

Metsätehon raportti 213
25.1.2010

ISSN 1459-773X (Painettu)
ISSN 1796-2374 (Verkojulkaisu)



Kosteuden online-mittaus
metsätähdehakkeesta

Uusiutuva metsäteollisuus -klusteri,
Lappeenranta Innovation Oy,
FIF Kasvu -projekti

Antti Korpilahti
Timo Melkas

METSÄTEHO OY

PL 101 (Snellmaninkatu 13)
00171 Helsinki
Puh. 020 765 8800
Faksi (09) 659 202
www.metsateho.fi

Kosteuden online-mittaus metsätähdehakkeesta

**Uusiutuva metsäteollisuus -klusteri
Lappeenranta Innovation Oy
FIF Kasvu -projekti**

**Antti Korpilahti
Timo Melkas**

Metsätehon raportti 213
25.1.2010

ISSN 1459-773X (Painettu)
ISSN 1796-2374 (Verkojulkaisu)

Asiasanat: bioenergia, hake, kosteus, kosteudenmittaus,
metsäenergia, online-mittaus

© Metsäteho Oy

Helsinki 2010

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	4
1 JOHDANTO	5
2 PUU MITATTAVANA MATERIAALINA	6
3 KOSTEUDENMITTAUKSEN TEKNIIKAT	9
3.1 Sähköiset mittaukset	9
3.2 Infrapuna ja mikroaallot.....	10
3.3 Radiometriset eli läpivalaisevat menetelmät	12
3.4 Ydinmagneettinen resonanssi	14
3.5 Akustiset menetelmät.....	14
3.6 Muut menetelmät	14
4 LUPAAVIMMAT TEKNIIKAT JA KEHITYSTARVE	17
4.1 Kosteudenmittauksen haasteet ja edellytykset.....	17
4.2 Mittausmenetelmien kehittäminen.....	18
5 MENETELMÄKEHITTÄJIÄ JA VALMISTAJIA	20
6 MARKKINAT	20

TIIVISTELMÄ

Puun kosteuden mittaukseen liittyy seikkoja, jotka ovat ongelmallisia kaikissa mittausten menetelmissä. Puun ja sen osien ainetiheys vaihtelee, lumi ja jäinen olomuoto aiheuttavat ongelmia ja hakkeen tai murskeen palakoko vaikuttaa mittaustuloksiin. Kehittyneilläkin mittausten menetelmillä ei saada aivan tarkkoja tuloksia. Toisaalta ”yksinkertaisillakin” menetelmillä, kuten tilavuuspainomittauksella, voidaan päästä vähintään yhtä hyviin tuloksiin. Käytännöllisesti katsoen kaikki kosteuden mittausten menetelmät edellyttävät materiaalilajin tunnistusta. Se tarvitaan kalibrointia varten lukuun ottamatta varsinaista kuivatus- ja punnitusmenetelmää.

Varsinaisten online- tai inline-mittausten vaihtoehtona voidaan mitata toistuvasti sivuvirrasta tai näytteistä. Kun tulokset saadaan nopeasti, prosessia voidaan ohjata niiden perusteella.

Suomessa on erityisen hyvä tietopohja ja osaamista hakemaisten aineiden kosteuden mittaustekniikoiden kehittämiseksi. Mikroalto- ja ydinmagneettiseen resonanssiin perustuvien menetelmien pilotointi on jo käynnissä tai alkamassa.

Tämä huomioon otettuna nyt pidetään tärkeänä, että myös seuraavia menetelmiä voitaisiin saada pilotointiin.

Gammamittaus – laitteita on kuljetushihnoilla massavirran mittauksessa. Säteilyn vaimeneminen korreloi kosteuden kanssa. Kosteus voidaan määrittää, kun hakepatjan paksuus mitataan.

Tilavuuspainomittaus – kuljetushihnalta massavirta punnitaan hihnavaa’alla ja tilavuus määritetään laser- ja kamerakuvatekniikan avulla. Tilavuuspaino korreloi hakkeen kosteuden kanssa.

Impedanssispektroskopia – on saatu lupaavia tuloksia, kun käytettiin uutta anturitekniikka ja laskentaa kehitettiin. Mahdollisuuksia jäisenkin aineen mittaamiseen.

NIR – menetelmässä on kehityspotentiaalia erityisesti online-mittaukseen: taajuuskaistavalinnat, detektorit ja suomalainen analyysilaskennan osaaminen

RGB-analyysi – käytännössä on toteutettu kosteuden mittaus ja tuloksen esittäminen indeksinä. Menetelmän kyky kosteuspiitoisuusmittarina pitäisi testata.

MMS-kapasitiivianturi – anturia käytetään nyt puuperäisten aineiden kuivaamisen tarkkailussa ja toisaalla lietteiden kuiva-ainemäärityksissä. Anturin toimivuus tuoreiden metsähakkeilla pitäisi testata.

Autokuormien tilavuuspainomittaus – voimalaitospolttoaineita koskeudessa tutkimuksessa todettiin vahva korrelaatio tilavuuspaino ja kosteuden välillä. Pitäisi tukia, missä olosuhteissa tilavuuspainosta voitaisiin johtaa myös kosteus.

1 JOHDANTO

Puun kosteustietoa tarvitaan monessa erilaisessa yhteydessä koko hankinta- ja jalostusketjussa. Energiapuun kosteustieto tarvittaisiin jo metsävaiheessa korjuun yhteydessä ja valittaessa käyttöpaikalle toimitettavia eriä. Kosteustiedon avulla voitaisiin laskea korjatun materiaalin kuiva-ainemäärä ja energiasisältö. Metsävaiheen osalta on jonkin verran käytössä materiaalin punnitus kuormainvaa'alla ja punnitustiedon muuntaminen arvioidulla tai kokemusperäisellä kuutiopainoluvulla tilavuudeksi. Tuoreen tavaran kosteudelle saadaan melko hyvä arvio, mutta eri määrin kuivahtaneen tavaran osalta arvio on epätarkka.

Teollisuushakkeen kauppa on pitkään perustettu kuiva-aineen määrään ja voimalaitoksilla energiapuu hinnoitellaan energiasisällön mukaan. Hakkeesta tai muulla tavoin murskatusta materiaalista otetaan kuorman purkamisen yhteydessä näytteitä ja kosteus määritetään uunikuivauksella. Menettely on työlästä, näytteen edustavuuteen saattaa liittyä epävarmuutta ja tuloksen saaminen kestää noin vuorokauden. Tulosta ei voi käyttää prosessin säädössä, eikä voimalaitoksilla polttoaineen syöttökuljettimilla edes ole kosteuden online-mittauksia.

Kun energiapuun käyttö on lyhyellä aikavälillä merkittävästi lisääntynyt ja käyttäjinä on suuria voimalaitoksia, nopean kosteusmittauksen tarve on suuri ja kehittämiseen panostamiselle on aiempaa paremmat mahdollisuudet. Viime vuosina tätä kosteusmittauksen problematiikkaa on pohdittu yhdessä metsä- ja insinööritieteiden asiantuntijoiden kanssa, ja erilaisia ratkaisumahdollisuuksia on tutkittu. Luotettavan mittauksen ongelmana on erityisesti talviaika eli kosteuden luminen ja jäinen olomuoto. Uusimmat tutkimukset kuitenkin osoittavat, että kehittyneillä mittaustekniikoilla ja analyysimenetelmillä voidaan päästä tyydyttäviin tuloksiin myös talviakana.

Puun kosteudesta käytetään käsitteitä kosteus ja kosteussuhde. Kosteudella tarkoitetaan veden osuutta kokonaismassasta ja sitä käytetään yleisesti puunhankinnan yhteydessä, myös puupolttoaineiden kosteudesta. Kosteussuhde puolestaan on usein puutieteessä ja puunjalostuksessa käytetty veden ja puun kuivamassan suhde.

Kosteuden ja kosteussuhteen yhteys on seuraava:

Kosteus, %	Kosteussuhde, %
20	25
25	33
30	43
35	54
40	67
45	82
50	100
55	122
60	150

Mittareilla tehtävä kosteuden nopea määrittäminen voi perustua sähköisiin ominaisuuksiin, säteilymittauksissa vaimenemiseen, aallonpituuden tai vaihekulman muuttumiseen, ydinmagneettiseen resonanssiin ja jopa akustisiin mittauksiin. Puu on kuitenkin varsin hankala materiaali mitattavaksi. Sen sähköiset ominaisuudet muuttuvat erilaisiksi kun on saavutettu ns. puun syiden kyllästymispisteen kosteus, mikä on varsin alhainen. Puun tiheys vaihtelee ja se tulisi tunnistaa ja pystyä erottamaan kosteuden muutoksista. Jopa puun syysuunta vaikuttaa merkittävästi. Veden jäinen ja luminen olomuoto aiheuttavat ongelmia. Useat mittaustekniikat ovat muutoinkin herkkiä mitaustilanteen lämpötilalle.

Tässä selvityksessä kuvataan hakemaisen hakkuutähde- yms. materiaalien kosteuden mittaukseen liittyviä ominaisuuksia ja mittaustekniikoita. Mittaustekniikoista pyritään esittämään potentiaalisimmat online-menetelmät ja suuntaviivoja niiden kehittämiseksi. Selvityksen tietolähteinä on hyödynnetty alaan liittyviä julkaisuja, asiantuntijakeskusteluita ja valmistajien tietoja niitä kuitenkaan yksilöimättä.

Mitattavat kosteudet vaihtelevat pääosin seuraavissa rajoissa

- teollisuushake 40–60 %
- metsäenergia 30–60 %
- pellettituotannossa alle 10–15 %
- biojalostetuotannossa 5–40, (raaka-aineet ...60 %)

2 PUU MITATTAVANA MATERIAALINA

Puun syiden kyllästymispiste tarkoittaa suurinta kosteutta, minkä puu voi saavuttaa ilman vesihöyrystä jossakin lämpötilassa kun höyrynpaine on yksi. Kyllästymispistettä on ehdotettu kuvattavaksi siten, että silloin puun soluseinämät ovat veden kyllästämiä mutta soluontelot ovat vielä avoimia. Kyllästymispisteen mukaista kosteutta ei voida suoraan mitata, mutta se on puulla noin 25-30 % kosteudessa (ja riippuu ulkoisista olosuhteista).

Toinen merkittävä puun kosteuden tila on maksimaalinen kosteus, joka tarkoittaa suurinta mahdollista kosteutta, minkä puu voi sitoa. Silloin soluontelotkin ovat täysin veden täyttämiä. Kun puu kuivuu, ensin poistuu tämä vapaa vesi. Maksimaalinen kosteus riippuu puun tiheydestä. Mitä alhaisempi puun tiheys on (nopeasti kasvanut, suuret vuosilustot, vrt. esimerkiksi tiheälustoinen oksapuu), sitä enempi puu kykenee sitomaan vettä. Käytännössä havupuilla tuoreen pintapuun kosteus on noin 80 % suurimmasta mahdollisesta.

Sähköisiin ominaisuuksiin perustuvat mittarit reagoivat kosteuden muutoksiin melko hyvin kyllästymispisteeseen asti. Tarkkuus huononee, kun mitattavan puun kosteus on puun syiden kyllästymispisteen kosteutta suurempi ja lähestyy maksimaalista kosteutta. Suuressa kosteudessa sähköiset ominai-

suudet eivät enää muutu selvästi. Kosteus ei kehity edes kyllästymispisteseen asti lineaarisesti.

Puun ominaisuudet, kuten puuaineen tiheys, kuoren osuus ja kosteus, vaihtelevat puun eri kohdissa ja puiden välisesti. Kosteuteen liittyen on erityistä se, että havupuilla on kuollutta solukkoa käsittävä melko kuiva sydänpuu ja elävän solukon muodostama kostea pintapu. Oksapuussa on vähän sydänpuuta, samoin pienikokoisissa puissa ja latvoissa. Lehtipuilla ei ole selvää kosteuseroa puun pinta- ja sisäosan välillä.

Männyn pintapuun kosteus on 55–60 mutta sydänpuun vain 24–27 %. Kuusella kosteudet ovat samaa suuruusluokkaa tai hiukan korkeampia. Koivulla koko puuaineen kosteus on noin 40–45 %.

Puun kyky sitoa kosteutta riippuu puun tiheydestä ja tiheydellä on muutoinkin merkitystä useissa mittaustilanteissa. Mittausvasteesta tulisi erottaa se, mikä johtuu materiaalin tiheysvaihtelusta ja mikä kosteudesta. Yleisimmin käytetty puun tiheyden suure on kuiva-tuoretiheys ja sen yksikkö kg/m^3 . Kuivatuoiretiheydessä materiaalin massa on kuivana ja tilavuus on tuoreen materiaalin kiintotilavuus. Hakkeen tyyppinen tiiviys on 40 % kiintotilavuudesta. Seuraavassa esitetään suuntaa antavia eri puulajien ja puunosien tiheyslukuja.

Puun kuiva-tuoretiheys, kg/m^3

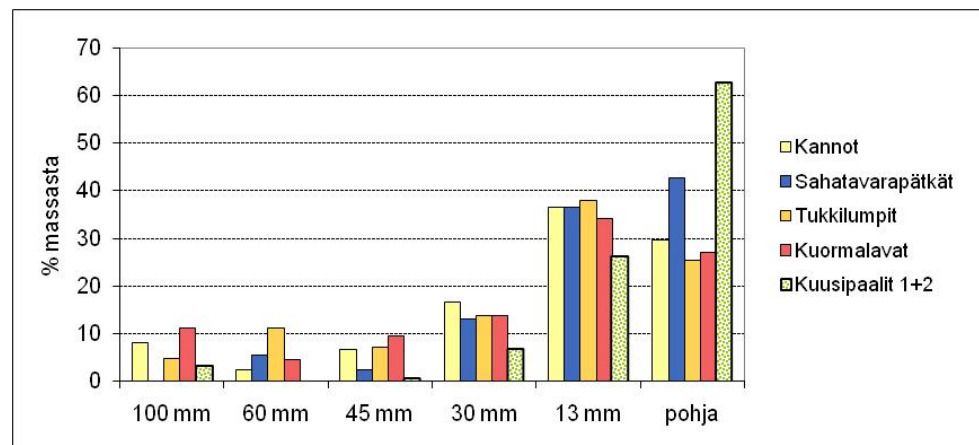
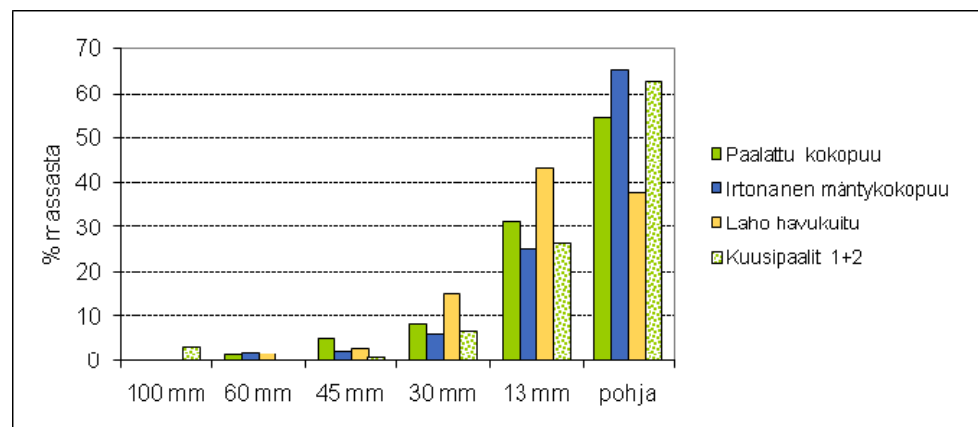
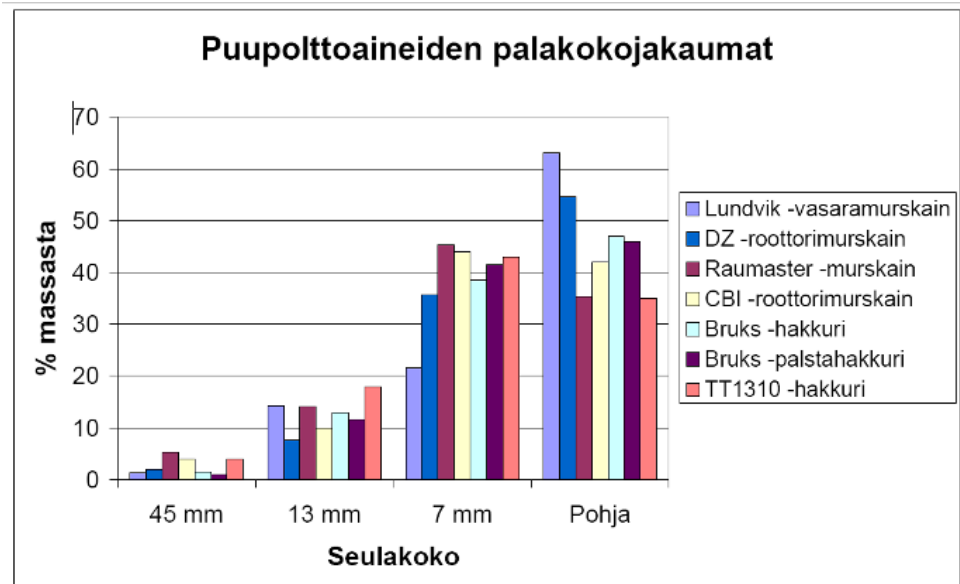
	Latvaosa	Kantopuu	Oksat	Kuori
Mänty	360–380	470	500	260–300
Kuusi	400–420	400	600	365
Koivu	490	490	510	500

Eräs puun rakenteellinen ominaisuus, jolla voi olla merkitystä mittauksissa, on vuosilustorakenne. Varsinkin havupuilla voidaan erottaa nopean kasvuvaiheen kevätpuu ja kasvukauden myöhemmässä vaiheessa syntyvä kesäpuu. Esimerkiksi männyn kevätpuun tiheys on 300–370 kg/m^3 mutta kesäpuun tiheys 810–920 kg/m^3 . Kun tiheyserot ovat noin suuret, herää kysymys, että voidaanko tietoa käyttää vaikka materiaalin tunnistamisessa ja edelleen mittausjärjestelmän automaattisessa kalibroinnissa.

Materiaalin lisäksi myös murskaus tai haketustekniikka vaikuttaa mitattavan aineen ominaisuuksiin, kuten palakokojakaumaan, ja siten mittaukseen. Usein tasalaatuinen, melko pieni palakoko edistää luotettavaan mittaustulokseen pääsemistä. Ääripäitä voivat edustaa kuoritusta puusta tuleva sahanpuru ja palakooltaan hyvin vaihteleva hakkuutähdemurske.

Seuraavassa kuvissa esitetään kahdessa tutkimuksessa määritettyjä puupolttoaineiden palakokojakaumia. Ensimmäisessä kuvassa on haketettu ja murskattu hakkuutähdettä erilaisilla murskaimilla ja palakokojakauma on määritetty selluhakkeen seulontastandardin mukaan. Kahdessa seuraavassa kuvassa on murskattu samalla murskaimella erilaisia materiaaleja. Kyseessä oli

suuritehoinen, leikkaavilla teräpaloilla varustettu murskain lämpövoimalaitoksella. Palakokojakauma on määritetty silloin käyttöön tulleen puupolttoaineiden laatuohjeen mukaan, ja siksi luokitus poikkeaa ensimmäisen kuvan lukituksesta. Materiaalilaji kuusipaalit tarkoittaa paalattua hakkuutähdettä, ns. risutukkeja.



Edellä esitetystä käy ilmi, että materiaalin ominaisuudet riippuvat mm. puulajista ja siitä, mistä puun osasta on kyse. Siten kosteudenmittauksessa tulee usein välttämättömäksi mitattavan materiaalin tunnistaminen ja mittausmenetelmän säätö (kalibrointi) materiaalille sopivaksi. Voidaan myös päätellä niin, että eri materiaaleilla tulosten luotettavuus vaihtelee.

3 KOSTEUDENMITTAUKSEN TEKNIIKAT

3.1 Sähköiset mittaukset

Vastuksen mittaukseen perustuvilla kosteusmittareilla voidaan mitata puun syiden kyllästymispisteeseen asti. Mittaus tapahtuu kosketuksen kautta, esimerkiksi aineeseen työnnettävillä piikkielektrodeilla. Lämpötila vaikuttaa tulokseen, samoin puun syysuunta. Tämä tekniikka soveltuu lähinnä kuivan tavarahan, kuten puutavaran, kosteudenmittaukseen ja sitä käytetään myös vaneriviulun mittaukseen, jolloin anturit ovat harjamaiset.

Dielektrisyysmittaus on kapasitiivinen mittausmenetelmä jossa määritetään aineen dielektrisyysvakion suuruus. Dielektrisyysvakio selitetään siten, että se osoittaa sen, kuinka suureksi kondensaattorin kapasiteetti kasvaa ilmaristeisen kondensaattorin kapasiteettiin verrattuna, jos sen levyjen väli täytettäisiin tutkittavalla aineella. Veden dielektrisyysvakio on 80, kuivan puun 2,5–6,8 ja esimerkiksi paperilla se on 2. Puun kosteutta voidaan mitata noin 50–60 % kosteuteen (100–150 % kosteussuhteeseen) asti. Tarkkuus kuitenkin heikkenee kun kosteus kasvaa yli puun syiden kyllästymispisteen. Jäisen puun kosteutta ei voida määrittää siksi, että jään dielektrisyysarvo on samansuuruinen kuin puulla.

Esimerkkinä biopolttoaineillekin sovelletusta kapasitiivisesta mittarista on saksalaisvalmisteinen MMS-kosteusanturi (edustaja Hantor-Mittaus Oy).

Kosteusmittaus sijoitettuna siirtoruuvin pohjaan (valkea osa, osittain näkyvässä). Siirtoruuvi tiivistää mitattavan materiaalin vakiotiheyteen. Mittauskapasitanssi muuttuu tämän jälkeen vain kosteuden mukaan.

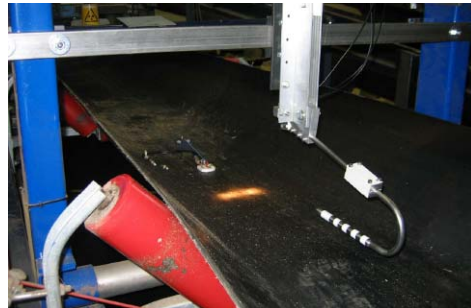


Anturi voidaan sijoittaa esimerkiksi hihnakuljettimelle, siilon sisään tai virtausputkeen, jossa anturi on kosketuksessa mitattavaan materiaaliin. Rakenne on kulutusta kestävä. Mittauksessa aineeseen muodostetaan korkeataa-

juinen sähkökenttä, esimerkiksi 15–30 MHz. Mittaussyvyydeksi ilmoitetaan 10–15 cm. Tätä anturia käytetään myös kosteuden mittaukseen näytteestä. Kokoonpuristuva, esimerkiksi purumainen materiaali puristetaan mittauslaitteistossa vakiotilavuuteen (-tiheyteen) ja lisäksi voidaan käyttää lämpötilan mittausta ja automaattista lämpötilakompensointia. Tätä anturia on asennettu Suomeen kahteen puupolttoaineen käsittelyjärjestelmään, pellettituotantoon ja polttoaineen kuivuriin. Näissä ratkaisuissa mitataan kuivattua materiaalia kosteusalueella 10–40 %. Anturi on asennettu ruuvikuljettimen kourun alapintaan.

Impedanssispektroskopia on menetelmä, jossa tutkittavaan aineeseen luodaan elektrodien avulla vaihtuva sähkökenttä useita eri taajuuksia käyttäen. Taajuudet ovat matalia, noin 1 MHz:iin asti. Mittauksessa analysoidaan tutkittavan kohteen rakennetta siitä saatavan vastespektrin ja mallinnuksen avulla. Menetelmää on tutkittu laboratoriossa sekä kiinteällä että haketetulla puumateriaalilla. Menetelmä on kiinnostava, koska sillä saadaan havaintoja pintaa syvemmilläkin.

Hakkeiden kosteudenmäärittystä impedanssimittauksen keinoin tutkittiin hiltajain (M. Tiitta, Itä-Suomen yliopisto). Tutkimuksessa rakennettiin uusi 4-elektrodinen mittaussondi, joka ui hakevirran sisässä. Tutkimuksessa kokeiltiin lisäksi uutta pinta-anturia ja kalvoanturia ja kapasitiivisia levyelektrodeja. Todettiin, että mittaus on hyvin taajuusriippuvainen mutta spektrianalyysien avulla kosteudet saatiin jäisten hakkeiden sulamisen eri vaiheissakin. Mittaus onnistui hakevirrasta hyvin.



3.2 Infrapuna ja mikroaallot

Infrapunaan, erityisesti lähi-infrapunaan (NIR) perustuvia mittaustekniikoita on tutkittu ja kehitetty runsaasti, koska tietyillä aallonpituuksilla tapahtuu voimakas absorboituminen kosteuden vuoksi. NIR-tekniikalla saadaan mitatuksi jossain määrin myös jäätyneitä vettä. Optisena menetelmänä kyseessä on pintamittaus, jossa tunkeuma on vain muutamia millimetrejä. Materiaalin lämpötila vaikuttaa tulokseen ja on siksi mitattava ja otettava huomioon. Kehittyneitä tekniikkaa edustavat rividetektorit, joilla voidaan mitata koko spektrin alue jopa 512 aallonpituudelta. Suurta mittausinformaatiota voitaneen hyödyntää kosteustulkinnan ohella mitattavan materiaalin laadun tunnistamisessa. Menetelmässä on kehityspotentiaalia em. rividetektorien ja niiden materiaalivalinnan ansiosta.



Kuvassa VTT:llä rakennetulla NIR-laitteistolla tutkitaan hakkuutähdehakkeen kosteuden mittausta kuljetinhihnalta.

Ruotsissa on valmistettu prototyypimittalaite, jossa puutavaranosturiin kiinnitetty NIR -sondi työnnetään hakekuorman sisään. Tutkimuksissa havaittiin suurta vaihtelua eri kohdissa kuormaa. Kun mitattiin 4 tai 6 kohtaa, niin saadut kosteusarvot vaihtelivat yli 10 %-yksikköä noin puolessa tapauksista. Johtopäätöksenä arvioitiin, että perinteiseen manuaaliseen näytteenottoon liittyy suuri virheriski ja että useasta kohdasta kuormaa otetuilla NIR-mittauksilla saataisiin tarkempi tulos.



Mikroaaltomittauksessa mitataan aaltojen vaimenemista, taajuuden tai etenemisnopeuden muutosta tai vaihesiirtoa. Mittaus perustuu materiaalin dielektrisiin ominaisuuksiin ja siinä mitataan dielektrisyysvakio. Menetelmällä ei voida mitata luotettavasti jäistä puuta, koska jään ja puun dielektrisyysvakiot ovat samansuuruiset. Muutoin kosteuden mittausalue on laaja, 25 %:sta ylöspäin. Puun syiden suunta ja epäjatkuvuudet vaikuttavat. Kuivemmalla materiaalilla mikroaalloilla on suurempi läpäisy kuin kostealla, koska vesi absorboi säteilyä. Lämpötila vaikuttaa mittaustulokseen ja tulisi vakioita tai ottaa kalibroimalla huomioon.

Koska mikroaallot ovat huomattavasti infrapuna-aaltoja läpäisevämpiä, niin usein mikroaalloilla pyritään mittaamaan läpäisymittauksena. Tuoreella

puulla mittauspaksuus (läpäisy) noin 5–10 cm taajuudesta riippuen (15 ja 5 GHz). Mikroaaltotekniikassa käytetään erilaisia taajuuskaistoja, esimerkiksi vaimenemiseen perustuvassa kosteusmittauksessa 22,2 GHz.

Mikroaaltomittausta on kehitetty myös hakkeelle ja erään kotimaisen laitevalmistajan on tarkoitus julkistaa aivan lähitulevaisuudessa laiteratkaisu näytteistä tehtävään nopeaan kosteusmittaukseen. Mittauksessa käytetään vakiosuuruista näytettä. Mikroaaltomittauskin pitää kalibroida mitattavalle materiaalille, ja esimerkiksi kuljetushihnalta mitattaessa materiaalipatjan paksuus on mitattava, jotta mittaussignaali voidaan tulkita oikein. Erillisistä näytteistä tehtäville mittauksille vaihtoehtoinen keino on määrittää kosteutta jatkuvasti sopivan suuruisesta sivuvirrasta, joka pidetään vakiona tai mitataan sen paksuutta ja lämpötilaa. Jäinen materiaali pitäisi sulattaa mittausta varten.

3.3 Radiometriset eli läpivalaisevat menetelmät

Röntgen- ja gammasäteilyn avulla mitataan kohteen tiheyttä. Jotta kosteuden ja materiaalin tiheyden aiheuttama säteilyn vaimentuminen voidaan erottaa toisistaan, tulee tuntea mitattavan aineen tiheys ja tiheysvaihtelut.

Röntgen- ja gammasäteily ovat ionisoivaa sähkömagneettista säteilyä. Röntgensäteilyä tuotetaan röntgenputkella ja gammasäteilyä ionisoivilla isotoopeilla, kuten Amerikium-241 ja Cesium-137. Röntgen- ja gammasäteily edellyttävät säteilyturvallisuuden varmistavia rakenteita ja laitteistosijoituskia. Usein näitä ratkaisuja käytetään suurivolyymisissä käyttötilanteissa.

Ruotsalainen Mantex Ab esittelee kahden eri energiatason röntgensäteilyn käyttöön perustuvaa laitetta hakkeen kosteudenmittaukseen. Puun ja veden massavaimennuskertoimet ovat kuitenkin niin lähellä toisiaan, että suomalaiset asiantuntijat epäilevät menetelmän suorituskykyä polttihakkeen kosteuden mittauksessa. Toinen näkökohta on se, että röntgentekniikkaa on yleensä käytetty kohteen skannaavaan tutkimiseen, kuten puulla tukkiröntgeninä.

Gammasäteilyä on käytetty kuljetushihnoilla massavirtojen mittaamisessa. Kun mitattava aine on tasalaatuista, niin säteilyn vaimeneminen selittää materiaalipatjan massaa säteilykeilan läpäisykohdassa. Lisäksi mitataan hihnan kulku, jolloin massavirta saadaan lasketuksi. Laitteita käytetään sekä teollisuushakkeen että polttoaineiden syöttökuljettimilla massavirtamittauksissa.



Hakkeen massavirtamittaus gammasäteilyn avulla. Sama mittauslaitteisto voitaisiin kalibroida kosteudenmäärittämiseen.

Kosteudenmäärittystä gammamenetelmällä teollisuus- ja hakkuutähdehakeilla hakenäytteistä ja hihnalta on tutkittu useaan otteeseen. Menetelmällä voitiin mitata jäistäkin materiaalia, sillä siitä aiheutunut virhe oli pieni. Mittauksessa on mitattava ja otettava huomioon mitattavan materiaali- ja paksuus, ja mittausjärjestelmä on kalibroitava mm. palakokoon ja materiaalityypin mukaan. Tässäkin menetelmässä kriittinen seikka on materiaalityypin tunnistaminen järjestelmän kalibrointia varten. Erityisesti palakoko- ja kauman merkitys on suuri, jos puuaineen ominaisuuksien vaihtelevuus on suuri.

Viimeisimmissä gammatutkimuksissa (VTT) todettiin vahva korrelaatio kosteuden ja materiaalin tiheyden (hakkeen tiivyyden) välillä. Siksi tiheysmittausta voidaan tulkita myös kosteuden suhteen. Vastaava korrelaatio on todettu aiemmin hakekuormien tutkimusten yhteydessä.

Neutroniaktivaatioanalyysi on gammaspektroskopiaan perustuva menetelmä, jolla tutkitaan aineen koostumusta. Neutroneja tuotetaan isotoopeilla tai neutronigeneraattorilaitteella. Neutronit törmäävät tutkittavassa aineessä sen atomiytimien kanssa ja tapahtumassa emittoituu kullekin alkuaineelle ominaisia gammapulsseja. Siten aineen koostumus voidaan määrittää ja alkuaineiden suhteista voidaan laskea veden määrä. Veden olomuodolla ei ole merkitystä, eli tällä menetelmällä saadaan myös jäätyneen puun kosteus määritetyksi.

Menetelmän toimivuutta puun kosteudenmittausta varten on vasta tutkittu ensimmäisiä kertoja (Jyväskylän yliopisto ja VTT). Neutronilähteenä käytettiin Californium-252 isotooppia. Hakenäytteelle ei saatu tuloksia lähinnä koejärjestelyiden ja paikasta johtuvan taustasäteilyn vuoksi. Kuitupuulla mittauskohteena oli autokuorman nipun suuruisia kuitupuueriä ja mittauspaikka tehdasaluetta vastaava lähes avoin tila ja tutkimus onnistui. Tällä menetelmällä voitaisiin siis määrittää murskaamattomienkin materiaalien kosteus ja ainepitoisuuksia. Kun menetelmässä käytetään neutronigeneraattoria, niin saadaan suuri neutronivuo ja vain silloin, kun mitataan. Se helpottaa säteilyturvallisuuteen liittyviä järjestelyjä. Lisäksi mittausnopeus on riittävän suuri online-mittaukseen. Menetelmän kehitystyö on vasta alussa ja

laitteetkin ovat vielä melko kalliita. Menetelmää koskevia tutkimuksia tulisi jatkaa ja päästä pilotlaitteiston rakentamiseen todellisiin olosuhteisiin, aluksi kuitenkin pöllimäisen kuitupuun ja murskaamattomien materiaalien mittaamiseksi.

3.4 Ydinmagneettinen resonanssi

Ydinmagneettinen resonanssi perustuu molekyylien käyttäytymiseen homogeenisessa magneettikentässä kun siihen kohdistetaan (radiotaajuista) sähkömagneettista säteilyä. Menetelmä soveltuu varsinkin paljon vetyä sisältävien materiaalien analysointiin. Mittausalue on laaja ja kohteen tiheys tai kemialliset erot eivät paljoa vaikuta. Varsinaisilla magneettikuvauslaitteilla voidaan tuottaa tietoa kosteuden jakautumisesta kohteessa. Veden jäinen olomuoto on tälläkin menetelmällä haasteellinen määritettävä ja sitä tutkitaan parhaillaan.

Viime vuosina on kehitetty ns. kevyempiä, liikuteltavia, NMR -analysointilaitteita, joilla on tutkimuksissa mitattu mm. puun keskimääräistä kosteutta. Asiantuntijat arvioivat kyseisen tekniikan pistemäisen mittausominaisuutensa ja magneettikentän pinnallisuuden vuoksi soveltuvan huonosti hakkeen online-mittaukseen. Sen sijaa magneettikentän sisään asetettavasta näytteestä kosteutta mittaavaa laitetta on kehitetty ja siinä on edetty pilotointivaiheeseen. Pilotointi tultaneen tekemään Cleen Oy:n t&k-ohjelmien puitteissa.

3.5 Akustiset menetelmät

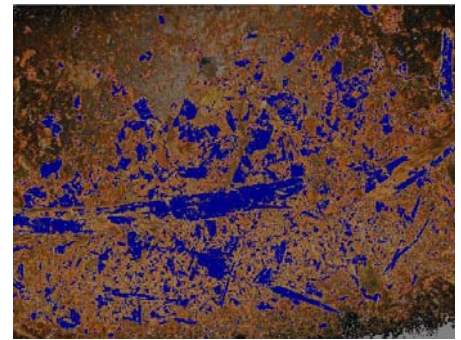
Eräässä tutkimusprojektissa kokeiltiin (M. Tiitta, Itä-Suomen yliopisto, ent. Kuopion yliopisto) akustisen emission mittausta hakevirrasta. Tuloksista arvioitiin, että tekniikasta voisi olla apua esimerkiksi materiaalilajin tunnistuksessa, vaikka yhdistettynä impedanssimittaukseen. Menetelmä voisi yksinkin antaa käyttökelpoista kosteustietoa varsinkin puun syiden kyllästymispisteen alapuoliselta kosteusalueelta. Akustisen emission käyttö tässä tarkoituksessa (murskatulla materiaalilla) on aivan uutta, joten siitä ei ole paljoa tutkimustietoa. Voidaan kuitenkin arvioida, että sen tarkkuus ei ole aivan yhtä hyvä kuin sähkömagneettisilla sovelluksilla.

Ultraääntä on käytetty materiaalien lujuusominaisuuksien ja vikoja tutkimisissa. Sitä sovelletaan yleisesti erilaisiin etäisyysmittauksiin, esimerkiksi hakepatjan etäisyys/paksuus-mittauksissa. Märän hakkeen pinnanmäärityksessä on tosin ilmennyt ongelmia, ja tuloksen varmistamiseksi on käytetty levyheijastinta hakepatjan pinnassa.

3.6 Muut menetelmät

Teknosavo Oy on kehittänyt kuljetushihnalta tehtävään teollisuushakkeen laadun seurantaan **RGB-kuvaukseen** perustuvan hakkeen kosteuden moni-

toroinnin. Laitetta ei ole varsinaisesti kalibroitu tuottamaan kosteusprosentteja, siksi sen yhteydessä puhutaan kosteusindeksistä. Ilmeisesti näkyvän valon alueella oleva värikuvauskin omaa potentiaalia sopivissa olosuhteissa kosteuden määrittämiseksi. Tekniikalla on potentiaalia myös materiaalilajien tunnistamisessa. Siihen perustuen seurataan kuitupuukuorimoissa pölkkyjen kuoriutumisasastetta ja toisaalta kuorivirran puuainespitoisuutta.



Kuvissa ylinnä hakkeen kosteuden ja palakoon seuranta, keskellä kuorivirran puupitoisuuden seuranta ja alinna pölkkyjen kuoriutumisen seuranta

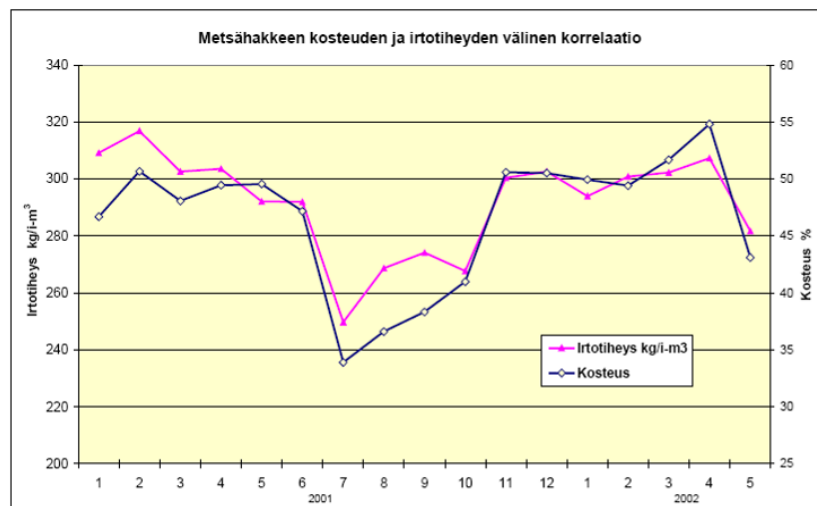
Hakkeen kosteus voitaisiin määrittää hakkeen **palakokoanalysaattoria ja punnitusta** hyödyntäen. Otetaan hake- tai murskenäyte, punnitaan ja mitataan hakkeen palakokoanalysaattorilla tilavuus, jolloin saadaan näytteen tuoretilavuuspaino. Kun tunnetaan kyseessä olevan materiaalin kuivatuoretilavuuspaino, niin voidaan laskea näytteessä olevan veden määrä ja kosteusprosentti. Tarvittaessa voitaneen seuloa aivan pieni aines (ehkä alle 1 mm rakeet) pois, jos se häiritsee palakokomittausta. Oletetaan, että hienoaines on saman kosteista kuin mitattava osa, ja lisäksi hienoa on niin vähän, että se ei vaikuta tarkkuuteen.



Kuvassa hakkeen palakokoanalysaattori ja hakevirtaa.

Puun kuivapainosta ei ole kattavia tietoja. Kosteuksenmittausta varten tulisi määrittää kuivapainot puulajeittain ja puunosittain (hakelaaduittain), jotta tunnetaan niiden suuruus ja vaihtelu. On syytä huomata, että puuaineen tiheysvaihtelu on mukana kaikissa muissakin kosteusmäärittämissä, joten tämä tilavuuspainoihin perustuva menetelmä ei ole tässä suhteessa muita epätarkempi.

Edellä gammamittauksen yhteydessä esitettiin, että hakkeen tiheys korreloi kosteuden kanssa. Vastaava määrittäminen voidaan tehdä autokuormista hakkeen **tilavuuspainon** (irtotiheyden, kg/m^3) perusteella. VTT:n tutkimuksessa voimalaitospolttoaineiden ominaisuuksista 2001–2002 todettiin selvä korrelaatio hakekuorman tiivyyden ja kosteuden välillä, vaikka aineisto sisältää materiaalin ominaisuusvaihtelua ja kuormien tilavuusmäärittäksen epätarkkuutta.





Hakekuorman tilavuuden määrittystä laserskannauksen avulla.

Kuorman tilavuus voidaan määrittää tarkasti konttien mittojen ja kuorman yläpinnan laser- tai kamerakuvauksen avulla. Kuormathan punnitaan ainakin suurilla laitoksilla joka tapauksessa.

Tilavuuspainon online-määrittämiseen kuljetushihnalta perustuva kosteudenmittaus sisältäisi punnituksen hihnaväylällä ja tilavuuden määrittämisen laserkuvauksen avulla. Jos laitoksessa jo on gammamittaus tai hankitaan siihen perustuva hihnaväylä, niin tilavuuspainomittauksen rinnalle voidaan toteuttaa gammamittauksen tuottama tiheyteen perustuva kosteustieto.

4 LUPAAVIMMAT TEKNIIKAT JA KEHITYSTARVE

4.1 Kosteudenmittauksen haasteet ja edellytykset

Puun kosteuden mittaukseen liittyy seikkoja, jotka ovat ongelmallisia kaikissa mittausmenetelmissä. Puun ja sen osien tiheys vaihtelee, puun kyky sitoa kosteutta riippuu puun tiheydestä, lumi ja jäinen olomuoto ovat mittauksissa vaikeita. Lisäksi hakkeen tai murskeen palakoko vaikuttaa hakepatjan tiivyyteen ja mittaustuloksiin. Kehittyneilläkin mittausmenetelmillä, esimerkiksi läpäisevään säteilyyn perustuvilla, ei saada aivan tarkkoja tuloksia. Toisaalta tilanne antaa perusteltua aiheutta kehittää myös ”yksinkertaisiin” keinoihin, kuten tilavuuspainoon perustuvia mittausmenetelmiä, ja niillä voidaan päästä vähintään yhtä hyvään tulokseen.

Koska useat mittaustekniikat edellyttävät lähes vakioituja mittauso-oloja, niin koko materiaalivirran jatkuvan on- tai inline-mittauksen vaihtoehtona voidaan mitata toistuvasti sivuvirrasta tai näytteistä. Tulokset pitää saada niin nopeasti, että prosessia voidaan ohjata niiden perusteella. Tämä on nykyisillään analyysitekniikoilla mahdollista.

Yksi kehitettävä asia on **materiaalilajin tunnistus**. Se tarvitaan kalibrointia varten kaikissa kosteuden mittausmenetelmissä, lukuun ottamatta varsinaista

kuivatus- ja punnitusmenetelmää. Omiksi materiaalilajeikseen erotettavat erät määrittyvät tutkimusten ja kokemusten mukaan, mutta luokitusperusteita voivat olla

- palakoko
- hakkuutähdehake
- kantohake
- kuorimurske

Materiaalilajin tunnistuksen keinoja ovat mm. RGB-kuva-analyysi, laser-skannaus ja kuvamittaus.

Materiaalilajeista ja puun eri ositteista tarvittaisiin **ominaisuustietoja**, kuten ainetiheys (kuiva-tuoretiheys, kuivapaino). Tiedoilla voitaisiin tarkentaa säteilymittauksissa vaimentumisen syytä, minkä verran johtuu kosteudesta ja ainetiheydestä. Ominaisuustietoja tarvitaan myös materiaalien luokittelua varten. Materiaalilajin ja ominaisuuksien määrittämisessä olisi luontevaa käyttää alan tutkimuslaitoksia ja asiantuntijoita, joilla on vahvaa osaamista tehtävällä alueella. Nopeimmin tuloksiin päästäisiin tiiviillä yhteistyöllä sovellusten kehittäjien ja materiaalin käyttäjäkohtaisten tapausten kanssa.

Viime vuosina on tapahtunut huomattavaa **laitteisto- ja detektoriteknikan** kehitystä. Myös **analyysitekniikoissa** on menty eteenpäin ja jäisen materiaalin kosteudesta saadaan tai odotetaan saatavan kohtuullisia tuloksia. Analyysien kehittäminen edellyttää alan tutkimusasiantuntijoiden ja -laitosten osallistumista laitekehittäjien rinnalla koko menetelmän kehittämiseen.

4.2 Mittausmenetelmien kehittäminen

Mittausmenetelmien osalta voidaan todeta, että kehittäjien/valmistajien toimesta **mikroaaltomittaus ja NMR -mittaus** ovat jo vahvasti etenemässä. Kummastakin on tulossa julkisuuteen pilotointivaiheen tietoa kuluvana vuonna. Ratkaisut perustuvat ensivaiheessa näytteiden analysointiin.

Tässä ehdotetaan seuraavien menetelmien kehittämistä:

- **Gammamittaus** – laitteita on kuljetushihnoilla massavirran mittauksessa. Ryhdytään mittaamaan myös kosteutta.
- **Tilavuuspainomittaus** kuljetushihnalta, laser- ja kamerakuvateknikan käyttö.
- **Impedanssispektroskopia**, anturitekniikka ja laskentaa on kehitetty, lupaavat tulokset.
- **NIR**-menetelmässä kehityspotentiaalia: taajuuskaistavalinnat, detektorit ja suomalainen analyysilaskennan osaaminen.
- **RGB-analyysin** testaus.
- **MMS-anturin** testaus.
- **Autokuormien tilavuuspainomittaus**, löytyykö tästä ratkaisu vastaanottomittaukseen.

Gammamittaus käytetään jo hakekuljettimilla vaakasovelluksena eli massavirtamittaukseen, myös voimalaitoksissa. Siten hakkeen kosteuden mittaamiseen gammamittauksella on valmis laitteisto. Kosteuden mittaussovelluksessa pitäisi mitata myös hakepatjan paksuus. Systeemiin pitäisi kehittää materiaalilajin tunnistus ja kalibrointimallit.

Tilavuuspainomittaus kuljetushihnalta perustuisi sähköisellä hihnavaa'alla tai gammamittauksella tehtävään punnitukseen ja laser- ja kamerakuvamittauksella määritettyyn hakevirran tilavuusmittaukseen. Tuloksena saadaan tuoretilavuuspaino. Tutkimusten mukaan se korreloi voimakkaasti kosteuden kanssa. Materiaalilajin tunnistaminen ja kosteusmääritykset materiaalilajin mukaan parantaisivat tarkkuutta. Vertailukosteus voitaisiin laskea materiaalilajin keskimääräisen kuivapainoarvon avulla.

Impedanssimittaus osoittautui tutkimuksissa hyvin potentiaaliseksi. Sitä voisi nopeastikin pilotoida yhdessä tutkimusryhmän kanssa. Tutkimuksiin kehitetty hakevirrassa uiva 4-elektrodinen torpedosondi antoi hyviä tuloksia. Impedanssimittaukseen voisi liittää akustisen emission mittauksen materiaalilajin tai ominaisuuksien (esimerkiksi palakoko ja jäätymisaste) tunnistuksen kehittämiseksi. Näin voisi menetellä jo ensimmäisessä pilotoinnissa. Mittausjärjestelmään kannattaisi liittää myös lämpötilan mittaus.

NIR-menetelmästä tiedetään paljon ja se antaa mahdollisuuksia rakentaa mittaustekniikka hakkeiden kosteusmittauksen näkökulmasta. Kuljetushihnalta tehtävässä online-mittauksessa voidaan hyödyntää suurta detektointinopeutta ja keskiarvoistaa mittaushavaintoja. Tutkimuksissa on käytetty esimerkiksi 1 sekunnin keskiarvoistamisaikaa ja siinä 10 ms:n mittausjaksoja 100. Kosteudenmittaus saadaan siten jatkuvaksi ja vältetään pistemäisten otosmittausten satunnaisongelma. NIR-mittaus on lämpötilariippuvainen, joten lämpötilakalibrointi parantaa tulosta. Lämpötilamittauksen ja ehkä muidenkin tunnistustekniikoiden perusteella mittaus voidaan kalibroida riittävän tarkaksi jäätyneenkin materiaalin kosteuden määrittämiseksi.

Teknosavo Oy:n kehittämän **RGB-analyysiin** perustuvan kosteusindeksin kyky kuvata hakkeen absoluuttista kosteutta pitäisi testata.

Kapasitiivisen mittauksen osalta kannattaisi kokeilla **MMS-anturin** (maahantuojana Hantor-Mittaus Oy) toimivuutta tuoreiden materiaalien mittaauksessa. Kapasitiivinen mittaus toimii periaatteessa sulalla materiaalilla, mutta testauksissa tulisi tutkia myös eriasteisesti jäätyneen materiaalin mittausta ja signaalintulkinnan mahdollisuuksia. Mittaustarkkuuden ohella anturin likaantumisen ja siitä johtuvasta toimivuudesta tulisi saada kokemuksia.

Hakkeiden vastaanotossa laitoksille kannattaisi tutkia **autokuormien tilavuuspainomittaukseen** perustuvaa kosteudenmäärittystä. Menetelmässä autokuorma punnitaan ja sen tilavuus mitataan laser/kameratekniikalla. Kun tunnetaan kuormatilan mitat, niin laser/kameratekniikalla muodostetaan kuorman yläpinnan profiili ja lasketaan tarkka tilavuus. Tilavuuspaino kor-

reloi kosteuden kanssa. Korrelaation selityskyky tulisi tutkia. Vertailuksi voitaisiin laskea kyseisen materiaalilajin keskimääräisen kuivapainon perusteella saatava kosteuspitoisuus.

5 MENETELMÄKEHITTÄJIÄ JA VALMISTAJIA

Seuraavassa esitetään alalla toimivia tutkimuslaitoksia, kehittäjiä ja valmistajia, joilla on asiantuntemusta tarvittavien menetelmien ja laitteistojen kehittämiseen. Lisäksi mainitaan toimijoiden erityiset osaamisalueet hakkeiden kosteuden mittauksia ajatellen.

VTT (Jyväskylä, Oulu) – mittaustekniikat, anturiteknologiat, analyysilaskenta, hihnakuljetinrata testauksia varten, olosuhdekammio (jäädytys, kastelu)

Itä-Suomen Yliopisto, fysiikan laitos (M. Tiitta) – mittaustekniikat, sähköiset ja akustiset menetelmät, analyysilaskenta

Jyväskylän yliopisto, fysiikan laitos (A. Virtanen, T. Kalvas) – radiometriset tekniikat ja analyysilaskenta

Senfit Oy – mikroaaltotekniikka

Vaisala Oyj – NMR -tekniikka

Kouvo Automation Oy – gammamittaus, hihnavaa'at

Teknosavo Oy – palakommittaus, laser/kamerakuvatekniikka, RGB -tekniikka, hahmontunnistus (laatuluokittelu)

Vision Systems Oy – laser/kamerakuvatekniikka, konenäkösovellukset, suuren kokoluokan laser/kuvamittaukset

Hantor-Mittaus Oy – anturiteknologiat ja mittaussovellukset

Bintec Oy - röntgentekniikka

Metso Automation Oy – massa- ja paperiteollisuuden mittaukset

6 MARKKINAT

Laitoksilla on tarve määrittää materiaalin kosteus ainakin vastaanottovaiheessa ja prosessiin syötettäessä. Lisäksi kosteustietoa tarvittaisiin varasto-
aumojen tai -siilojen purkuvaiheessa. Voidaan arvioida, että mittareiden markkinat riippuvat paljon niiden hinnasta ja käytettävyydestä. Seuraavassa esitetään sellaisten Suomessa toimivien tehtaiden ja voimalaitosten lukumäärät, jotka ovat potentiaalisia hakkeen kosteusmittareiden käyttäjiä.

Sellutehtaat ja mekaanisen massan valmistajat

- tehtaita 22 kpl
- käyttö
 - hakkeen vastaanottomittaus
 - prosessin ohjaus

Lämpö- ja voimalaitokset

- vähintään 1 GWh vuotuisen käytön laitoksia on 280 (v. 2008), ja käytön suuruuden mukaisesti luokiteltuina
 - vähintään 200 GWh (250 000 m³ haketta), 8 laitosta
 - vähintään 100 GWh (125 000 m³ haketta), 13 laitosta
 - vähintään 20 GWh (25 000 m³ haketta), 28 laitosta
 - vähintään 10 GWh (12 500 m³ haketta), 45 laitosta
 - vähintään 1 GWh (1 250 m³ haketta), 186 laitosta
- käyttö
 - energiapuun vastaanotto
 - prosessin ohjaus

Sahat

- potentiaalisia käyttäjiä noin 70
- käyttö
 - myytävän hakkeen, kuoren ja purun mittaus
 - oman lämpölaitoksen polttoaineen mittaus

Pellettituotanto

- laitoksia noin 20 kpl
- tuotanto noin 450 000 t (10 % kosteus), purumaista raaka-ainetta noin 3,5 milj. kuutiota
- käyttö
 - vastaanottomittaus
 - prosessin ohjaus

Biojalostetuotanto

- kehitys- ja pilotointivaihe, laitospotentiaali vain muutama mutta käyttö- määrä suuri
- käyttö
 - vastaanottomittaus
 - prosessin ohjaus, kuivaus ja jalostus