

Eesti Maaülikool  
Metsandus- ja maaehitusinstituut

2011. aasta keskkonnakorralduse programmi projekt nr. 906  
**ENERGIASÄÄSTU JA KESKKONNAHOIU VÕIMALUSTE  
UURIMINE PUIDU KONVEKTIIVKUIVATAMISEL**

**Täitjad:** Valdek Tamme  
Risto Mitt  
Linnar Pärn

**Projekti finantseerija:**  
SA Keskkonnainvesteeringute Keskus

Tartu 2012

## Sissejuhatus

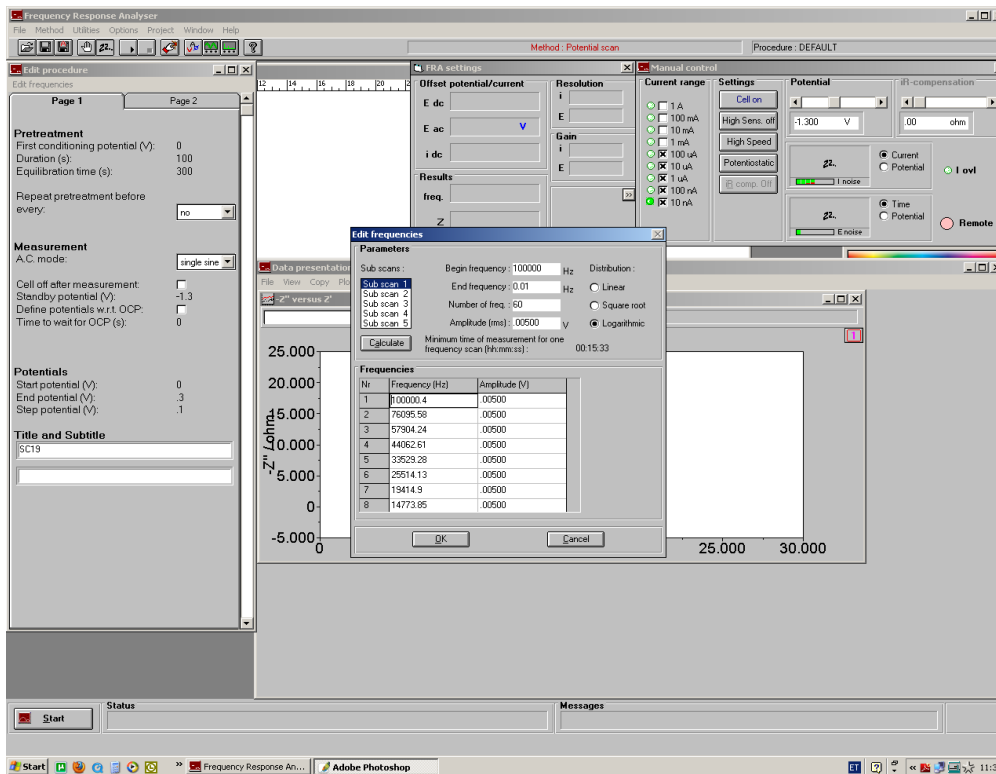
Paljudel juhtudel on Eesti puidutöötlemisettevõtetes olukord, kus puidu kuivatamise režiimid on optimeerimata, eriti lehtpuidu kuivatamisel. Liiga kiire ja optimeerimata kuivatamine (eriti küttepuidu liiga kiirel sundkuivatamisel) viib puidu osaliselt termilise lagunemise faasi, mille tagajärjeks on (lisaks tootmispraagile) kahjulikud happelise iseloomuga aerosoolsed heitmed atmosfääri. Paremat optimeerimist võimaldavaid alternatiivseid puidu kuivatusviise lisaks konvektiivkuivatamisele Eestis praktiliselt ei kasutata. Siiski, viimane väide ei pea enam paika väiksemate puidutöötlemisettevõtete kohta, mis on energia hindade järsu kallinemise tingimustes hakanud spontaanselt alternatiivina kasutama ka saematerjali valikulist atmosfäärilist eelkuivatamist, (mis on sisuliselt ka üks konvektiivkuivatamise eriliike). Ühelt poolt on puidu atmosfääriline eelkuivatus praktiliselt null- energiaga protsess, ja seega väga keskkonnasäästlik. Ka ajalooliselt on see meetod olnud kasutusel aastasadu, ja seega igakülgsest läbi proovitud. Ka Põhjamaades, Soomes ja Rootsis, on hakatud traditsioonilistele puidu kuivatusmeetodite teaduslikule uurimisele rohkem tähelepanu pöörama. Sellele tendentsile viitavad mõned ettekanded Rahvusvaheliselt Puidu Kuivatamise Konverentsilt, mis toimus augustis, k. a. 2012, Brasiilias, ja kus osales stendi-ettekandega ka käesoleva lõpparuande üks autoritest, MI metsanduse eriala doktorant Valdek Tamme (vt. lõpparuande lisa 2).

## Seadmed

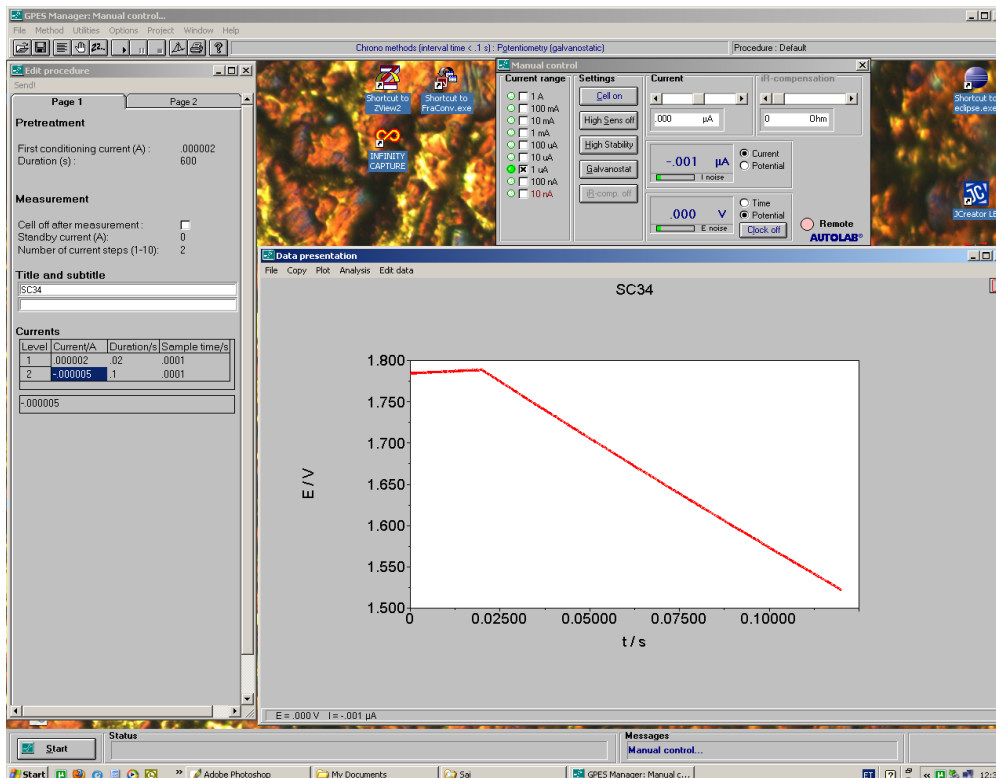
KIK keskkonnakorralduse 2011 a. programmi projekti Nr. 906 raames Eesti Maaülikoolile hangitud seadmed võimaldavad teaduslikul maailmatasemel uurida ja välja töötada puidu kuivatamisel tehnoloogilisi lahendusi, mis annaksid nii energia kokkuhoidu kui ka säästaksid keskkonda. Projekti vahendite efektiivsemaks kasutamiseks korraldati riigihange, mille vähempakkumisega võitis Evikon MCI OÜ, reg. kood Äriregistris 10299402. Riigihanke nimetuseks oli: „Puidu füüsikaliste ja mehaaniliste karakteristikute uurimise teadusaparatuur“ . Evikon MCI OÜ initsiatiivil ja firma kulul korraldati Eesti Maaülikooli ruumides Kreutzwaldi 64, Tartus, 24. juulil 2012 projektis osalevatele Eesti Maaülikooli töötajatele keerukamaid seadmeid tutvustav esmane koolitus (vt. joonis 1, 2, ja 3.).



**Joonis 1.** Evikon MCI OÜ projektijuht Hr. Meelis Ahu EMÜ MI metsatööstuse osakonna töötajatele keerulisema teadusaparatuuri esmast koolitust läbi viimas. (V. Tamme foto)



**Joonis 2.** Elektrilise impedantsi spektromeetri (EIS) AUTOLAB ekraanipilt impedantsi mõõtmisel.



**Joonis 3.** EIS AUTOLAB ekraanipilt krono-potentsiomeetrilises režiimis mõõtmisel.

## **Teadusaparatuuri kasutamine esialgsetes katsetes**

### **Impedantsi analüsaator**

Metrohm Autolab PGSTAT302N, 320 FRA2 mooduliga multifunktsionaalne mõõteriist sisaldab põhimenüüs 26 erinevat mõõterežiimi ekvivalentskeemide (elektriliste aseskeemide) meetodil töötamiseks. Esialgsetes uuringutes kasutati neist kolme – korrosioonipotentsiaali määramist mõõteelektroodide korrosiooni ja jääkpolarisatsiooni katsetes; ja kronopotentsiomeetrist mõõtmisviisi ja sagedusliku vastasmõju mõõtmisviisi elektroodide depolarisatsiooni protsessi uurimiseks.

### **Elektromeeter**

Keithley Instruments 6517B/4, Keithley 8009 mooduliga on laia mõõtepiirkonnaga täppis-mõõteriist alalisvoolu ja muudetava polaarsusega alalisvoolu režiimis. Esialgsetes uuringutes kasutati seda mõõteriista puidu elektritakistuse ja elektrijuhtivuse täppis-mõõtmistes. Elektrijuhtivust mõjutavateks teguriteks olid katsetes veeaur, süsihappegaas ja temperatuur.

### **Ultraheli puidu tihedusmõõtja ja ultraheli kiirusmõõtja**

Proceq Pundit Lab ja James Instruments V-Meter MARK IV V-C-402 ultraheli seadmeid kasutati esialgsetes uuringutes puidu mehaaniliste karakteristikute määramise meetodika välja töötamiseks. Nendeks karakteristikuteks, mis pakuvad huvi puidu kuivatuse seisukohalt, on elastsusmoodul, purunemismoodul tõmbepingetele (oluline kvaliteedikriteerium puidu kuivatusel), puidu tihedus ja puidu Poissoni tegur. Kuna ultraheli näol on tegemist mittepurustava mõõtmismeetodiga, siis põhiliseks matemaatiliseks

meetodiks on nende karakteristikute määramisel statistiline lineaarne ja mittelineaarne modelleerimine, aga samuti ka Fourier analüüs. Projektiga hangitud ultraheliseadmed oma tarkvarakomplektis matemaatilise statistika ja modelleerimise vahendeid ei sisalda.

### **Mäluga ostsilloskoop**

FLUKE 225C/S Scope Meter seadet kasutati esialgsetes uuringutes Proceq Pundit Lab ultraheli seadme komplektis oleva tarkvaralise signaalide kuju analüsaatori kontrollimiseks. Leiti, et Proceq Pundit Lab signaalide analüsaator on signaalide kvantitatiivseks analüüsiks praktiliselt kasutuskõlbmatu, (kuigi seadme reklaamprospektist võib jääda vastupidine mulje).

### **Niiskuse ja temperatuuri loger**

Rotronic Hygrolog HL-NT2-D õhu niiskuse ja temperatuuri logerit kasutati kuivatuskambris õhu niiskuse ja temperatuuri täppismääramisel.

### **Andmeloger (9 kanaliga, koos anduritega)**

AHLBORN Almemo 2890-9, 9-kanaliga andmeloger koos AHLBORN sensoritega MA28909, FQA 019C, FDA602S2K, FYA600CO2, FVA935TH5, FWA025T.

Puidu gaasilises faasis immutuse esialgsetes uuringutes kasutati kuivatusõhus süsihappegaasi kontsentratsiooni määramiseks sensorit FYA600CO2.

Madalatemperatuurilisel puidu kuivatusel kasutati puidu steriliseerimise probleemide esialgsetes uuringutes osooni (O<sub>3</sub>) kontsentratsiooni määramise sensorit FYA600O3.

Sensorit FQA019C (nn. soojavooplaat) kasutati esialgsetes uuringutes puidu kuivatusprotsessis soojusfüüsikaliste parameetrite (soojusjuhtivustegur, soojaülekangetegurid, temperatuurijuhtivustegur, U- arv jne.) määramiseks.

Survejõu sensoreid FKA002 (100N ja 200N) kasutati ultraheliseadmete elektromehaaniliste muundurite (saatja ja vastuvõtja) optimaalse survejõu taseme välja selgitamiseks. Erialakirjanduse andmetel suurendab juhusliku iseloomuga survejõud andmete varieeruvust, mille tõttu kannataks andmete usaldusvärsus.

Nihkesensorit FWA025T kasutati esialgsetes uuringutes puidu kuivatamisel kuivamisõhede detekteerimiseks.

Õhu kiiruse sensorit FVA935TH5 (nn. termo-anemomeeter) kasutati kuivatusõhu keskmise kiiruse määramiseks.

Suhtelise õhurõhu sensorit FDA602S2K (nn. dif-manomeeter) kasutati kuivatuskambri ja välisõhu õhurõhkude vahe mõõtmiseks.

Projekti raames soetatud seadmed leiavad edaspidi rakendust EMÜ Metsandus- ja Maaehitusinstituudi metsatööstuse osakonna uurimislaborites, teadusartiklitega seotud eksperimentides, samuti metsatööstuse osakonna üliõpilaste bakalaureuse, magistri- ja doktoritöödega seotud eksperimentides.

## **Metodoloogia**

Energiasäästu ja keskkonnanohiu seisukohalt perspektiivseid puidu kuivatamise režiime (nn. kuivatusplaane) uuriti suhteliselt madalatel kuivatustemperatuuridel 50°C ....60°C, ja temperatuuril 32°C. Nendest temperatuuridest viimane pidi modelleerima puidu atmosfäärilisel eelkuivatusel ja puidu päikesekuivatamisel valitsevaid tingimusi. Kuivatusprotsessis niiskuse migratsiooni, mehaaniliste näitajate,

kvaliteedinäitajate, ja energiakulu modelleerimiseks kasutati artiklis [ 1] kirjeldatud meetodikat. Madaldatud kuivatustemperatuuriga (50°C ....60°C) kuivatusplaanide läbi viimisel männipuiduga, tööstustingimustes ja laboritingimustes, leiti, et selles temperatuurivahemikus ei teki veel puidu temperatuurilise steriliseerimisega probleeme. Seevastu puidu steriliseerimise probleemid hakkasid ilmuma 32°C juures kuivatamisel, kuigi mudelarvutuses prognoositud energeetiline efekt oli suurem, kui 50...60 kraadi Celsiuse juures.

Puitmaterjali atmosfääriline eelkuivatus (ja ka päikesekuivatus) on looduslikes tingimustes raskesti juhitav ja kontrollitav. Seetõttu valiti protsessi modelleerimiseks madala temperatuuriline (32 °C) igakülgsest kontrollitav tehnilik protsess kliimakambris. (vt. joonis 4).



**Joonis 4.** Kliimakambri FEUTRON tööruumala sisevaade. (V. Tamme foto).



Täpsemalt on kogu metoodika kirjeldatud artiklites [ 1 ], käesoleva aruande lisas nr. 3 toodud artiklis, ja lisas nr. 1. toodud poster-ettekandes. Üllatuslikult selgus, et laialt kasutatavad puidu niiskusesisalduse mõõtjad on praktiliselt kalibreerimata puidu kiu küllastuspunkti niiskusest (ca 30% niiskusesisaldust puidu kuivkaalu suhtes), kuni kasvava puidu niiskuseni (näit. kuni 170 % männi maltspuidu jaoks). Niiskusmõõtjate kalibreerimise parandamise metoodika on esitatud lisas 3, kus on ära toodud ka vastavad korrektsioonivalemid kalibreerimise parandamiseks erinevate tööstuslikult kasutatavate kohalike puuliikide jaoks.

Puitmaterjali atmosfäärilisel eelkuivatusel on sagedaseks probleemiks puidu kahjustumine sineesentega, mis omakorda põhjustab materjali värvimuutusi ja kvaliteedi langust. Tegelikult on see puitmaterjali steriliseerimise probleem. Traditsioonilises kuivatusrežiimis on puidu kuivatis temperatuur tavaliselt üle 50 ° C, mis tagab lisaks puidu intensiivsele kuivamisele ka puitmaterjali steriliseerimise. Tõsi küll, aruande lisas 3 kirjeldatud laborikatsetes mikroorganismide esinemist visuaalsel vaatlusel ei täheldatud, kuid siin võis põhjuseks olla asjaolu, et katsekehi hoiti enne 2- 3 ööpäeva sügavkülmas -18 ° C juures, mis võis aidata kaasa katsematerjali steriliseerimisele. Projekti raames on soetatud mõõteaparatuur, mis võimaldab puitmaterjali steriliseerimise seisukohalt perspektiivseid füüsikalisi ja keemilisi mõjusid hinnata ja uurida. Antud valdkonnas on metsatööstuse osakonnas välja antud magistr töö teema, töö ise peaks kaitsmisele tulema 2013 a. kevadel.

Puitmaterjali vastasmõjusid elektriväljaga (elektrokineetilisi protsesse, s. h. elektroodefekte) käsitletakse käesoleva aruande lisas nr. 2. Mahukam artikkel samast valdkonnast on esitatud 14. sept. 2012 rahvusvahelisele eelretsenseeritavale teadusajakirjale „Wood Science & Technology“. Projekti raames soetatud kaasaegne teadusaparatuur võimaldab vajadusel artiklis esitatud seisukohti täpsustada, juhul kui artikli retsensendid peaksid seda nõudma.

Akustilise vastasmõju uurimiseks puitmaterjaliga on EMÜ MI metsatööstuse osakonnas välja antud kuus bakalaureuse töö teemat. Tööd ise peaks kaitsmisele tulema 2013 a. kevadel. Põhimõtteliselt oleks akustiliste meetoditega võimalik uurida puitmaterjalis kuivatamise protsessis tekkivaid mehaanilisi pingeid. Mehaaniliste tõmbe- ja survepingete määramine puitmaterjali kuivatamisel on võimalik vaid arvutisimulatsioonidega, rahuldavad eksperimentaalsed meetodid selle ülesande lahendamiseks kaasajal kahjuks puuduvad.

Puitmaterjali gaasilises faasis immutamise katsed viidi läbi elektrit mitte juhtiva immutusmaterjaliga, et vältida mõõtekanalites sisend-isolaatorite kvaliteedi langust. Gaasilises faasis puidu immutustehnoloogia uudsuse ja mitmesuguste kaasnevate autoriõiguse ja patendiõiguse aspektide tõttu seda teemat käesolevas aruandes põhjalikumalt ei käsitleta.

## Kokkuvõte

Suhteliselt madalate kuivatustemperatuuride kasutamine vahemikus (50°C ...60°C), ja atmosfäärilist eelkuivatust ja päikesekuivatust modelleeriv kuivatusplaan 32 °C on mõlemad energiasäästu ja keskkonnahoiu seisukohalt kahtlemata üsnagi perspektiivsed puidu kuivatamise tehnoloogiad.

Käesolevas lõpparuandes on juhitud tähelepanu põhimõttele, et triviaalne energiasäästu mudel võib ennast diskrediteerida, kui see toimub ilma teadusliku aluseta, ilma põhjaliku teadusliku uurimistööta. Pidades silmas Eesti Metsa- ja Puidutööstuse Liidu äsjases pressiteates (16. 01. 2013) toodud tootmismahutusi: „Eesti Metsa- ja Puidutööstuse Liidu pressiteade 16.01.2013 Metsa- ja puidusektoris saab tööd üle 30 000 inimese. Sektoris toodetav lisandväärtus on töötleva tööstuse suurim, ligi 400 miljonit eurot aastas. Puidupõhiste toodete eksport moodustab 1,4 miljardit eurot aastas, olles pea ainuke Eesti väliskaubandusbilansi tasakaalustaja.“, siis isegi väike energiasääst igas konkreetnes ettevõttes võib anda suure energiasäästu kogu tööstusharu lõikes. Mis puudutab keskkonnahoidu, siis ilmselt eksisteerib korrelatsioon metsa- ja puidutööstuses kulutatud energiahulga ja keskkonnakahjude vahel. Projekt Nr. 906 esimene etapp oma tagasihoidliku mahu ja lühikese kestusega, kahtlemata ei suuda hõlmata puidu kuivatamisel energiasäästu ja keskkonnahoiu kõiki aspekte.

Puidu atmosfääriline eelkuivatus kui null- energiaga protsess pakub energia hindade pretsedenditu kallinemise taustal kahtlemata huvi nii Eestis kui ka teistes arenenud puidutööstusega riikides, nagu näiteks Soome ja Rootsi. KIK Projekti Nr 906 toel töötati välja meetodika puidu niiskusemõõtjate mõõtepiirkonna laiendamiseks atmosfäärilise eelkuivatuse vajadustest lähtuvalt, ja tuletati vastavad korrektsioonvalemid. Probleemiks võib lugeda

puidu steriliseerimist atmosfäärilisel eelkuivatusel, probleemi lahendamine eeldaks edasist uurimistööd antud valdkonnas.

## **Kirjandus**

[1] Tamme, V. ; Muiste, P.; Mitt, R.; Tamme, H. Determination of Effective Diffusion Coefficient and Mechanical Stress of Pine Wood During Convective Drying. **Baltic Forestry**, v. 17, p. 110 – 118, 2011.

## **Lisad**

Märkus: esitatud lisad moodustavad lõpparuande lahutamatu osa.

Lisa 1. Poster-ettekanne konverentsil „Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine“ TARTU, 2012.

Faili nimi: Poster\_Tamme\_Estonia\_TEUK2012.ppt

Lisa 2. Poster-ettekanne konverentsil- 12th International IUFRO Wood Drying Conference „Challenges and Opportunities Related to Tropical Lumber Drying“. July 30 to August 03, 2012. Bélem, Para, Brazil.

Faili nimi: Poster\_Tamme\_Estonia.ppt

Lisa 3. Artikkel konverentsi „Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine“ TARTU, 2012. kogumikus.

Faili nimi: Art\_TEUK2012\_Tamme.pdf