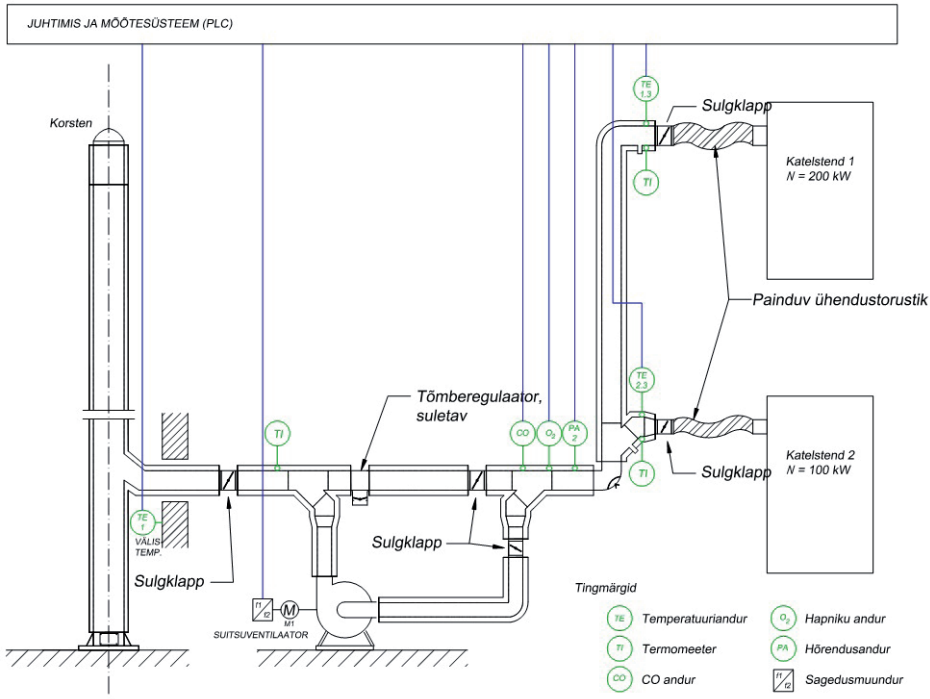
Labori kütteveesüsteemi saab otstarbe ja töötamise eesmärgi alusel jagada kaheks iseseisvaks osaks, mis on omavahel seotud soojaakumulatsioonipaagiga:

1. Kütmise osa, mis koosneb katla ühendustorustikust, segamissõlmest, klappidest, ventiilidest ja akumulatsioonipaaki ning katla segamissõlme ühendavast torustikust;
2. Tarbimise osa, mis koosneb kütetorustikust, küttesüsteemi ringlussõlmest, soojusvahetist ning selle tööd reguleerivatest klappidest ja ventiilidest.

Gaasikäik on projekteeritud kahe süsteemne. Esimesel juhul toimub hõrenduse tekitamine koldes korstna loomuliku tõmbe teel. Teisel juhul saab lisaks korstna omatõmbele kasutada kolde hõrenduse tekitamiseks ning reguleerimiseks sagedusjuhtimisega suitsuventilaatorit. Suitsukäigu põhimõtteskeem on esitatud joonisel 2.

## Juhtimis- ja mõõtesüsteem

Katelseadmete laboratooriumi tehnoloogiliste seadmete mõõtetulemused ja signaalid kogutakse kokku ühtsesse juhtimis- ja mõõtesüsteemi, mis on lahendatud eraldi jaotuskeskuses programmeeritava kontrolleri baasil. Juhtimissüsteem reguleerib segamissõlmede, pumpade, ventilaatorite



Joonis 2. Laboratooriumi suitsukäigu põhimõtteskeem  
 Figure 2. Principal scheme of gasduct in laboratory

ning kütuseetteande tööd. Mõõtesüsteemiga seotakse vajalikud mõõtepunktid, nagu näiteks:

- soojuskandja temperatuurid torustiku eri lõikudes;
- kütteveesüsteemi rõhk;
- stendide soojusvõimsused;
- hoone tarbimise soojusvõimsus;
- stendide suitsugaaside temperatuurid;
- suitsugaasi koostisosade sisaldus;
- suitsugaasi trakti hõrendus;
- kolde temperatuur;
- kütusekulu;
- välistemperatuur.

Kogu protsessi on võimalik jälgida ning seadistada jaotuskeskuse kattel paiknevalt puutetundlikult ekraanilt. Lisaks ekraanile edastab kontrollid andmeid labori keskarvutis olevasse SCADA-serverisse, kus toimub andmete arhiveerimine. Mõõdetulemuste töötlemine võimaldab põletusseadmete töörežiimi seadistamist ning režiimigraafikute väljatöötamist.

### **Kokkuvõte**

Planeeritud laboratoorium võimaldab läbi viia küttekatelde soojustehnilisi katsetusi ning koostada nende soojusbilansse. Soojusbilansi alusel saab määrata katla kasuteguri ja soojuskaod. Lisaks katla katsetustele on võimalik määrata erinevate kütuste põlemisomadusi, põletamismooduseid ning uurida nende energeetilisi näitajaid. Suitsukäigus on võimalik katsetada abiseadmeid, mis on seotud suitsugaaside puhastuse ning jääsoojuse kasutusega.

## **RESEARCH AND DEVELOPMENT LABORATORY FOR BOILER TECHNOLOGY THERMO-TECHNICAL TESTING IN INSTITUTE OF TECHNOLOGY**

Maido Märss  
Estonian University of Life Sciences

The aim of this article is to give an overview of the project Boiler technology laboratory installation in Institute of Technology. The purpose of the project is to provide a technical solution for testing different types of boilers and fuels. The main topics are: water circulation, air and gas duct and electrical installation design. The activities in the laboratory can be divided into two main areas: fuels and boiler technology. The main objective of the laboratory is development of thermal engineering research in Institute of Technology.

# INNOVATIIVSED LAHENDUSED HOONE ELEKTRISÜSTEEMIS: STRUKTUURI MODELLEERIMINE, LAHENDUSE REALISEERIMISE MAJANDUSLIKUD JA TEHNILISED ASPEKTID. LÕPLIKU VARIANDI VALIKU ALGORITM

Valeri Saikovski  
Tallinna Tehnikaülikool  
valeri.saikovski@elwo.ee

## **Annotatsioon**

Antud töö keskendub hoone elektrisüsteemile (ES) ja küttele, veevarustusele, ventilatsioonile, kanalisatsioonile (KVVK), mis suuresti elektritarbimist mõjutavad. Kulude arvestuses, tehnilise osa muudatustes ja majandusaspektide analüüsis kasutatakse termineid, mis on vastavuses ehitustegevuse, elektrotehniliste standardite ja riigihanke dokumentide traditsioonidega. Kirjeldatud põhimõtte võimaldab kasutada ehituseelarveid ja uuringutulemuste rakendamine on mugav. Artikli autor uurib Tallinnas Punane 73 asuvat büroo- ja logistikakompleksi, mille ehitamisel autor projektijuhiks oli. Käesoleval ajal tegeleb autor nimetatud hoone käidukorraldamise ja hooldus-remonditöödega.

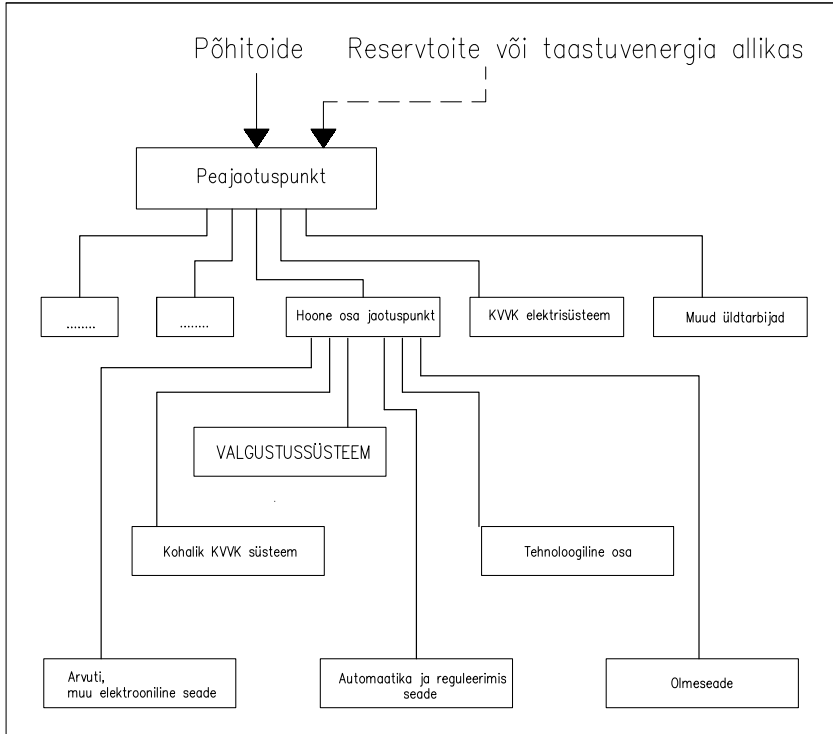
*Märksõnad: hoone elektrisüsteem, tehnilised ja majanduslikud aspektid, taastuvenergia, analüüs.*

## **Sissejuhatus**

Praegusel ajal hinnatakse innovatiivseid lahendusi, sealhulgas taastuvenergia kasutamist, tihti ainult elektritarbimise vähenemise järgi. Antud artiklis on esitatud versioon, kuidas kasutada hindamisel kõiki hoone elektrisüsteemiga seotud faktoreid: tehnilised muudatused, majanduslikud aspektid, hoolduskulud.

## **Hoone elektrisüsteemi üldstruktuuri mudel**

Elektrisüsteemi (ES) struktuuri mudel peab vastama reaalsele füüsilistele protsessidele. Ühtlasi peab see mudel võimaldama kirjeldada uue hoone ehituse või vana hoone renoveerimise kulusid. Need eesmärgid



Joonis 1. Hoone elektrisüsteemi struktuurimudel  
 Figure 1. Building ES structure model

kajastuvad joonisel 1. Reservtoite ja taastuenergia allikas on koondatud ühte plokki, sest nende ühendusskeem ja kasutamine on analoogsed. Reservtoite koosseisu kuuluvad generaator, UPS-süsteemid ja akud. Reservtoite hulka ei kuulu põhitoite reserv, kui tarbija kasutab ringtoidet, teise alajaama fidrit või sama alajaama teist fidrit. Hoone osade ES on tähtis eraldi määratleda, sest kui uuendusi viiakse läbi ainult hoone ühes osas, tekkib erinevus hoone eri osade vahel.

Käesoleva artikli uuringuobjekti eripära seisneb selles, et büroohoone on eraldi ehitis, kuid sellel on laokompleksiga ühine elektripaigaldis. Peajaotuspunktis on võimalik büroohoone elektritarbimist eraldi kontrollida. See on minu uuringu jaoks iseseisev objekt. Eraldi ehitis on ka laokomp-



leks, kuid seal on kolm sarnast ladu (nr 3, 4, 5) ning laod 1 ja 2 koos abiruumidega. Need muudan ka kaheks hoone eri osadeks.

Muude üldtarbijate hulka kuuluvad parkla ja trepikodade valgustus. Ülejäänud valgustuse tarbivad hoone osade kasutajad. Tänavavalgustuse eraldamine on seotud sellega, et mõnede hoonete ES ei sisalda tänavavalgustust (kõrvalterritoorium koos valgustusega kuulub omavalitsusele). Trepikojade valgustus töötab erirežiimil ja see on võimaliku innovatsiooni eraldi etapp. Arvutid ja muud elektroonilised seadmed (nt signalisatsioon) moodustavad eraldi osa, sest tehniliselt on nende jaoks tihti eraldi kilp või kilbi osa ja elektrienergia kvaliteedile ja võimaliku lühise vältimisele kehtivad ranged nõudmised. Omaette gruppi kuuluvad ka olmeseadmed (kodumasinad, kohtväljatõmme), sest need on eluhoones põhilised elektritarbijad.

Hoone elektrisüsteemis muutuvad järjest tähtsamaks automaatika ja reguleerimisseade, mis on keerulised valgustuse ja küttesüsteemi lokaalse reguleerimise võimalused (integreeritud süsteem „tark maja“). Lisaks tehnilistele aspektidele on need süsteemid suhteliselt kallid. Käesoleva artikli uurimisobjekt kirjeldatud süsteeme ei sisalda. Nende mõju elektritarbimisele tulevikus on aga suur ja kirjeldatud universaalses struktuuris on seda arvestatud.

### **Hoone elektrisüsteemi maksumus. Adapteerimine innovatiivse tegevuse eesmärgiks**

Hoone elektrisüsteemi uurides tuleb analüüsida alljärgnevat aspekte:

- Algandmed: olemasoleva elektrisüsteemi maksumus, jooksvad hooldus- ja remondikulud, elektrienergia tarbimine (ET).
- Innovatiivse lahenduse andmed: uue seadme maksumus, olemasoleva süsteemi adapteerimise maksumus osalise renoveerimise puhul, uue hoone elektritarbimine pärast uuendamist.
- Läbi viidud uuenduste analüüs: muutused elektrisüsteemis, elektritarbimise vähenemine, hoolduskulude kokkuhoid.

Olemasoleva ehitise hinda ei saa otseselt võrrelda uue, innovatiivse lahenduse maksumusega. Ehitusturul muutuvad tööde ja materjalide ühik-hinnad pidevalt. Näiteks elektritööde ühikhind on viimase viie aasta jooksul muutunud kolm korda. Aastatel 2006-2007 oli maksimum 250 krooni, aastal 2009 ainult 100 krooni ja praegu 180 krooni tunni eest. Kaks kuud tagasi prognoositi ehitushindade võimalikku tõusu, aga viimasel ajal hinnatõusu ei ennustata.

Olemasoleva ehitise maksumust on vaja kohandada tänapäevase ehitusturu hindade ja majandussituatsiooniga. Kunagi ehitatud elektrisüsteemi hinda ei ole õige kaasaegse variandiga üks ühele võrrelda. Arvutustes peab lähtuma hetkehindadest. Pärast leiame innovatiivse lahenduse maksumuse samasugustes tingimustes. Võrdlemine nimetatud meetodi alusel on korrektne, mugav ja universaalne. Analoogiliselt on võimalik teada saada uue ehitise hind.

Kirjeldatud esialgse maksumuse nimetan tavaseadme kasutamise maksumuseks (TSM). Konkreetse innovatiivse lahenduse maksumuse nimetan innovatiivse lahenduse maksumuseks (ILM). Innovatiivseid variante võib olla mitmed. Kirjeldatud meetod nõuab oskusi uue ehitise maksumuse arvutamisel ja mõistlik oleks seda teha elektriehituse spetsialisti abiga. Artikli uurimisobjekti tavaseadme kasutamise maksumus on esitatud tabelis 1.

**Table 1.** *ES maksumus tavaseadmetega ja pärast innovatsiooni*  
*Table 1. ES cost for ordinary equipment and cost after renovation*

|                                | Seade,<br>materjalid<br>€ | Paigaldus<br>€ | Kokku<br>TSM<br>€ | Kokku<br>ILM<br>€ |
|--------------------------------|---------------------------|----------------|-------------------|-------------------|
| 1. Jaotusseade                 |                           |                |                   |                   |
| 1.1. Peajaotuspunkt            | 9100                      | 850            | 9950              | 9872              |
| 1.2. Hoone osade jaotuspunktid |                           |                | 0                 |                   |
| Büroo 1. korrus                | 1155                      | 170            | 1325              | 1325              |
| Büroo 2. korrus                | 1565                      | 185            | 1750              | 1750              |
| Büroo 3. korrus                | 1745                      | 210            | 1955              | 1955              |
| Ladu 1 ja 2 koos abiruumidega  | 2445                      | 240            | 2685              | 2685              |

|   |        |        |                |                |
|---|--------|--------|----------------|----------------|
| Ladu 3 - ladu 5                             | 2615   | 280    | 2895           | 2895           |
| KVVK kilbid                                 | 7550   | 1050   | 8600           | 8600           |
| Muud kilbid                                 | 2150   | 550    | 2700           | 2700           |
| 1.3. Tarbija jaotuspunktid                  | 0      | 0      | 0              |                |
|   |        |        | <b>31 860</b>  | <b>31 782</b>  |
| 2. Kaabeldussüsteem                         |        |        |                |                |
| 2.1. Magistraalkaabeldus                    | 9637   | 2508,1 | 12 146         | 9078           |
| 2.2. Tarbijate kaabeldus                    | 27 721 | 35 527 | 63 248         | 61 257         |
| 2.3. Passiivne osa - maandus, piksekaitse   | 6497   | 2579,5 | 9 076          | 9076           |
| 2.4. Kaabliteed                             | 22 635 | 12 880 | 35 515         | 35 515         |
|   |        |        | <b>119 984</b> | <b>114 626</b> |
| 3. Tarbija elektrisüsteem                   |        |        |                |                |
| 3.1. Valgussüsteemid                        |        |        |                |                |
| Büroo                                       | 34 374 | 8252   | 42 626         | 87 370         |
| Ladu  | 37 135 | 12 635 | 49 770         | 165 147        |
| Tänavavalgustus                             | 9680   | 1215   | 10 895         | 23 280         |
|   |        |        | <b>103 292</b> | <b>275 797</b> |
| 4. Tarbija installatsiooni ühendusseade     |        |        |                |                |
| 4.1. Valguse juhtimine                      | 1211   | 1155   | 2366           | 2366           |
| 4.2. Tehnoloogiline seade                   | 7588   | 7340   | 14 928         | 14 928         |
| 4.3. Olmeseade                              | 171    | 327    | 498            | 498            |
| 4.4. Elektriküte                            | 1501   | 709    | 2210           | 2210           |
| 4.5. KVVK                                   | 1360   | 1092   | 2452           | 2452           |
| 4.6. Serveriruum ja elektroonilised seadmed | 367    | 357    | 724            | 724            |
| 4.7. Automaatika ja reguleerimiseseade      | 0      | 0      | 0              | 0              |
| 5. Muud (üleandmine, transport)             |        |        | <b>3550</b>    | <b>3550</b>    |
|   |        |        | <b>277 288</b> | <b>445 383</b> |

Märkus: Maksumuse neljas osa ei sisalda tarbija seadme hinda, kuid sisaldab installatsiooniseadet (pistikupesad, lülitid, harukarbid, turvalülitid) seadme ühenduseks. See vastab elektriühenduse traditsioonile ja ehituspraktikale.

## Hoone elektrisüsteemi uuendamine

Selles etapis on tähtis mõista, millise hooneosa ES-i on otstarbekas uuendada. Selleks tuleb analüüsida TSM struktuuri ja uurida, mis moodustab TSM-s ja elektritarbimises olulise osa. Renoveerimistegevuses tuleb arvestada elektritööde teostamise tehnoloogiaga: vajalikud elektrivarustuse katkestused, kaasnevad ehitustööd jne. Minu uuringu objektiks on valgustussüsteem, mis moodustab 37,2% üldmaksumusest. Objektis ei kasutata suure võimsusega tehnoloogilisi seadmeid. Valgustusel on elektritarbimises oluline osa. Objekti territooriumil on mahukas tänavavalgustus.

Otstarbekad innovatsioonid on alljärgnevad:

- a. LED-valgustuskoridorides ja trepikodades, LED-tänavavalgustuse paigaldus;
- b. LED-valgustus büroos ja välisosas (100%), LED-valgustuse paigaldus laos (osaline);
- c. LED-valgustus kõikjal (100%), päikeseptareid katusel.

Kirjeldatud võimalikus innovatsioonis arvestan üksikasjalikult variantiga C. Täielikku suure kompleksi LED-valgustust ei paku mitte keegi tootjatest, mitmetel büroo- ja tööstusvalgustuse tüüpidel puuduvad LED-allikate analoogid. Perioodil 2010-2011 on LED-valgustuse aktiivne kasutamine toonud esile mitmeid probleeme: efektiivset jahutust on tänavavalgustuses raske tagada, ajutised probleemid jahutusega vähendavad kasutamisaega. Positiivne on aga võimalus LED-valgustust mugavalt reguleerida.

Selle artikli eesmärk on uurida rohkem majanduslikke aspekte, sest autor lähtub eeldusest, et tehnilisi probleeme ei teki ja allpool toodud variant on võimalik.

Tabelis 2 on võrreldud LED-valgustuse võimsust ja maksumust luminofoorvalgustusega (siseruumides) ja metallhaliidvalgustusega (välistingimustes).

Tabel 2. Valgustite asenduse vastavus hinna ja võimsusega  
 Table 2. Lighting change conformity for cost and power

| Valgustite tüüp (allikas) | Tavaallika võimsus W | LED-võimsus W | Tavahind € | LED-hind € | Märkused        |
|---------------------------|----------------------|---------------|------------|------------|-----------------|
| Luminofoor                | 2 x 18               | 16            | 27         | 104        | büroo           |
|                           | 2 x 36               | 30            | 31         | 135        | büroo           |
|                           | 2 x 36, akuga        |               | 58         | 158        | trepikoda       |
|                           | 2 x 58               | 44            | 35         | 165        | ladu            |
|                           | 2 x 58, akuga        |               | 62         | 192        | ladu            |
| Metallhaliid              | HQI-400              | 156           | 120        | 555        | välis-valgustus |
| Naatrium                  | NAV-250              | 112           | 110        | 450        | välis-valgustus |

Tavahinnad kehtivad keskmise kvaliteediga valgustitele, mis on objektile paigaldatud. Kirjeldatud meetodil muutuvad valgustuse võimsus ja maksumus alljärgnevalt.

Tabel 3. Kompleksi valgustuse osade üldvõimsuse ja maksumuse muutus  
 Table 3. A change of complex lighting power and expences

| Kompleksi ES osa nimetus | Võimsus tavavalgustusega W | Uus võimsus (LED) W | Maksumus tavavalgustusega € | LED-valgustuse maksumus € | $P_a$ | $P_a$ (uus) kW | Vähene mine $P_a$ kW % |
|--------------------------|----------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------------|-------|----------------|------------------------|
| Büroo                    | 34 696                     | 14 550              | 34 374                      | 79 118                    | 180   | 164            | 8,9                    |
| Ladu                     | 104 620                    | 34 891              | 37 135                      | 152 512                   | 157,2 | 98,3           | 37,6                   |
| Tänavavalgustus          | 11 640                     | 4392                | 9680                        | 22 065                    | 11,2  | 4,4            | 60                     |

### Tulemuste analüüs

LED-valgustuse asendus mõjutab arvutuslikku võimsust ( $P_a$ ) elektrisüsteemis rohkem seal, kus valgustuse osa on olulisem ja/või seda kasutatakse rohkem (ladu - 0,85; büroo - 0,7; tänav - 1,0). Valgustuse hinnast suurem osa kulub LED-allikale. LED-valgusti süütamisseade ja korpus on suhteliselt väike osa keskmise kvaliteediga valgusti hinnast. Lattu on

paigaldatud odav mudel ja korpus ning süütamisseade maksavad veel vähem. Ühtlasi moodustab valgustus laos ES-st suurema osa. Mõlemad asjaolud osutavad, et LED-valgustuse kasutamise laos on bürooga võrreldes efektiivsem.

Ülejäänud elektrisüsteemis on samuti võimalik teha muudatusi. Vähenevad Pa vähendab iga valgustusliini voolu, mis omakorda võimaldab kaablite ristlõiget vähendada. Järgmiseks tuleb kontrollida lao toite ristlõiget. Kogu ahela parameetrid võiks muuta väiksemaks, mis langetab ka nende hinda. Samuti tuleb kontrollida kilpide uut maksumust. Positiivne mõju ristlõike vähenemisel on suurem, kui tegemist on suure hoonega, liinid on pikad ja valgustuse kaablites on kasutatud ristlõikeid 2,5-4 mm<sup>2</sup>. See tähendab, et büroos, kus liini pikkus on lühem ja valgustuse kaabelduses on kasutatud ristlõiget 1,5 mm<sup>2</sup>, ei too vähenenud võimsus kaasa olulisi muudatusi kaabeldussüsteemides. Varem esitatud hoone ES struktuuri mudel näitab erinevaid osasid, kus tuleb kontrollida tehnilisi ja majanduslikke parameetrid.

Järgneva näite varal uurin üksikasjalikult üht osa hoonest (ladu 3-5). Väiksem valgustite võimsus (37,2%) lubab valgusti toiteks kasutada 1,5 mm<sup>2</sup> kaablit. Liinikaitse lülite hulk väheneda ei tohi, sest 10 A nimivool vastab samuti uuele kaabeldusele. Viienda lao arvestuslikku võimsust on vähendatud 8,7 kW ja seega on võimalik kasutada väiksema ristlõikega toitekaablit. Kolmanda ja neljanda lao ES sisaldab tehnoloogilisi seadmeid (tõstuki laadijad, pakkimisseade) ja nende puhul ei too sarnase valgustuse võimsuse vähendamine kaasa nii palju muutusi. Kirjeldatud muutused sisalduvad ILM-maksumuses.

### **Taastuenergia võimalik kasutamine**

Kirjeldatud kompleksis on otstarbekas tulevikus kasutada taastuenergia allikana päikesepaneele (*photovoltaic*). 1 kW paneelide komplekti tootlikkus Eestis on u 1000 W (andmed PVGIS). Lähtudes kompleksi elektrisüsteemi eripärast, planeerime kasutada iga lao katusel kaht päikesepaneelide komplekti. Komplekti kuuluvad kuus päikesepaneeli SolarWorld

SW 230 poly ja üks SMA Sunny Boy võrguinverteris 1200 W. Maaletoojaks Eestis on Taastuvenergia OÜ.

Hinnanguliselt on võimalik ühe komplekti maksumuseks koos paigaldustöödega pakkuda u 5500 €. Lisaks tuleb arvestada elektritööde hinnaga, et ühendada paneelide võrguinverter tavalise elektrisüsteemiga (kaablid, lao kilbi lisaseade). Võimalik summa on 530 €. Kokku seega 6030 €.  
**Üldmaksumus: viis ladu kokku 60 300 €.**

### **Tasuvus**

Päikesepaneeli komplektide võimsus kokku:  $230 \text{ W} \times 60 \text{ paneeli} =$   
**13 800 W.**

Elektritootmine aastas:  $13,8 \text{ kW} \times 1000 \text{ kWh/aastas} =$  **13 800 kWh.**

Keskmine elektrienergia tariif pikaajalise perioodi jooksul on **0,3 €/kWh.**

Arvestame süsteemi maksumusest lähtuvalt süsteemi tasuvuse perioodi.

Ühe aasta elektritootmise tulu:  $13 800 \times 0,3 =$  **4140 €.**

Tasuvusperiood:  $60 300 \text{ €} : 4140 \text{ €} =$  **~15 aastat.**

Kirjeldatud variant näitab, et suure kompleksi jaoks on otstarbekas teha investeeringuid taastuvenergia kasutusevõtuks hoone pikaajalise kasutamise korral. Samuti on tähtis teada, et kirjeldatud varianti kasutatakse ainult tagavaraallikana ja kui põhitoide katkeb, siis inverter elektrienergiat ei edasta. 15aastane tasuvusperiood on võimalik juhul, kui kehtib kõrge elektritariif. Taastuvenergiasüsteemi maksumus sisaldab 21% TSM, kuid elektritootmine on 1-2% ETB. Käesolevat investeeringut on raske nimetada efektiivseks.

### **Innovatiivse tegevuse majanduslikud aspektid**

Majanduslikest aspektidest on kõige tähtsamad elektritarbimise arvestus ja analüüs. Ühtlasi puudub enne uue ehituse algust täpne info ES kasutamise režiimist. Esialgu tulebki määratleda režiim, mis on seotud arvestusliku võimsuse ja kasutamisajaga. Logistikakompleksi võimsuse kasutamise režiim on alljärgnev.

Tabel 4. Elektritarbimine ööpäeva ja aasta lõikes  
Table 4. Electrical consumption day and year section

| Hoone osa       | P <sub>a</sub> kasutus | Ööpäevane ET, kWh | Aastane režiim | Aastane ET kWh |
|-----------------|------------------------|-------------------|----------------|----------------|
| Büroo           | 8 tundi - 70%          | 1166              | 6 kuud - 70%   | 217 517        |
|                 | 2 tundi - 40%          |                   | 4 kuud - 40%   |                |
|                 | 3 tundi - 20%          |                   | 2 kuud - 30%   |                |
|                 | 12 tundi - 10%         |                   |                |                |
| Ladu            | 14 tundi - 70%         | 2135              | 6 kuud - 80%   | 485 713        |
|                 | 6 tundi - 50%          |                   | 6 kuud - 50%   |                |
|                 | 4 tundi - 20%          |                   |                |                |
| Tänavavalgustus | 10 tundi               | 112               |                | 41 610         |
|                 | keskmine               |                   |                |                |
|                 | aastaringgelt          |                   |                |                |
| KVVK            | 6 tundi - 60%          | 993               | 4 kuud - 60%   | 139 020        |
|                 | 10 tundi - 30%         |                   | 6 kuud - 30%   |                |
|                 | 8 tundi - 20%          |                   | 2 kuud - 20%   |                |

Kirjeldatud režiimis analüüsin elektritarbimise vähenemist, kui tavavalgustus asendada LED-valgustusega. KVVK-süsteemide tarbimine uuenduste käigus ei muutu. ETI arvestuseks kasutan 3. tabeli P<sub>a</sub> vähenemise protsente.

Tabel 5. Elektritarbimise vähenemine pärast uuendusi  
Table 5. Electrical consumption degression after a realisation renovation

| Kompleksi ES osa nimetus | ETB     | ETI     | ETV     | ETV 5   | ETV 10     | ETV 15    |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|------------|-----------|
| Büroo                    | 217 517 | 199 740 | 17 777  | 88 885  | 177 770    | 266 655   |
| Ladu                     | 485 713 | 352 989 | 132 724 | 663 620 | 13 247 240 | 1 990 860 |
| Tänavavalgustus          | 41 610  | 26 006  | 15 604  | 78 020  | 156 040    | 234 060   |
| KVVK                     | 139 020 | 139 020 |         |         |            |           |

Ülaltoodud tabel koos prognoosiga elektrienergia hinna tõusust annab võimaluse hinnata võimalikku innovatsiooni tasuvuse perioodi. Teen näite varal väikese arvestuse tänavavalgustuse osas.



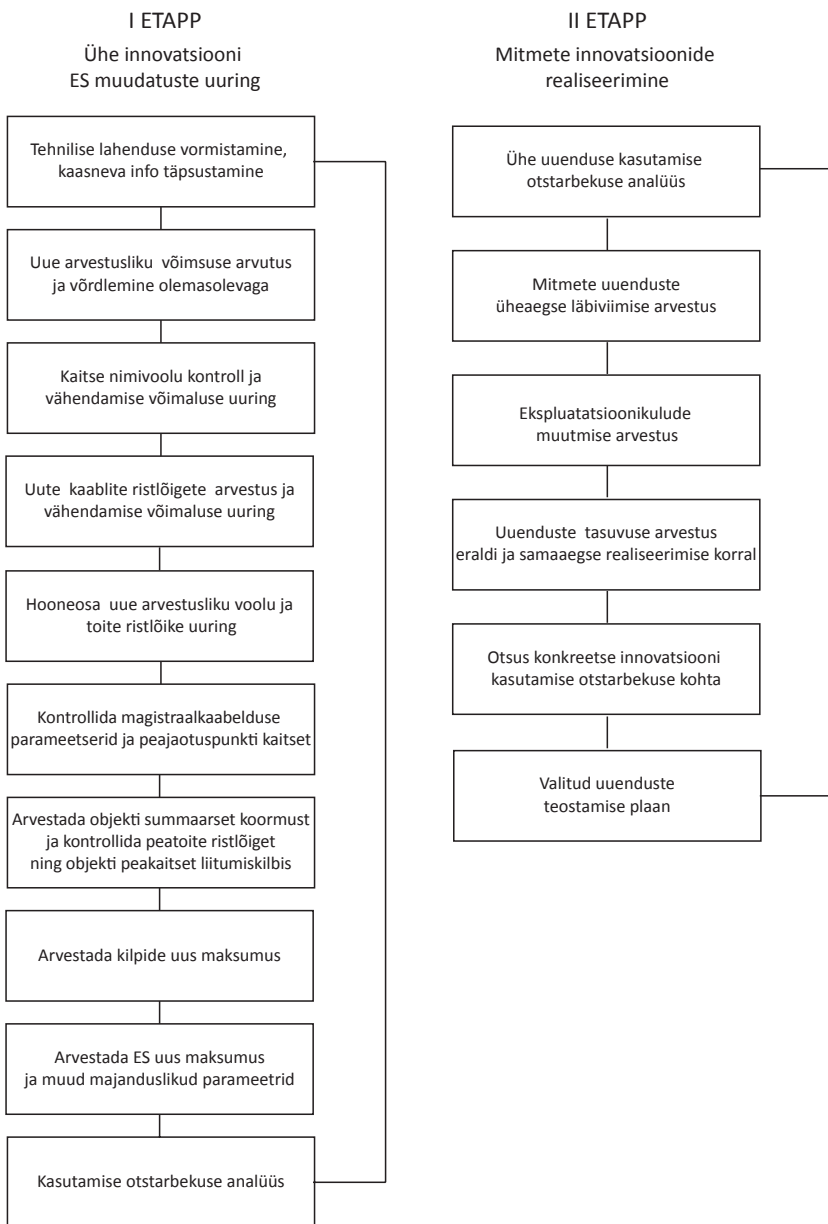
Lisakulud uuenduste läbi viimiseks on 12 385 eurot. Lähtudes tabelist 5 ja eeldusest, et keskmine elektrienergia hind on 0,1 €/kWh, saame tulemuse, et kompenseerimisaeg on kaheksa aastat. Analoogiline arvestus kogu kompleksi jaoks näitab, et võimalik tasuvusaeg on 10 aastat, kuid tuleb arvestada, et see on positiivne variant: tariifid on kõrged, sest LED-valgustitel puuduvad tehnilised probleemid, nende maksumust on kirjeldatud tabelis 3. Täpne arvestus võib anda veel lühema perioodi, sest LED-valgustuse hoolduskulud on väiksemad. Valgustite vähendatud võimsus teeb odavamaks ka kaabelduse maksumuse uue ehituse jaoks.

### **Hoolduskulude muutmise analüüs**

Range hoolduskulude arvestus nõuab täpset infot, kuidas konkreetse seadme eksploateerimise käigus muutuvad vajalikud kulud. Kui tihti näiteks vahetatakse lampe ja millisel momendil tuleb vahetada elektroonballast, kui kaua töötab konkreetse kilbi komponent ja millal peab kilpi renoveerima. Halb elektrivarustuse kvaliteet toob kaasa hoolduskulude suurenemise, sest mitmed ES komponendid (valgusti elektroonballast, põrandakütte regulaator, valgusallikas, käiviti, relee) tuleb kiiremini välja vahetada. Konkreetse kompleksi kulud sisaldavad igakuist väikese käidukorraldamise tasu, mis sisaldab lampide vahetust, kilpide, andurite ja valgustite remonti. Kui ei ole avariiremonte ja väikseid renoveerimisi, siis igakuine kulude suurus on u 750-1000 € .

### **Tulemuste analüüs ja uuringute algoritm**

Tulemuste analüüs näitab mõningaid ühiseid jooni teostatud uuendustes. Kõige suurem efekt ilmnes seal, kus innovatsioon oli suurem – renoveeritud või uuesti ehitatud elektrisüsteemis, näiteks tänavavalgustuses. Valgustite mudelile vaatamata on mingi osa töödest sama: kaablite kaevamine ja mastide paigaldus. Tavalise variandi puhul moodustab valgustite hind väikese osa kogu tänavavalgustuse ehituse maksumusest. LED-valgustuse kasutamine muudab situatsiooni: valgustid maksavad rohkem, kuid elektritarbimine väheneb üle 2,5 korra. Uutel valgustitel on lühike tasuvusperiood – 8 aastat. Negatiivne efekt tekib, kui suures kompleksis tarbib KVVK olulise osa elektrienergiast. Seadme võimsust vähendada



Joonis 2. Algoritm ES uuenduste uurimiseks  
Figure 2. ES innovation research algorithm

on võimatu, sest on olemas mingi kriitiline režiim (väga külm või väga palav) ja võimsus tagab sellise režiimi parameetrid. Lahenduseks oleks reguleerimissüsteemide arendamine ja lisaautomaatika paigaldamine.

Uurimise objektiks oli ka büroo. Büroo eripära seisneb selles, et sama võimsusega valgustid nagu laos on oma disaini tõttu kallimad. Võrreldes laoga kasutatakse büroos LED-valgustust ööpäeva ja aasta lõikes vähem. Büroos on palju olmeseadmeid, arvuteid ja muud elektroonikat. Kirjeldatud olukord tähendab valgustuse väiksemat osa elektritarbimises ja seega mõjutab LED-valgustuse kasutamine elektritarbimist tavaseadmete elektritarbimisega võrreldes vähem. Ühtlasi on büroos uus valgustus tähtsam ja efektiivsem, sest töökeskkonna muutusel saab seda reguleerida ja programmeerida, mis toob kaasa ka lisaelektri tarbimise vähenemise. Majanduslikke aspekte arvestades on see eraldi võimalik uuringute suund.

Tehniliste ja majanduslike aspektide analüüsi ühendab autor alljärgnevas algoritmis (joonis 2), mis sisaldab kaht etappi: tehniliste muutuste uuring ja maksumuse kontroll mitmete uuenduste korral.

### **Kokkuvõte**

On võimalik koostada selline ES mudel, mille abil on mugav analüüsida uuendustega kaasnevat muutusi. Tehnilisi ja majanduslikke aspekte on otstarbekas analüüsida koos. Vajalik on kasutada analoogseid termineid ja uuringu objekte. Otsus konkreetse uuenduse otstarbekusest tuleb vastu võtta nii tehniliste kui ka majanduslike näitude alusel. Mitmeid uuenduste tulemusi on võimalik ennustada eelneva analüüsi alusel: innovatsiooni osakaal elektrisüsteemis, seadme kasutamise režiimi eripärad, tariifi mõju innovatsiooni tasuvusele.

Konkreetse innovatsiooni mõjuarvestus on seotud konkreetse seadme eksploatatsioonikulude andmetega.

## **Kasutatud kirjandus**

EVS-HD 60364-5-51:2006 Ehitiste elektripaigaldised. Osa 5-51: Elektri-seadmete valik ja paigaldamine. Üldjuhised. – Eesti Standardikeskus.

EVS-IEC 60364-4-43:2003 Ehitiste elektripaigaldised. Osa 4-43: Kaitseviisid.

Liigvoolukaitse. – Eesti Standardikeskus.

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

Taastuvenergia OÜ koduleht: [www.taastuvenergia.ee](http://www.taastuvenergia.ee)

## **BUILDINGS ELECTRICAL SYSTEMS SOLUTIONS: STRUCTURE MODELLING, A SOLUTION REALISATION ECONOMICAL AND TECHNICAL ASPECTS. A FINAL VARIANT SELECTING ALGORITHM.**

Valeri Saikovski  
Tallinn University of Technology

Electrical systems innovation is usually a power consumption analysis. In this article author tries to make complex vision of changes in building electrical system: technical changes, economical and technical aspects analysis and operation expences.

# ERINEVATE TAIMELIIKIDE VÕRDLUS BIOETANOOLI TOOTMISEKS

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

## Annotatsioon

Töö eesmärgiks oli uurida erinevate taimeliikide kasutamist etanooli tootmise toorainena ning kasutamise sõltuvust taimede tselluloosi, hemitselluloosi ja ligniini sisaldusest. Uuritavad taimed valiti põhimõttel, et need kasvaksid Eesti kliimas, kuid samas ei konkureeriks otseselt toiduainetööstusega. Materjali töötlemiseks kasutati lahjas happelähuses kuumutamist temperatuuril 150 °C, millele järgnes ensüümide toimele hüdroolüüs, et lagundada tselluloosiahelad suhkruteks. Töös uuriti nelja taimeliiki: energiahein, amuuri siidpööris (*Miscanthus saccharifloris*), kanep ja pilliroog. Selleks määrati eeltötluse tulemusena vabanenud suhkrute kontsentratsiooni ning fermentatsioonil saadud etanooli kogust. Uuritud taimeliikidest andis parimaid tulemusi kanep, millest saadi 312,7 g/kg glükoosi ning 83,40 g/kg etanooli. Samuti selgus, et puudujääke esineb fermentatsiooni efektiivsuses, sest suur osa vabanenud suhkrutest jääb etanooliks käärimata.

*Märksõnad: taastuvenergia, biomass, glükoos, etanool, happeline eeltötlus, ensüümid.*

## Sissejuhatus

Pidevalt tõusvate energiahindade, CO<sub>2</sub> ja kasvuhoonegaaside emissiooni piirangute ning üha suureneva sõltuvuse tõttu fossiilsetest kütustest on paljud riigid hakanud arendama energiapoliitikat, kus pööratakse suuremat tähelepanu taastuvenergiale (Dwivedi et al., 2009). Aastal 2005 moodustas taastuvate energiaallikate osakaal Eestis kogu energia tarbimisest 18%, kuid aastaks 2020 peab selle osakaal suurenema 25%ni energia lõpptarbimisest (Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, 2010).

Biokütuseid jagatakse esimese, teise ja kolmanda põlvkonna kütusteks peamiselt kasutatava tooraine ja tootmistehnoloogia järgi. Teise põlvkon-

na biokütuseid toodetakse lignotselluloosest biomassist nagu rohttaimed, puit ning taimsed ja põllumajandusjäätmed (Nigam and Singh, 2011).

Erinevate taastuenergiaallikate seas on biomassil suur tähtsus, sest seda saab kasutada vedelate biokütuste, näiteks etanooli tootmiseks, mida omakorda saab tarvitada mootorikütusena (Larson, 2008). Lignotselluloosest biomassist etanooli tootmine ja selle kasutamine mootorikütusena aitaks ühtlasi arendada maapiirkondi, tekitades uusi töökohti, leides rakendust põllumajandusjäätmetele ning hetkel kasutusest väljas olevale põllumaale. Samuti vähendaks see kasvuhoonegaaside paiskumist atmosfääri ning sõltuvust kütuse impordist (Demirbas, 2005).

Töö eesmärgiks oli uurida erinevate taimeliikide kasutamist etanooli tootmise toorainena. Selleks määrati tselluloosi lagundamisel vabanevate suhkrute kontsentratsiooni ning käärimisel saadavat etanooli kogust. Töös uuriti järgmisi taimeliike: energiahein, kanep, amuuri siidpööris ning pilliroog. Taimeliigid olid valitud selliselt, et need kasvaksid Eesti kliimas, kuid ei konkureeriks otseselt toiduainetööstusega.

## **Biomass**

Töös uuriti nelja erinevat taimeliiki: energiahein, kanep, amuuri siidpööris ja pilliroog. Biomassi proovid on niidetud aastal 2010, nendest energiahein, kanep ja amuuri siidpööris on pärit Eesti Maaülikooli katsepõllult ning pilliroog Kuremaa järve äärest. Proove analüüsiti Eesti Maaülikooli taimebiokeemia laboris, et määrata kindlaks nende tuha, tselluloosi, hemitselluloosi ning ligniini sisaldus. Tulemused on toodud tabelis 1. Proove analüüsiti vastavalt AOAC 973.1 (*Assotiation of Official Analytical Chemists*) standardmeetodile. Materjal oli eelnevalt purustatud 3–5 cm suurusega tükkideks ning kuivatatud, niiskusesisaldus alla 10%.

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

| Proovi nimetus    | Tuhk % | Hemitselluloos % | Tselluloos % | Ligniini % |
|-------------------|--------|------------------|--------------|------------|
| Energiahein       | 7,01   | 27,33            | 37,85        | 9,65       |
| Amuuri siidpööris | 5,37   | 30,15            | 42,00        | 7,00       |
| Kanep             | 5,25   | 10,60            | 53,86        | 8,76       |
| Pilliroog         | -      | 31,50            | 49,40        | 8,74       |

## Eeltöötlus

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

Antud töös kasutati eeltöötluks lahjas happelahuses kuumutamist koos ensümaatilise hüdrolüüsiga. See meetod on lihtne, kasutab odavaid keemikaale ning vajab protsessi toimumiseks mõõdukaid tingimusi. Miinuseks on samas väiksem glükoosi saagis ning kõrvalproduktide teke, mis võivad hiljem takistada fermentatsiooni.

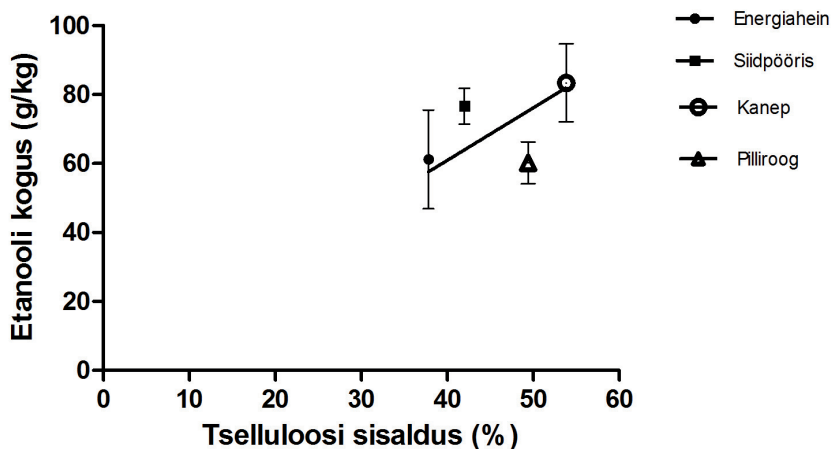
## Materjalid ja meetodika

Proovide suuruseks oli 75 g eelnevalt peenestatud ja kuivatatud biomassi (niiskusesisaldus <10%), millele lisati 750 ml 1% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> lahust. Seejärel kuumutati proove t = 30 minutit temperatuuril T = 150 °C ning rõhul kuni p = 5 bar. Peale proovi jahtumist toatemperatuurile lisati Ca(OH)<sub>2</sub> reguleerimaks pH-d vahemikku pH = 4,5–5, sest kasutatud ensüümid inaktiveeruvad kui pH < 4 või pH > 6. Eeltöötluks järgnes ensüümide toimel taimse materjali hüdrolüüs. Selleks kasutati Danisco US Inc. poolt toodetud ensüümide segu Accellerase 1500, mida lisati kontsentratsiooniga 0,2 ml/g biomassi kohta. Hüdrolüüsi protsess toimus t = 48 tundi pideval segamisel ning temperatuuril T = 50 °C, mille käigus enamus biomassist lahustus ning eelnev paks mass (tahke osa 10% lahusest), muutus pruuniks vedelikuks. Peale hüdrolüüsi lõppu määrati proovides glükoosi sisaldust reflektomeetriliselt kasutades Reflectoquant-glükoosi ja fruktoosi

määramise testi ning reflektomeetrit RQflex 10. Seejärel lisati proovidele 2,5 g kuivpärmii *Saccharomyces cerevisiae*. Fermentatsioon toimus viie ööpäeva jooksul hapnikuvaestes tingimustes 1000 ml klaaskolbides, mis olid pealt suletud kääritustoruga. Käärinise lõppemisel eraldati vaakumfiltratsioonil vedelik kolbi jäänud tahkest osast ning mõõdeti lahuse alkoholi kontsentratsiooni reflektomeetriliselt Reflectoquant-alkoholi katsega. Tulemusi kontrolliti veel destillatsiooniga, määrates destillaadi tihedust. Kõikide proovide korral tehti vähemalt kolm paralleelkatset. Joonistel on kasutatud keskmistatud tulemusi, mõõteviga on näidatud vertikaalsete joontega. Andmeid töödeldi programmidega Microsoft Excel ja Graph-Pad Prism 5.

### Tulemused

Töös uuriti erinevate taimeliikide sobivust bioetanooli tootmiseks. Selleks võrreldi proovide glükoosi ja etanooli saagiseid biomassi biokeemilise koostisega. Sõltuvalt materjalist oli tulemustes suuri erinevusi, kuid põhiliselt sõltub saadud etanooli kogus proovi tselluloosi sisaldusest. Samas tuleb arvesse võtta ka ligniini ja hemitselluloosi sisaldust. Nagu joonisel 1 näha, saadi suurim etanooli kogus 83,40 g/kg kanepi proovidest. Kõige

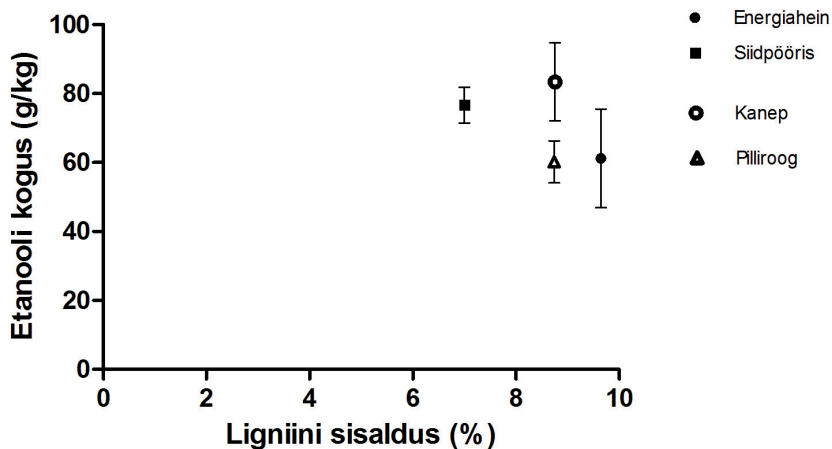


Joonis 1. Toodetud etanooli koguse sõltuvus tselluloosi sisaldusest  
Figure 1. Dependence of ethanol yield from cellulose content

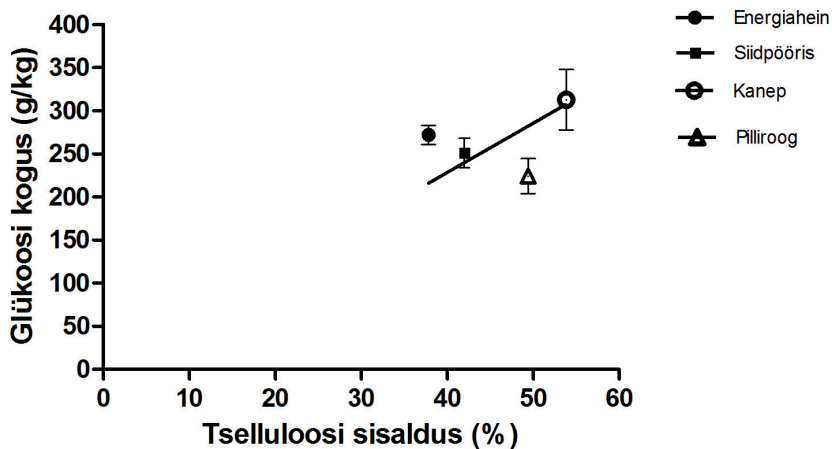


madalama etanooli saagise uuritud taimeliikidest andsid pilliroog 60,21 g/kg ja energiahein 61,19 g/kg. Tulemuste suur alahindamine pilliroo proovide puhul tuleneb peamiselt pilliroo suurest hemitselluloosi sisaldusest. Nagu tulemustest joonisel 2 ja tabelis 1 selgub, siis ka kanepil ja pillirool, kus mõlemal on sarnane tselluloosi ja ligniini sisaldus, on kanepist saadav glükoosi ja etanooli kogus tunduvalt suurem kui pilliroost saadav. See on seletatav pilliroo tunduvalt suurema hemitselluloosi sisaldusega, vastavalt 31,50% pillirool ja 10,60% kanepil. Kasutatud tingimustel eeltöötlus pole suutnud kogu hemitselluloosi eemaldada ning seega on takistatud ensüümide ligipääs tselluloosile, et lagundada seda suhkruteks.

Uurides erinevatest taimeliikidest saadud glükoosi kontsentratsioone (tulemused joonisel 3) selgub, et energiaheina proovidest saadud glükoo- si kontsentratsioonid on kõrgemad kui siidpöörisel, vastavalt 272,0 ja 251,16 g/kg, kuigi siidpöörise tselluloosi sisaldus on suurem. Seda võib põhjustada hemitselluloosi suurem takistav mõju hüdrolyüsi toimumisele kui kõrgem ligniini sisalduse mõju.



Joonis 2. Toodetud etanooli koguse sõltuvus ligniini sisaldusest  
Figure 2. Dependence of ethanol yield from lignin content



Joonis 3. Glükoosi koguse sõltuvus tselluloosi sisaldusest  
 Figure 3. Dependence of glucose yield from cellulose content

Lignotselluloosest materjalist etanooli tootmisel tekitab kõige suuremaid probleeme mitte eeltöötlus ja tselluloosi lagundamine suhkruteks, vaid hoopis madal fermentatsiooni efektiivsus. Etanooli tootmiseks kasutati ära keskmiselt 50% hüdrolüüsil saadud glükoosist, tulemused tabelis 2. Vastavalt kirjanduse andmetele (Yang et al., 2009) põhjustab happeline eeltöötlus kõrgetel temperatuuridel erinevate orgaaniliste ühendite ning kõrvalproduktide teket, mis inhibeerivad pärmi kasvu ning takistavad fermentatsiooni toimumist (Helle et al., 2003). Tulevikus tehtavates katsetes tuleb tähelepanu pöörata eelkõige fermentatsiooni efektiivsuse suurendamisele ja kõrvalproduktide tekke vähendamisele.

Tabel 2. Fermentatsiooni efektiivsus lähtuvalt lahuse glükoosi kontsentratsioonist  
 Table 2. Fermentation efficiency according to glucose concentration

| Proov       | Fermentatsiooni efektiivsus % |
|-------------|-------------------------------|
| Energiahein | 44,11                         |
| Siidpööris  | 59,86                         |
| Kanep       | 52,30                         |
| Pilliroog   | 52,66                         |

## **Kokkuvõtte**

Töö eesmärgiks oli uurida erinevate taimeliikide kasutamist etanooli tootmise toorainena. Selleks määrati tselluloosi lagundamisel vabanevate suhkrute kontsentratsiooni ning käärimisel saadavat etanooli kogust. Töös uuriti järgmisi taimeliike: energiahein, kanep, amuuri siidpööris ning pilliroog. Taimeliigid olid valitud selliselt, et need kasvaksid Eesti kliimas, kuid ei konkureeriks otseselt toiduainetööstusega.

Sõltuvalt materjalist oli tulemuste osas suuri erinevusi, kuid põhiliselt sõltub saadud etanooli kogus proovi tselluloosi sisaldusest, arvesse tuleb võtta ka ligniini ja hemitselluloosi sisaldust. Suurim etanooli kogus 83,40 g/kg saadi kanepi proovidest, millel oli ühtlasi ka kõrgeim tselluloosi sisaldus. Tulemuste suur alahindamine pilliroo proovide korral näitab, et kasutatud tingimustel eeltöötlus pole suutnud kogu hemitselluloosi eemaldada ning seega on takistatud ensüümide ligipääs tselluloosile. Suurimaid probleeme etanooli tootmisel tekitas madal fermentatsiooni efektiivsus. Etanooli tootmiseks kasutati ära keskmiselt 50% hüdrolüüsil saadud glükoosist, seega ligi pool suhkrutest jääb alkoholiks käärimata. Seda põhjustavad eeltötluse käigus tekkivad kõrvalproduktid, mis takistavad pärmil elutegevust ning alkoholi tootmist.

Edaspidi tuleb tähelepanu pöörata eelkõige fermentatsiooni efektiivsuse suurendamisele ja kõrvalproduktide tekke vähendamisele, et kasutada ära kõik tselluloosist saadavad suhkrud ning tõsta sellega tunduvalt bioetanooli tootmise saagist.

## **Tunnustus**

Uurimistööd rahastas Keskkonnainvesteeringute Keskus.

## **Kasutatud kirjandus**

- Demirbas, A., 2005. Bioethanol from cellulosic materials: a renewable motor fuel from biomass, *Energy Sources*, 27, 327–337.
- Dien, B., Jung, H., Vogel, K., Casler, M., Lamb, J., Iten, L., Mitchell, R., Sarath, G., 2006. Chemical composition and response to dilute-acid pretreatment and enzymatic saccharification of alfaalfa, reed canarygrass and switchgrass, *Biomass Bioenergy*, 30, lk. 880–891.
- 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.
- Helle, S., Cameron, D., Lam, J., White, B., Duff, S., 2003. Effect of inhibitory compounds found in biomass hydrolysates on growth and xylose fermentation by a genetically engineered strain of *S. cerevisiae*, *Enzyme and Microbial Technology*, 3, 786–792.
- Larson, E.D., 2008. Biofuel production technologies: status prospects and implications for trade and development, United Nations Conference on Trade and Development, New York and Geneva.
- Ministry of Economy and Communication, 02.06.2010. Eesti taastuvenergia arengukava aastani 2020, <http://www.mkm.ee/nreap-2>
- Nigam, P.S., Singh, A., 2011. Production of liquid biofuels from renewable resources, *Progress in Energy and Combustion Science*, 37, 52–68.
- Yang, Y., Sharma – Shivappa, R., Burns, J.C., Cheng, J.J., 2009. Dilute Acid Pretreatment of Oven-dried Switchgrass Germplasms for Bioethanol Production, *Energy & Fuels*, 23, 3759–3766.

## **COMPARISON OF DIFFERENT ENERGY CROPS FOR BIOETHANOL PRODUCTION**

Marti Tutt, Jüri Olt

Estonian University of Life Sciences, Institute of Technology

Aim of this research was to investigate the production of ethanol from different sort of biomass. Produced glucose and ethanol from different samples was also compared to their cellulose, hemicellulose and lignin content. Dilute acid pretreatment at temperature of 150 °C was used together with enzymatic hydrolysis. Herbaceous biomass from four different species was investigated: hemp, energy grass, reed, silvergrass (*Miscanthus saccharifloris*). Hemp had the highest cellulose content of 53,86% and it gave the best glucose yield of 312,70 g/kg and ethanol yield of 83,40 g/kg. Most important properties of herbaceous material for bioethanol production and high glucose yields are high cellulose content, low lignin and hemicellulose content and availability of biomass.