

Jouko Laasasenaho¹, Raimo Timonen² ja Heikki Poso³

Tuoreen puun lämpöarvosta

Laasasenaho J., Timonen R., Poso H. (2017). Tuoreen puun lämpöarvosta. Metsätieteen aikakauskirja 2017-6992. Tiedonanto. 14 s. <https://doi.org/10.14214/ma.6992>

Tiivistelmä

Tutkimuksessa tarkastellaan runkopuun kosteutta sekä manto- ja sydänpuun lämpöarvoja vuoden eri aikoina. Tavoitteena on selvittää perusteita laskea kuljetettavan veden määrä ja puuerän lämpöarvo suoraan korjuun yhteydessä. Lämpöarvot määritettiin viiden millimetrin paksuisista kairanlastuista suoraan, koska näytteen kuivaamisen yhteydessä osa energiapitoisista aineista haihtuu. Kairanlastujen kosteuserot ja niihin sattuneet pihkatiehyet aiheuttivat lisää vaihtelua, joten menetelmää käytettäessä on otettava useita näytteitä tulosten luotettavuuden lisäämiseksi. Tuoreen männyn mantopuun lämpöarvo oli kesällä juhannuksen jälkeen noin 1,5 MJ kg⁻¹ suurempi kuin kuusella ja sydänpuussa ero oli lähes yhtä suuri. Kuivapainosta laskettuna erot olivat samaa suuruusluokkaa, mutta talvella pienemmät. Männyn sydänpuu kuivapainoa kohti laskettuna todettiin lämpöarvoltaan noin 8% suuremmaksi kuin mantopuu. Kuusella ero on noin puolta pienempi. Koivun pienilläkin oksilla lämpöarvot olivat korkeat. Kuusen pihkan haihtuvat ainesosat todettiin hyvin energiapitoisiksi.

Mittauksissa todettiin, että havupuiden sydänpuun kosteus ei ole vakio, vaan sydänpuu on talvella selvästi kuivempaa lähellä ydintä kuin mantopuurajalla. Kuusien mantopuun kosteus oli hieman suurempi kesällä kuin mäntyjen, mutta sydänpuun kosteus pienempi. Talvella mantopuun kosteudessa ei ollut juuri eroja. Koivun kosteuden todettiin vaihtelevan vain vähän rungon poikkileikkauksessa lehtien putoamisen jälkeen syksyllä ja talvella.

Mikäli käytössä olisivat sydänpuun läpimitan estimointiin eri korkeuksilla soveltuvat mallit, voitaisiin runkokäyrien avulla estimoida runkoihin sisältyvän veden määrä ja myös rungon osien lämpöarvot melko tarkasti. Tällaisilla menetelmillä voidaan puun hinnoittelua tarkentaa eri käyttötarkoituksiin ja etenkin puun tuorepoltoon uudenaikaisissa lämpölaitoksissa, joissa on höyrystyneen veden sisältämän energian talteen ottoon soveltuvat laitteet. Puun polton tuottavuutta voidaan nostaa useita kymmeniä prosentteja lyhyellä aikavälillä Suomessa.

Avainsanat lämpöarvo; kosteusprosentti; sydänpuu; mantopuu; runkokäyrä; tuorepoltto

Yhteystiedot ¹Helsingin yliopisto, Metsätieteiden laitos; ²Helsingin yliopisto, Kemian laitos;

³Helsingin yliopisto

Sähköposti jouko.laasasenaho@helsinki.fi

Hyväksytty 7.3.2017

1 Johdanto

Kirjallisuudessa on tiedot tärkeimpien havupuidemme männyn ja kuusen keskimääräisistä lämpöarvoista sovittuja standardimenetelmiä käytettäessä. Näissä standardimenetelmissä näytteet kuivataan yli 100 °C lämpötilassa ja murskataan sekä jauhetaan ennen lämpöarvon mittausta kalorimetrissä. Elävien puiden mantopuuaineessa etenkin talviaikaan on hyvin energiapitoisia haihtuvia aineita, joita puut muodostavat varautuessaan talveen, jotta esim. mantopuun elävät parenkymisolut eivät jäätyisi. Esim. mäntyjen rungoista monoterpeenejä on mittauksissa todettu erittyvän ilmaan keväisin ilman lämpötilan kohotessa (Vanhatalo ym. 2015). Mantopuu on puun elävää solukkoa, mutta sydänpuu on kuollutta ja kuivempaa ja se sisältää enemmän uuteaineita, joista voidaan tehdä erilaisia biotaloudessa käytettäviä jalosteita. Sydänpuuta alkaa muodostua puuhun vasta, kun puun läpimitta ja ikä ovat riittäviä, eikä sen muodostumista tunneta tarkasti. Sen määrän laskemiseksi on esitetty erilaisia menetelmiä etenkin männylle (esim. Ojansuu ja Maltamo 1995; Flæte ja Høibø 2009; Luoma 2013; Vuosalmi 2016). Tiedot manto- ja sydänpuun lämpöarvojen eroista puuttuvat kuten myös energiapitoisten haihtuvien aineiden määrästä puun eri osissa.

Puun kosteudella on ollut suuri merkitys käytettäessä puuta energian tuotantoon lämpölaitoksissa, joissa ei ole poltossa höyrystyvän veden sisältämän energian talteenottojärjestelmää, koska puussa olevan veden lämmittäminen ja höyrystäminen vaativat energiaa, joka on poissa energiapuusta saatavasta lämmöstä. Veden kuljetus polttolaitoksiin aiheuttaa lisäkustannuksia. Energiapuun kosteutta määritetäänkin sekä näytteiden että laskennallisten menetelmien avulla (Marjomaa ja Uurtamo 1996; Ronkainen ym. 2014). Energiapuun kosteus onkin olennainen asia palamisen ylläpidossa pienissä voimaloissa ja klapien poltossa. Puun kosteudella on merkitystä myös vaihdettaessa puueriä painon perusteella metsäalan toimijoiden kesken.

Tuorepolton uusilla menetelmillä, joissa haketta ei tarvitse kuivata, saadaan enemmän talteen myös energiapitoisten haihtuvien aineiden energiaa. Lisäksi palaminen tapahtuu entistä täydellisemmin eli päästöjä syntyy vähemmän ja savukaasujen pesun yhteydessä poistuu paljon pienhiukkasia. Kauhavalla vuoden 2015 lopulla käyttöönotetulla uudella lämpölaitoksella saadut alustavat käytännön kokemukset osoittavat, että keskimääräiseen kuivaan hakkeeseen (19,1 MJ kg⁻¹) verrattuna tuore hake tuottaa yli 20 prosenttia enemmän energiaa. Nykyaikainen lämpöpumpputeknologia on suurin hyötysuhteen kohottaja ja ulosvirtaavat savukaasut ovat lämpötilaltaan hyvin matalat. Tämä edesauttaa mahdollista hiilidioksidin keräystä. Energiategokkuuteen sisältyy monia muitakin tekijöitä polton tapahtuessa yli 750 °C:n lämpötiloissa. (Laasasenaho ja Timonen 2016). Uudet laitteistot ovat kustannustehokkaita vasta yli 2–3 MW:n voimaloille.

Puissa muodostuu hyvin monenlaisia haihtuvia energiapitoisia aineita. Karkeasti voidaan todeta, että mitä energiapitoisempi aine on, sitä nopeammin se haihtuu, aivan kuten maaöljyä tislattaessa saadaan ensin lentokonebenssiiniä, seuraavaksi benssiiniä ja sitten dieselöljyä ja jäljelle jää bitumia. Isopreeni on ehkä energiapitoisin ja nopeimmin haihtuva puussa muodostuva hiilivety, mutta kaikki sen kerrannaiset, monoterpeenit (massat ovat 2 kertaa isopreenin massa) ja suuremman terpeenit haihtuvat nopeasti (Vanhatalo ym. 2015). Näitä aineita erittyy ilmaan tuoretta puuta käsiteltäessä ja niiden hajun voi helposti todeta tuoreesta puutavarasta. Pihkan vaikutusta puun lämpöarvoon on tutkittu jonkin verran (esim. Bowyer ym. 2007), mutta energiapuun osalta tietoa pitäisi lisätä ja monipuolistaa.

Tämän tutkimuksen tarkoitus on tuottaa perustietoa bioenergian käyttäjille ja puuta jalostavalle teollisuudelle männyn ja kuusen sydän- ja mantopuun sekä koivun kosteusvaihtelusta ja lämpöarvoista eri vuodenaikoina. Elävän puun kosteuden vaihtelusta eri vuodenaikoina tiedetään erityisesti koivun ja haavan mahla-ajan pintapuun korkea kosteus. Mahla-ajan alkaminen riippuu maan routakerroksen paksuudesta ja ilman lämpötilojen ja kosteuden kehityksestä ja sateista. Puun

kosteus samoin kuin lämpöarvot vaihtelevat merkittävästi, eikä tämä tutkimus kata näiden koko vaihtelua, mutta pyrkii osoittamaan niiden merkityksen.

Puuta poltettaessa vesi höyrystyy ja tähän kuuluu energiaa. Vetyä on puun ainesosana noin 6% ja se on hyvin energiapitoista (119/142 MJ kg⁻¹). Puun kaasutuksesta muodostuvassa kaasussa on vetyä 8–20% (Motiva), joten osa puun sisältämästä vedestä hajoaa ilmeisesti korkeissa lämpötiloissa. Siinä muodostuu hehkuvaa hiiltä puun pintaan ja puun sisältämä vesi (ja sen mukana tulevat aineet) kaasuuntuu tämän katalyyttisen pinnan läpi. Palamisessa tämän kaltaiset kemialliset reaktiot ovat monimutkaisia, eikä niitä tunneta. Palavan kaasun seokseen lisätty vety aiheuttaa vetyä sisältävien reagenssien (OH ja HO₂) määrän kasvua ja siten puhtaampaa palamista, koska hapetustuotteina on vettä. Veden lämmön siirto on myös tehokkaampaa kuin muiden savukaasujen.

Kosteuden mittausten perusteella saatu veden määrän arvio antaa mahdollisuuden arvioida veden osuutta ja vaikutusta puun käytössä. Runkokäyrien laskentamenetelmillä ja hakkuukoneen läpimittatietoja ja sydänpuun läpimitan ennustemalleja hyödyntämällä puiden sisältämä vesimäärä voidaan teoriassa laskea rungon eri osille (katso myös Marjomaa ja Uurtamo 1996). Näin veden määrä voidaan laskea kuljetuksissa ja painoon perustuvissa puukaupoissa ja -vaihdoissa sekä urakointimaksuissa. Puiden varastointi metsissä on nykyisin lyhytaikaista, joten vettä kuljetetaan tuoreen puun mukana ja sen määrän arvioinnissa on apua tuoreen puun kosteustiedoista eri vuodenaikoina.

Oksissa on merkittävä määrä rakenteeltaan tiivistä puuta ja myös kuorta, joiden määrä voidaan arvioida koko puun maanpäällisen tilavuuden laskevilla ”kokopuutilavuuden” malleilla kullakin korkeusvälillä. Siksi tällaiset mallit on tärkeää luoda ja ne ovat laadittavissa oksien mittaamiseen kehitetyn mittauslaitteen avulla (Aarnio ym. 2012). Mallien laadintamenetelmiä on kehitetty tähän tarkoitukseen, mutta ei vielä julkaistu.

Tämä tutkimus kohdistuu puiden lämpöarvojen ja kosteuden vaihteluun runkopuussa talvella ja kesällä. Työssä ei ole tehty laajaa kirjallisuuskatsausta aiheesta, mutta edellä mainitun lisäksi osoitetaan uusia mahdollisuuksia puiden sisältämien ainesosien laskentaan runkokäyriä hyödyntämällä. Jatkossa laskentamenetelmiä kehitetään näiden tekijöiden määrittämiseksi kaato- ja korjuukoneilla tapahtuvan korjuun yhteydessä. Tämä tuottaa parempia perusteita energiapuun käytön hyötysuhteen nostamiselle lämpölaitoksissa nostaen tuottavuutta ja vähentäen haittoja. Tutkimuksessamme ei tehty havupuiden kuoren kosteutta ja lämpöarvoja koskevia mittauksia elävistä puista samoin kuin kuoren määrää ei tutkittu, mutta se on noin 10–15 % runkopuun tilavuudesta. Kuoren suurin merkitys on nykyisin kuitenkin energiakäytössä, koska sen lämpöarvo on samaa suuruusluokkaa kuin puuaineen. Puun kuorta poltettaessa tuhkaa muodostuu noin kaksinkertainen määrä puuaineeseen verrattuna. Kuori sisältää hyvin monenlaisia kemikaaleja, joiden jalostaminen hyötykäyttöön on vasta aivan alkuvaiheessa.

2 Tutkimusaineisto ja mittaukset

Tutkimusaineiston pääosa kerättiin vuosina 2015–16 Helsingin yliopiston metsäasemalla Hyytiälässä, joka sijaitsee Juupajoen kunnassa. Koepuut oli valittu metsäylioppilaiden puuanalyysejä varten koepuiksi. Lisäksi mitattiin joitakin koepuita Sysmässä kosteuden ja kuusen pihkan selviytyksiä varten. Tutkimus koskee etupäässä mäntyjä ja kuusia, mutta vertailevia mittauksia tehtiin koivun ja haavan kosteudesta myöhäissyksyn olosuhteissa ja kevättalvella Hyytiälässä, jossa koepuut olivat varttuneessa kasvatusmetsässä kasvavia tukkipuita, jotka sisälsivät jo merkittävästi sydänpuuta.

Vuoden 2015 koepuista kahdeksan oli mäntyjä ja yhdeksän kuusia. Koepuiden keskimääräinen rinnankorkeusikä oli 48,8 vuotta sekä männyillä että kuusilla. Koepuista kairattiin rinnankorkeudelta

5 mm:n paksuiset ja puiden ytimeen ulottuvat lastut 28.6.2015. Kairan lastusta otettiin kuoren alta noin 3–4 cm:n pituinen pala mantopuuta edellisen vuoden lustosta alkaen ja läheltä ydintä sydänpuulta näyttävästä osasta toinen pala. Näytteet säilöttiin ilmatiiviisiin koeputkiloihin välittömästi kairauksen jälkeen. Seuraavana päivänä, kun koepuut oli kaadettu, otettiin näytteitä vastaavalla tavalla kairaamalla myös 50 ja 70 prosentin suhteellisilta korkeuksilta. Näillä lisäkairauksilla halusimme selvittää lämpöarvon ja kosteuden vaihtelua rungon eri korkeuksilla. Näytteet vietiin seuraavana päivänä Metsätieteiden laitokseen Viikkiin kylmäsäilytykseen analyyseja varten.

Lämpöarvojen mittaukset tehtiin Helsingin Yliopiston Kemian laitoksen pommikalorimetrillä. Näytteestä määritettiin pommiin laitettavan kappaleen paino ja kosteusmittausta varten irrotetun osan paino milligramman tarkkuudella. Kosteusmitattavat osat laitettiin takaisin lasiputkiloihin ja myöhemmin kuivatettiin 104 °C -lämpöisessä uunissa vuorokauden ajan. Ne punnittiin 0,1 milligramman erottelukyvyn omaavalla vaa'alla uudelleen juuri ennen uuniin laittoa ja heti uunista poistamisen jälkeen. Kunkin näytteen kuiva-aineprosentti laskettiin jakamalla kuivauksen jälkeinen massa kuivausta edeltäneellä massalla. Näin saatu luku kerrottuna sadalla antaa kuiva-aineprosentin. Kosteusprosentti on kuiva-aineprosentti vähennettynä sadasta prosentista.

Kuivamassan lämpöarvoa laskettaessa oletettiin, että kunkin näytteen kosteusprosentti on vakio. Näytteen pommikalorimetrissä olleen osan kuivamassa laskettiin kertomalla pommitetun osan massa kosteusnäytteestä saadulla kuiva-aineprosentilla. Kuivalämpöarvo saatiin vähentämällä pommituksessa vapautuneesta energiasta sytytyslangan palaneen osan antama energia ja jakamalla tulos pommitetun osan kuivamassalla. Puuaines ei ole aivan homogeenista johtuen erityisesti näytteessä olevasta pihkasta. Pihkatiehyeiden sattuminen kairanlastuun lisää lämpöarvojen vaihtelun suuremmaksi kuin edellä kuvattuja standardimenetelmiä käytettäessä, mutta näin menetellen saadaan haihtuvien energiapitoisten aineiden energiaosuus mukaan lämpöarvoon. Tosin kuivauksessa katoaa veden lisäksi haihtuvien energiapitoisten aineiden osuus painosta.

Lisäksi kosteus vaihtelee hieman kairanlastun eri osissa, eikä tutkittavien palojen lämpötilaa säädetty vakioksi, vaan näytteet laitettiin pommikalorimetriin huoneenlämpöisinä. Käytetyllä menetelmällä saadaan kuitenkin selville lämpöarvojen vaihtelun syitä, etenkin kosteudesta ja manto/sydänpuusta johtuvia. Pihka aiheuttaa joitakin poikkeavia arvoja sekä sydänpuun että etenkin mantopuun tuloksiin.

Lämpöarvo määritettiin pommikalorimetrissä niin, että pommin sisälle laitettiin 1 ml vettä. Happea laitettiin niin paljon, että pommin sisäpaine nousi 24–26 ilmakehän paineeseen. Vesihautteen lämpötilan annettiin tasaantua niin, että kymmenen sekunnin välein tehtyjen mittausten lämpötilaero oli kaksi kertaa korkeintaan 0,001 astetta. Tämän jälkeen näyte sytytettiin ja lämpötilaa seurattiin, kunnes mittausten välinen ero oli kaksi kertaa korkeintaan 0,001 astetta. Lämpötilan nousuksi katsottiin näiden lämpötilojen välinen erotus. Pommikalorimetri kalibroitiin mittaamalla bentsoehapponäytteen polton aiheuttama lämpötilan muutos. Tulos vastaa siten saapumistilan mukaista lämpöarvoa.

Vuoden 2015 tuloksissa oli varsinkin männyn sydänpuun kosteusnäytteissä vaihtelua, joka osoitti, että sydänpuun kosteus voi vaihdella, vaikka solut kuollessaan aspiroituvat ja huokokset sulkeutuvat. Siksi halusimme alustavasti selvittää, kuinka puun kosteus muuttuu rungon säteen suunnassa syksyllä puun valmistautuessa talveen. Ensimmäiset kairaukset tehtiin Sysmässä 8.11.2015, jolloin selvisi, että sydänpuun kosteus ei ole vakio männyllä. Kahdesta tukkipuusta kairattiin 22.11.2015 tyveltä uudestaan näytteet, jotka ulottuivat puun ytimeen saakka. Kosteuden muutoksen selvittämiseksi eri puulajeilla otettiin puun ytimeen ulottuvat kairanlastut myös haavasta ja kahdesta koivun rungosta 1,3 metrin korkeudelta Sysmässä 5.12.2015. Suuri koivu oli keskeltä laho, joten siitä sai vain kaksi lastun kappaletta. Isohko pihakuusi kaadettiin 27.12.2015 ja puusta otettiin kairalla kosteusnäytteet 1,3 ja 6 metrin korkeuksilta 31.12.2015 puun pinnasta ytimeen. Kairalla otetut näytteet suljettiin tiiviisiin putkiloihin ja niiden kosteudet määritettiin Viikissä.

Pihakuusen latva oli myrskyssä katkennut 8.8.2010 ja murtumakohdassa oli runsaasti pihkaa. Puun kaadon jälkeen sahattiin 10 päivää myöhemmin pihkaisesta osasta 16 cm paksu pölkky. Pölkky oli ulkona 3 kk ja laitettiin vasta sitten muovipussiin, joten pihka oli osittain kuivunut, kun siitä otettiin Kemian laitoksella pihkanäytteet.

Vuoden 2016 koepuut olivat suunnilleen samankokoisia kuin vuoden 2015 koepuut ja ne sijaittivat kutakuinkin samanlaisella kasvupaikalla. Kyseisten koepuiden lämpöarvot ja kosteudet mitattiin rinnankorkeudelta talviolosuhteissa 15.–16.3.2016 otetuista näytteistä. Tällöin Hyytiälässä otettiin kairaamalla näytteet kahdeksasta männystä, kahdeksasta kuusesta ja viidestä koivusta; neljästä männystä, neljästä kuusesta ja yhdestä koivusta otettiin lisäksi vertailunäytteet. Yhtä koivunäytettä lukuun ottamatta näytteet jaettiin kolmeen osaan; mainittu koivunäyte oli niin pienestä koivusta, että se jaettiin vain kahtia. Näytteet varastoitiin ilmatiiviisiin lasiputkiloihin ja säilytettiin jääkaappilämpötilassa matka-aikoja lukuun ottamatta. Näitä näytteitä otettaessa ilman lämpötilat olivat muuttumassa ja osittain jo muuttuneet, kuten ajanjakson 10.–16.3.2016 vuorokauden keski-, minimi- ja maksimilämpötiloista Hyytiälässä havaitaan taulukosta 1.

Jokaisesta kairatusta näytteen osasta otettiin erilleen noin kolmasosa kosteusprosentin määrittämiseksi. Parittomista näytteistä tämä osa otettiin lastun kuorenpuoleisesta osasta, parillisista näytteistä vastakkaiselta puolelta. Määritys tapahtui punnitsemalla kuivattava osa 0,1 milligramman tarkkuuteen pystyvällä vaa'alla ennen ja jälkeen kuivauksen. Jokainen vertailunäytteen kolmasosa jaettiin vielä kolmeen osaan, joista jokaisen kosteusprosentti määritettiin. Lopuksi kuivattujen vertailunäytteiden lämpöarvo määritettiin pommikalorimetrillä.

Maaliskuussa 2016 mitatuista puista opiskelijat kaatoivat ja mittasivat 4.7.2016 tarkasti kahdeksan mäntyä ja kuusi kuusta. Näissä puissa mittaukset tehtiin vain rinnankorkeudelta (1,3 m). Opiskelijoiden tekemien mittausten lisäksi puista mitattiin rinnankorkeudelta sahatuista kiekkoista tuoreeltaan kosteusprosentit kosteusmittarilla (Gann Hydromette BL Compact S, anturien välinen etäisyys n. 1,45 cm) säteen suuntaisesti ydintä kohti nilan ja mantopuun rajasta alkaen, mittausten välinä anturien välinen etäisyys. Rinnankorkeudelta sahatuista kiekkoista otettiin myös tuoreeltaan puun säteen suuntaisen kosteuden vaihtelun määrittystä varten kustakin kolme näytettä, jotka välittömästi pakattiin ilmatiiviisiin muovipusseihin. Seuraavana päivänä näytteiden kuiva-aineprocentit määritettiin paloittelemalla ne pienempiin osiin kuivumisen nopeuttamiseksi, punnitsemalla ne 1 mg tarkkuudella, kuivattamalla paloja vuorokauden ajan 104 °C -asteisessa uunissa ja punnitsemalla ne uudelleen.

Näistä Hyytiälässä 4.7.2016 otetuista näytteistä ei tehty lämpöarvomittauksia, koska kyseisten koepuiden lämpöarvot ja kosteudet oli mitattu rinnankorkeudelta talviolosuhteissa 15.–16.3.2016 otetuista näytteistä. Tämän lisäksi lämpöarvot määritettiin kuusen pihkasta (kolme tuoretta näytettä, yksi kuivattu näyte), koivun kuoresta (viidestä pienestä näytteestä yhdistetty yksi polttonäyte) ja koivun varvuista (kaksi näytettä). Mittaustuloksista laskettiin keskiarvot ja hajonnat. Havaintojen vähyys estää tekemästä tarkkoja johtopäätöksiä tuloksista ja tilastollisen tarkastelun hyöty tuloksista jäisi vähäiseksi suurista hajonnoista johtuen, joten niitä ei tehty. Lisäksi näytteet eivät ole edustavia otoksia.

Taulukko 1. Vuorokauden keski-, minimi- ja maksimilämpötilat Hyytiälässä 10.–16.3.2016.

Päivämäärä	10.3.	11.3.	12.3.	13.3.	14.3.	15.3.	16.3.
Keskilämpötila °C	+0,5	+0,1	-1,2	-2,4	+1,2	+0,7	+3,4
Maksimilämpötila °C	+2,4	+3,7	+5,1	-1,3	+6,4	+6,1	+9,4
Minimilämpötila °C	-1,5	-1,9	-6,2	-3,7	-3,3	-5,3	-0,5

3 Tulokset

3.1 Lämpöarvojen mittaustulokset

Veden vaikutusta palamisessa testattiin polttamalla aktiivihiihtä neljällä eri vesimäärällä:

- niin, ettei joukossa ollut lainkaan vettä
- niin, että astian pohjalla oli pieni määrä vettä
- niin, että hiilen joukossa oli vettä noin 17% hiilen massasta
- niin, että hiilen joukossa oli vettä noin 29% hiilen massasta

Näiden tapojen välillä ei havaittu paljoakaan eroa. Suurin lämpömäärä ($29,7 \text{ MJ kg}^{-1}$) mitattiin kyllä 17%:n vesimäärällä, mutta ero kuivapolttoon oli vain 1,5%, mikä on virherajojen sisällä. Siten systeemissä, joka ei sisällä vetyä muualla kuin vedessä, veden mahdollinen hajoaminen vedyksi palamisessa tai toisaalta veden osittainen höyrystyminen eivät näyttäisi vaikuttavan tulokseen tällä tavalla toteutettujen mittausten mukaan.

Kairanlastujen kosteusero manto- ja sydänpuussa vaikuttaa saatuun energiamäärään, kuten näkyy taulukosta 2. Pieni lämpöarvo 70%:n korkeudella männyn sydänpuussa ja lämpöarvon suuri hajonta johtunee siitä, että lastut eivät ole olleet kokonaan sydänpuuta vaan osittain mantopuuta, sillä näistä kairanlastuista ei mitattu sydänpuurajaa tarkasti.

Männyn lämpöarvot ovat melko johdonmukaisesti korkeammat sekä manto- että sydänpuussa kuin kuusella. Männyn sydänpuun lämpöarvon keskiarvo 70%:n korkeudella poikkeaa muiden korkeuksien arvoista ja sen hajonta on hyvin suuri, joten osalla puissa näytteet ovat olleet ainakin osittain mantopuuta. Kuusen sydänpuun korkein lämpöarvo oli 70%:n korkeudella. Korkeuksilta 50 ja 70% on näytteet otettu kaadetuista puista, mikä voi vaikuttaa myös tuloksiin, sillä pihkan erityis alkua pölleissä välittömästi ja vaikuttaa myös hieman kosteuden jakaantumiseen.

Taulukon 2 arvot kuivapainosta laskettuna manto- ja sydänpuulle rinnankorkeudella nähdään taulukosta 3. Eri vuodenaikoina tulisi lämpöarvojen tuoreesta puusta mitattuina olla likimäärin samansuuruisia, kun lämpöarvojen laskennassa otetaan huomioon kosteusarvot eli laskenta tehdään kuivapainosta. Eroja tulee manto- ja sydänpuun uuteaine-eroista, joiden karkea jaotus on esitetty monissa oppikirjoissa (esim. Sjöström 1993).

Kesän 2015 aineistossa männyn sydänpuun lämpöarvojen keskiarvo kuivapainosta oli $1,74 \text{ MJ kg}^{-1}$ eli 8,4% suurempi kuin mantopuulla. Kuusella uuteaineiden määrien erot sydänpuun ja mantopuun välillä ovat pienemmät ja tämä näkyy myös lämpöarvojen eroissa. Kuusen sydänpuussa oli $0,35 \text{ MJ kg}^{-1}$ suurempi lämpöarvo kuin mantopuussa eli prosentteina 1,8. Vastaavat prosentti-erot maaliskuussa otetuissa näytteissä olivat männyllä 7,4 ja kuusella 4,9. On todennäköistä, että

Taulukko 2. Hyytiälästä 28.6.2015 otettujen kairanlastujen lämpöarvot, niiden hajonnat ja havaintojen lukumäärät eri korkeuksilta ilman kuivausta.

Korkeus	MJ kg ⁻¹	Hajonta	n, kpl	MJ kg ⁻¹	Hajonta	n, kpl
	Mänty, mantopuu			Kuusi, mantopuu		
1,3 m	12,88	0,93	8	10,34	1,03	7
50%	11,15	1,12	7	8,92	0,70	2
70%	10,31	1,25	7	8,69	1,72	3
	Mänty, sydänpuu			Kuusi, sydänpuu		
1,3 m	17,17	1,61	8	15,63	0,96	9
50%	17,39	1,35	7	15,98	0,73	3
70%	13,92	2,69	5	16,08	0,61	4

Taulukko 3. Hyytiälästä 28.6.2015 ja 15.–16.3.2016 rinnankorkeudelta (1,3 m) otettujen kairanlastujen lämpöarvojen keskiarvot, hajonnat ja havaintojen määrät kuivapainosta männyllä ja kuusella.

		Mänty			Kuusi		
		MJ kg ⁻¹	Hajonta	n, kpl	MJ kg ⁻¹	Hajonta	n, kpl
Mittausaika 28.6.2015	Mantopuu	20,73	1,37	8	19,87	2,48	7
	Sydänpuu	22,47	1,95	8	20,22	1,09	9
Mittausaika 15.–16.3.2016	Mantopuu	20,31	3,32	8	19,78	2,49	8
	Sydänpuu	21,82	2,63	8	20,74	0,63	8

männysssä on energiapitoisia haihtuvia terpeenejä enemmän kuin kuusessa, ja siksi lämpöarvot ovat korkeammat. Kuinka paljon niitä haihtuu enemmän kuivattaessa männyn näytteitä, on selvitettävä erillisin tutkimuksin. Keskiarvoilla on melko suuret hajonnat, mutta keskiarvot ovat suuremmat kuin kirjallisuudessa esitetyt lämpöarvotaulukoiden luvut (esim. Motiva 18,5–20,0 MJ kg⁻¹). Hyytiälässä 15.–16.3.2016 otettujen näytteiden keskimääräisiksi lämpöarvoiksi saatiin männylle 21,1 MJ kg⁻¹ ja kuuselle 20,47 MJ kg⁻¹ kuiva-ainetta kohti. Männyn lämpöarvo on noin 3% suurempi kuin kuusen. Männyn kevään 2016 näytteiden lämpöarvo oli noin 4% pienempi kuin edellisenä kesänä mitattujen männyn näytteiden, kuusella ero oli alle puoli prosenttia.

Koivun puuaineen tuoreiden näytteiden (n=14) lämpöarvo oli 10,54 MJ kg⁻¹ ja hajonta 0,68. Kuivapainosta laskettu lämpöarvo oli koivulla 20,09 MJ kg⁻¹, mutta hajonta oli melko suuri 1,14. Kosteus tuorepainosta oli 47,86% ja prosenttilukujen hajonta 2,88. Kuivattujen ja jauhettujen koivun näytteiden (n=4) lämpöarvo oli 20,5 ja hajonta 0,41. Koivun tuohinäytteen lämpöarvo oli 22,26. Lisäksi mitattiin kahden katkaistun noin lyijykynän paksuisen koivun oksan lämpöarvot ja kosteudet. Kosteudet olivat 47% ja 48% ja lämpöarvot 23,52 ja 22,74 MJ kg⁻¹. Koivun tuohi omaa tunnetusti korkean lämpöarvon (21–23 MJ kg⁻¹; Motiva). Koivun latvan ohuet oksat kuivuvat ja säilyvät melko pitkään lahoamatta ja säilyttävät ilmeisen hyvin lämpöarvonsa ainakin yhden kesän yli, jollei niitä varastoida kosteaan paikkaan. Koivun latvaosa on runsaan tuohipitoisuuden ansiosta energiapitoista polttoainetta, mutta sitä käytettäessä sytykkeenä muodostuu epäterveellistä nokea ja pienhiukkasia runsaasti. Täten tuohi tulisi polttaa korkeassa lämpötilassa. Koivun tuohi säilyy useita vuosia, vaikka puuaines tuohen sisällä lahoaisi.

Kuusen pihkanäytteitä poltettaessa havaittiin merkittävä ero tuoreen ja kuivatun pihkan välillä – kuivatusta pihkasta irtosi noin 11% vähemmän lämpöenergiaa ja erittäin paljon enemmän nokea kuin saman näytteen kuivaamattomasta osasta. Kuivattaessa kuusen pihkasta haihtuvat aineet olivat selvästi energiapitoisempia kuin jäljelle jääneet. Vaikka otetut pihkanäytteet olivat jonkin aikaa kuivuneet, pihkanäytteistä haihtui vielä 11–18% niiden painosta kuivatuksessa. Pihkan lämpöarvo vaihteli sen laadun mukaan. Mitä notkeampaa pihka on sitä suurempi lämpöarvo sillä on. Pihkanäytteissä lämpöarvo vaihteli 32,4 ja 36,8 MJ kg⁻¹ välillä.

3.2 Puiden kosteusvaihtelusta

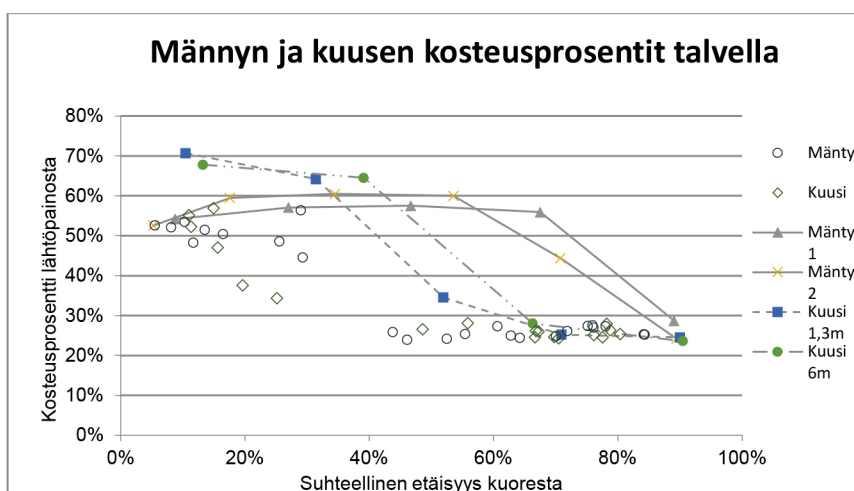
Kesällä 2015 otettujen kairanlastujen kosteudet ja niiden hajonnat eri korkeuksilla nähdään taulukosta 4. Kuten taulukosta 4 näkyy, kuusen mantopuun kosteudet ovat suuremmat kuin männyllä. Kosteus lisääntyy johdonmukaisesti korkeuden kasvaessa, mikä ilmiö on havaittu aikaisemmissa tutkimuksissa ja lämpöarvot olivat kosteudestakin johtuen pienemmät. Varsinkin 70%:n korkeudella männyn näytteet eivät kokonaan ole olleet sydänpuuta, vaan pikemminkin mantopuuta, kuten jo niiden lämpöarvoista oli pääteltävissä. Tulosten hajonta on suurta ja näytteitä ei otettu kaikilta korkeuksilta jokaisesta koepuusta, joten tältä osin tuloksia voidaan pitää vain suuntaa-antavina. Käytetty kosteusmittari ei soveltunut tarkkaan mittaamiseen.

Taulukko 4. Kosteusprosentti näytteiden lähtöpainosta ja prosenttien hajonta 28.–29.6.2015 kairattujen puiden eri korkeuksilla.

Korkeus	Kosteus-%	Hajonta	n, kpl	Kosteus-%	Hajonta	n, kpl
	Mänty, mantopuu			Kuusi, mantopuu		
1,3 m	38	7	8	48	3	7
50%	47	5	7	54	6	2
70%	53	6	7	57	5	3
	Mänty, sydänpuu			Kuusi, sydänpuu		
1,3 m	25	3	8	24	3	9
50%	23	4	7	22	1	3
70%	43	12	5	28	9	4

Puun kosteus muuttuu vuodenaikojen mukaan säteen suunnassa myös sydänpuussa. Männyn tyveltä alkutalvella kairatut näytteet viittaavat siihen, että tyvellä kosteutta on tunkeutunut syvemmälle sydänpuuhun (kuva 1, männyt 1 ja 2). Kosteuden jakaumat kuusella 1,3 ja 6 metrin korkeuksilla pihakuudessa näyttävät hieman erilaisilta. Asia vaatisi huomattavasti perusteellisemman aineiston keräyksen, jotta kosteuden jakaumista voisi sanoa mitään varmaa. Kaadetun pihakuuden kosteus pintapuussa oli korkein. Kuusen kuori on korkkimaista ja ilmeisesti hyvä eriste lämmölle ja kosteudelle. Kuoren paksuus kuusella 6 metrin korkeudella oli 9 mm ja kosteus 59,8%.

Kevättalvella (15.–16.3.2016) otettujen kairanlastujen kosteusprosentit nähdään taulukosta 5.

**Kuva 1.** Männyn ja kuusen kosteusprosentti rungon sisällä talven alussa ja lopussa.**Taulukko 5.** Kevättalvella (15.–16.3.2016) otettujen kairanlastujen kosteusprosentit.

Korkeus	Kosteus-%	Hajonta	n, kpl	Kosteus-%	Hajonta	n, kpl
	Mänty, mantopuu			Kuusi, mantopuu		
1,3 m	46	8	9	48	10	11
	Mänty, sydänpuu			Kuusi, sydänpuu		
1,3 m	25	1	15	25	3	13

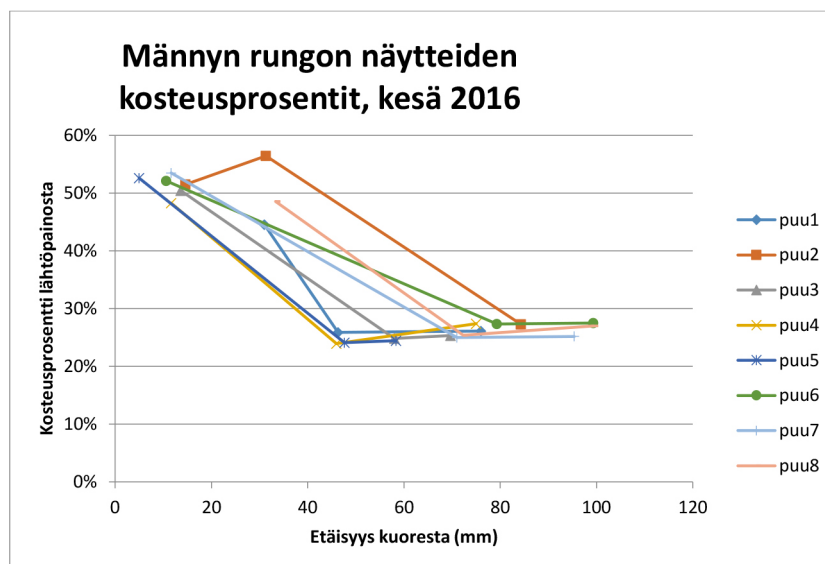
Taulukko 6. Kesällä (4.7.2016) otettujen näytteiden kosteusprosentit.

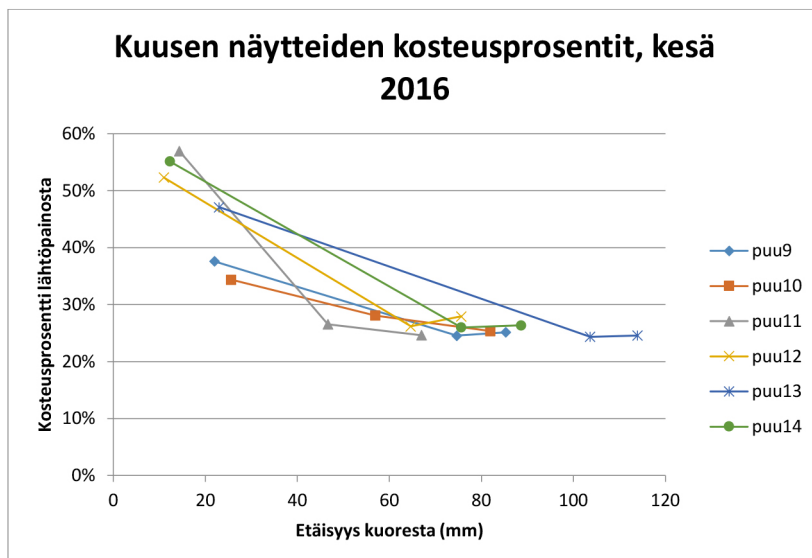
Korkeus	Kosteus-%	Hajonta	n, kpl	Kosteus-%	Hajonta	n, kpl
	Mänty, mantopuu			Kuusi, mantopuu		
1,3 m	51	3	9	47	9	6
	Mänty, sydänpuu			Kuusi, sydänpuu		
1,3 m	26	1	15	26	1	12

Männyn ja kuusen kosteudessa ei näyttäisi olevan eroja kevättalvella, kun sydänpuuraja on otettu tarkemmin huomioon. Kesällä (4.7.2016) otettujen näytteiden kosteusprosentit nähdään taulukosta 6.

Männyn kosteuden keskiarvo 1,3 metrin korkeudella mantopuussa poikkeaa taulukon 4 arvosta yli 10 prosenttiyksikköä, joten ilmiötä tulisi tutkia tarkemmin. Taulukon 6 mukaan puulajeilla ei ole juuri kosteuseroja kesälläkään. Kuvan 1 perusteella näyttäisi siltä, että männynissä on suhteellisesti paksumpi mantopuukerros, mutta aineiston pienuuden johdosta ei sydänpuun alkamiskohtaa eikä vaihettumisalueen kosteusarvoja voida päätellä tarkasti. Mittausajankohta oli kevään alkamisen kynnyksellä, joka tietysti vaikuttaa kosteuskäyriin.

Kuvassa 2 nähdään mäntyjen ja kuvassa 3 kuusen kosteusvaihtelua säteen suunnassa 4.7.2016. Näyttäisi siltä, että vettä on männyn mantopuussa kaksinkertaisesti sydänpuuhun verrattuna. Manto- ja sydänpuun rajalla kosteuden muutos on suuri, mutta syvemmällä sydänpuussa vaihtelu on vähäistä. Kesällä 2016 otettujen kosteusnäytteiden ja lämpöarvojen laskennassa pyrittiin ottamaan sydänpuuraja mahdollisimman hyvin huomioon ja tämä voi osaltaan aiheuttaa tuloksissa olevia eroja. Kuvassa 2 olevan puun 2 poikkeava kosteuskäyrä voi aiheutua pienestä mittausvirheestä tai mantopuun poikkeavasta rakenteesta.

**Kuva 2.** Kosteuden jakaumaa männyn puuaineessa rinnankorkeudella kesällä.



Kuva 3. Kosteuden jakaumaa kuusen puuaineessa rinnankorkeudella kesällä.

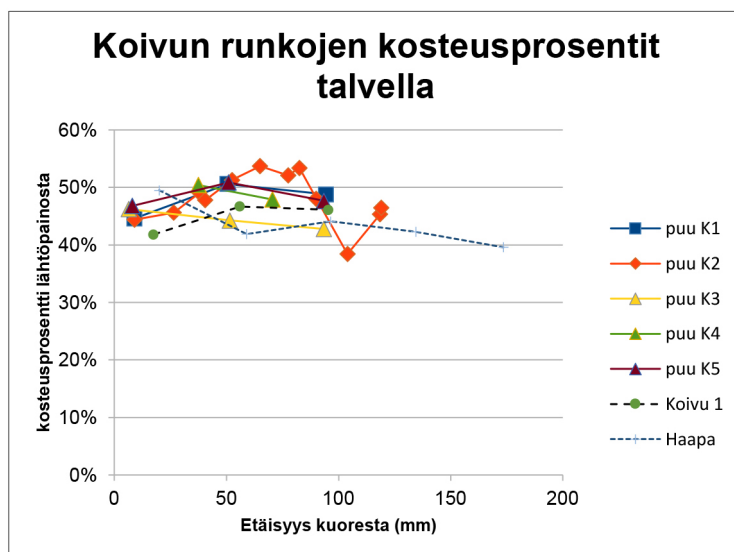
Taulukko 7. Puuaineksen ja sydänpuu- ja kosteusprosentit rinnankorkeudella kesällä ja talvella 2016 mitatuilla puilla.

	Mänty	Hajonta	n, kpl	Kuusi	Hajonta	n, kpl
Sydänpuu-%	35,8	9,5	8	41,7	2,3	6
Kosteus-%, kesä	41,5	2,7	8	38,7	5,7	6
Kosteus-%, talvi	38,3	6,9	8	38,7	6,4	6

Verrattaessa rinnankorkeuden puuaineksen kosteusprosentteja kesällä ja kevättalvella vuonna 2016 mitatuilla puilla ei tuloksissa ole kovin suuria eroja. Taulukossa 7 nähdään myös sydänpuuprosentit 1,3 metrin korkeudella. Tulokset ovat poikkileikkausaloilla painotettuja. Kuusen kosteus 1,3 metrin korkeudella on sama kesällä ja kevättalvella. Männyllä kosteus oli kesällä suurempi kuin kevättalvella. Hajonnat ovat kuitenkin melko suuria, joten tarkkoja päätelmiä ei voida tehdä.

Mittauksissa voitiin todeta, että talvella aivan ytimen läheisyydessä oleva sydänpuu havupuilla on kuivinta. Näyttäisi melko selvältä, että lähinnä pintaa olevaan kuolleeseen sydänpuusoluksoon puut varastoivat vettä, jotta ne eivät kuivuisi kevättalven ankarissa oloissa, jolloin maa on vielä jäässä. Puu on hygroskooppista ainetta eikä aspiroituminen estä kosteuden tunkeutumista myös sydänpuuhun.

Koivun kosteus talvella pintapuussa aluksi nousee ydintä kohti hieman kuvan 4 perusteella. Kosteus ei koivulla vaihtele säteen suunnassa kovin paljon talvella. Sysmässä kairatun suuren koivun, jossa oli lahoa sisällä, kosteus oli melko vakio 38–39% pintapuussa. Lahon takia kosteutta ei merkitty kuvaan, koska laho sisäosa imee kosteuden. Pienemmän terveen koivun kosteus oli suurempi (koivu 1 kuvassa 4) ja haavan kosteus oli samaa suuruusluokkaa kuin koivulla. Kuten kosteustuloksista huomataan, puut ovat jo varautuneet talven tuloon Sysmän mittauksien aikana ja kosteuskäyrä oli samanlainen maaliskuussa eli koivun pintaosissa oli yleensä pienempi kuin syvemmillä.



Kuva 4. Koivun kosteus-% säteen suunnassa rinnankorkeudella kevättalvella 2016.

4 Tulosten tarkastelua

Lämpölaitoksiin toimitetaan hyvin monenlaisista raaka-aineista valmistettuja hakkeita, joiden lämpöarvot vaihtelevat. Energiapuun on yleensä pienikokoisia harvennuspuita ja isompien puiden latvahukkapuuta ja oksia, mutta myös paksuja rungon osia, jotka eivät lahon tai jonkin muun vian vuoksi kelpaa kuitu- tai tukkipuina jalostukseen. Tässä työssä on käsitelty vain joitakin hakkeen lämpöarvoon vaikuttavia ominaisuuksia pienien aineistojen avulla, jotta saataisiin edes suuntaa antavia tuloksia moniin tärkeisiin kysymyksiin. On selvää, että monia asioita pystypuiden käytöstä energian tuotannossa on syytä tutkia laajempien aineistojen avulla.

Energiapuun kosteus havupuilla kesällä ja talvella ei merkittävästi vaihtelee. Mantopuun ja nilan kosteus lisääntyy keväällä huomattavasti, mutta kosteus tasaantuu ilmeisesti melko nopeasti syksyllä. Lehtipuilla koivun mahla-aikana pintapuun kosteus on suuri, mutta koivun ja myös haavan rungon kosteus lehtien putoamisen jälkeen vaihtelee melko vähän rungon eri syvyyksillä pinnasta. Varastointiaika, paikka ja myös tapa vaikuttavat monimutkaisella tavalla saatavan hakkeen laatuun. Hakkeen lämpöarvo heikkenee hyvin nopeasti varastoinnissa ja siksi energiapuut haketetaan yleensä juuri ennen käyttöä. Energiapuun kosteuden muutoksia on kyllä tutkittu, mutta puusta haihtuvien energiapitoisten aineiden määristä ei ole juurikaan tietoa.

Klapipuut on aina kuivattu ennen polttoa, jotta puiden sisältämästä energiasta saadaan poltossa suurempi osa talteen. Myös ns. päältä sytytyksen on todettu lisäävän energian saantoa savukaasujen täydellisemmän palamisen ansiosta. Polton tulisi tapahtua riittävän korkeassa lämpötilassa, jotta heikommin kuivuneet palaisivat puhtaasti. Myös kaikki haketettava puu pienissä hakevoimaloissa pyritään kuivaamaan ennen polttoa. Tehtyjen analyysien mukaan ilman kuivausta saaduissa tuloksissa oli huomattavat erot lämpöarvoissa, kuten oli odotettavissakin. Männyn sydänpuun lämpöarvo on pienemmän kosteuden ja suuremman uuteainepitoisuuden johdosta merkittävästi korkeampi (taulukko 2) kuin mantopuulla. Kosteus ei ollut suinkaan mikään vakio sydänpuunäytteissä ja myös lämpöarvojen hajonnat olivat melko suuret. Sydänpuu sisältää esimerkiksi veteen vähäliukoisia hartsia- ja rasvahappoja mantopuuta enemmän, samoin kuin erilaisten uuteaineiden pitoisuudet vaihtelevat sydänpuun eri syvyyksillä (Sjöström 1993). Nämä ovat merkittäviä tekijöitä

myös lämpöarvojen vaihtelussa. Kosteuden muuttumista säätekijöiden ja vuodenaikojen mukaan on selvitetty kaikilla puutavaralajeilla, koska tieto on hyvin hyödyllistä logistiikassa, jalostuksessa ja myös energiakäytössä.

Pölkkyjen kosteutta ei voida laskea aivan niin luotettavasti manto- ja sydänpuun kosteuksien avulla runkokäyräteknikkaa (Laasasenaho 1982) käyttäen kuin ennen näitä tutkimuksia oletettiin, koska myös sydänpuun kosteus vaihtelee eri vuodenaikoina. Erilaisia käytännön vaatimia puutietoja voidaan kuitenkin selvittää runkokäyrien laskentamenetelmiä kehittämällä, koska puiden rakenteelliset ja kemialliset ominaisuudet noudattavat malleja, jotka voidaan matemaattisesti ohjelmoida.

Puiden valmistautuessa talveen niissä tapahtuu kemiallisia reaktioita, joiden ansiosta elävät solut mantopuussa, jällessä ja nilassa eivät jäädy. Syksyllä puissa esimerkiksi tärkkelys muuttuu energiapitoiseksi sokereiksi (Jyske ym. 2015). Tällaiset reaktiot kuluttavat energiaa, joten periaatteessa puun lämpöarvon voisi ajatella laskevan. Taulukon 3 arvoista voisi päätellä, että männyn sekä manto-, että sydänpuun lämpöarvot ovat kevättalvella alemmat. Kuusen luvuista ei voi vataavaa nähdä, eikä asia ole luonnollisestikaan näin yksinkertainen, sillä puu saa auringon säteilystä energiaa myös syksyllä talveen varautumiseen sekä neulasten että rungon kautta. Männyn runkojen on havaittu erittävän hyvin energiapitoisia aineita kuoren läpi keväällä lämpötilan noustessa (Vanhatalo ym. 2015).

Erot kuivaamattomien näytteiden lämpöarvojen välillä (taulukko 3) selittyvät suurelta osin näytteiden kosteuseroilla. Männyllä oli vähän suuremmat lämpöarvot kuin kuusella. Männyssä on enemmän terpeenejä, jotka osittain haihtuvat kuivattaessa puuta, joten nämä voisivat olla syy, joka on mittauksin varmennettavissa. Kokemukset osoittavat, että usein pystyyn kuolleissa (keloutuneissa) männnyissä säilyy lämpöarvo pitkään, mutta kuusen kelot kevenevät ja menettävät lämpöarvoaan huomattavasti jo muutaman vuoden jälkeen.

Tähän saakka on oletettu, että sydänpuun kosteus ei juuri vaihtelee, koska kosteuden vaihtelusta ei ole saatavilla tutkimustietoa. Tekemämme kokeet osoittivat, että sydänpuun kosteus vaihtelee säteen suunnassa. Vaikka osaisimme laskea sydänpuun läpimitan erikokoisilla rungon osilla, ei veden kokonaismäärää voikaan laskea tarkasti sydänpuun ja mantopuun osuuksien avulla, sillä kosteusvaihtelut niidenkin sisällä olisi tunnettava.

Tärkeä tekijä sekä kosteuden että lämpöarvojen määrittämiseksi on estimoida sydänpuun läpimitta kullakin korkeudella rungossa. Alustavat laskentamenetelmät, joilla sydänpuun määrä runkopuussa voidaan laskea, on jo kehitetty (Vuosalmi 2016). Koska kosteudessa on huomattava ero manto- ja sydänpuun välillä, rungon sisältämän veden määrä voidaan laskea, kun kosteuden vaihtelut tunnetaan. Jo nyt kehitetyillä menetelmillä voidaan muutaman prosenttiyksikön tarkkuudella laskea veden määrä männyn ja kuusen runkopuussa eri vuodenaikoina. Myös eri uuteaineiden pitoisuudet vaihtelevat sydänpuussa säteen suunnassa (Sjöström 1993). Tarkkuuden parantamiseksi vaaditaan lisää tutkimusta sydänpuun ja uuteaineiden määristä eri ilmastovyöhykkeillä ja eri puulajeilla sekä kosteuden vaihtelusta varsinkin kasvukauden aikana.

Puista haihtuu erilaisia aineita varastoinnin aikana ja puiden kosteus ja lämpötila ovat tärkeitä tekijöitä näissä prosesseissa. Pitäisikin tutkia, miten erilaiset varastointiajat vaikuttavat erilaisten uuteaineiden pitoisuuksiin ja sitä kautta myös energiapuiden lämpöarvoon. Erilaisia tutkimuksia on kyllä tehty, joten tietoa on varmasti jo olemassa, mutta tietoja ei ole laitettu siihen muotoon, että kosteus- ja lämpöarvo voitaisiin helposti mallintaa. Tässä työssä oli tarkoitus tutkia myös erilaisten energiapitoisten haihtuvien aineiden määriä puuaineessa palamisen kannalta. Määritettäessä puun kosteutta ja kuivattaessa näyte yli 100 °C -asteessa standardimenetelmin, siitä haihtuu myös näitä energiapitoisia aineita veden lisäksi. Mitä energiapitoisempi aine on, sitä helpommin se haihtuu lämmössä, aivan kuten tislattaessa maaöljystä erilaisia polttoaineita. Aineiden haihtuvuus vaikeuttaa myös tuloksiemme tulkintaa. Näytteidemme pihkapitoisuus lastun kuivatussa osassa on erilainen kuin pommikalorimetriin laitetussa osassa. Näitä asioita on tarkoitus selvittää jatkotutkimuksissa.

Tuorepoltto lämpölaitoksissa tulee mullistamaan puiden energiakäyttöä lähivuosina. Kauhavalla sovelletuin keinoin nykyisin puuperäisistä polttoaineista tuotettu energiamäärä lämpölaitoksissa voidaan saada huomattavasti pienemmällä puumäärällä, joten kysymys on hyvin merkittävästä asiasta paitsi metsätaloudessa myös koko maan energiahuollossa. Hakkeen polton pienet päästöt sekä poltossa syntyvien jätteiden hyötykäytön kehittäminen parantavat energiapuun kilpailukykyä sekä ilmastokysymysten että kannattavien työpaikkojen syntymisen muodossa. Monet muutkin tekijät puoltavat energian tuoton hajauttamista. Energiapuiden varastoinnissa syntyy pääomakustannuksia ja monessa muodossa niiden energiamäärän vähentymistä. Kiinnostus metsien hoitoon lisääntyy, koska pienempää puustoa voidaan korjata kannattavasti. Jo nykyisin puuta lahoaa ilman minkäänlaista käyttöä Suomen metsiin noin 5 milj. m³ vuosittain, mikä usein unohdetaan keskusteltaessa metsien vaikutuksesta hiilidioksidipäästöihin.

Ilmaston kannalta hiilidioksidin (CO₂) tuottaminen ilmakehään puun palaessa on aiheuttanut väittelyä siitä onko puu uusiutuva polttoaine vai laskettava osittain fossiiliseksi, kuten turpeen ajatellaan olevan sen hitaasta syntymisnopeudesta johtuen. Tästä syystä CO₂:n hyötykäyttö on voitava ratkaista polttolaitoksissa. Lupaavimmissa keräyssysteemeissä ilmassa olevasta CO₂:sta on saatu muunnettua katalyyttisesti metanoliksi yli 70 prosenttia (Kothandaraman ym. 2016). CO₂:n kriittinen lämpötila on 31,4 °C (ylin lämpötila, jossa CO₂-kaasu voidaan saada nesteetymään) ja siksi savukaasut on jäähdytettävä tuon lämpötilan alapuolelle, jotta keräys olisi tehokasta. Samalla saadaan tietenkin talteen CO₂:n höyrystymislämpöä samoin kuin vedenkin tiivistyessä nesteeksi aktiivisessa lauhduttajassa. CO₂:n hyötykäyttö voi olla moninaista, mutta pienten voimaloiden läheisyydessä voi ajatella esim. kasvihuoneiden käyttöön liittyviä tarpeita.

Energiapuun logistiikkaketjuja ja myös hinnoittelua tulisi kehittää, koska nykyiset menetelmät on kehitetty kuivemman puun polttotekniikkaa varten ja siten tuoreen puun polttolaitosten käytön optimointi vaatii uusia ratkaisumalleja. Tämänkin tutkimuksen perusteella on pääteltävissä, että isompien lämpölaitosten kannattaa polttaa tuoretta puuhaketta ja ottaa savukaasujen lämpö aktiivisesti talteen. Energiapuuta ei siis kannata pelletoida kuin harvoissa erikoistapauksissa, joissa on pienen luokan lämmöntarve ja pellettien polttoon on jo olemassa laitteet.

Suomessa on vähän erilaisia energiapuulajeja, joten kokeilemalla voidaan todeta, miten paljon kustakin puulajista saadaan energiaa talteen erilaisilla hakkeen polton kattilamalleilla ja säädöillä sekä lämmön talteenoton ratkaisulla erikokoisissa lämpölaitoksissa. Puun energiakäytön järkevöittäminen on Suomessa yksi tärkeimpiä ja kannattavimpia tutkimus-, kehittämis- ja investointikohteita lähivuosina. Puun polton tuottavuutta voidaan nostaa kymmeniä prosentteja lyhyellä aikavälillä, joten kuntienkin talouden kannalta asialla on suuri merkitys.

Kiitokset

Puiden laskennan kehittämiseksi runkokäyräteknikkaa hyödyntäen ja puiden kosteuden ja lämpöarvojen tutkimiseksi on Marjatta ja Eino Kollin säätiö myöntänyt kolmeen otteeseen tutkimusrahaa emeritusprof. Jouko Laasasenalolle. Rahoituksen turvin on voitu kehittää uusia laskentamalleja opiskelijoiden työvoimaa hyödyntäen. Tästä tieteen edistämisestä haluamme säätiötä kiittää. Tämän julkaisun kirjoittamisen päävastuu on Jouko Laasasenalolla. Lämpöarvojen määrityksen asiantuntijana on toiminut FT Raimo Timonen ja analyysimittaukset pääosiltaan sekä laskelmat on suorittanut fil. yo. Heikki Poso. Myös Hyytiälän metsäaseman laitteita olemme hyödyntäneet tutkimuksissa ja kiitämme tutkimusteknikko Silja Pirttijärveä osallistumisesta maastomittauksiin maaliskuussa 2016 ja tutkimuksen käsikirjoituksen tarkastajia, etenkin Jari Lindbladia kriittisistä huomioista sekä tohtoriopiskelija Anni Vanhataloa rakentavista kommentteista.

Kirjallisuusluettelo

- Aarnio A., Kananen E., Keltto V., Vartiainen V.-M., Laasasenaho J., Kiviluoma P., Kuosmanen P., (2012). Device for branch volume distribution measurement. 8th International DAAAM Baltic Conference “INDUSTRIAL ENGINEERING” 19–21 April, Tallinn, Estonia.
- Bowyer J., Shmulsky R., Haygreen J. (2007). Forest products and wood science: an introduction. 5th edition. Blacwell Publishing.
- Flæte P.O., Høibø O. (2009). Models for predicting vertical profiles of heartwood diameter in mature Scots pine. *Canadian Journal of Forest Research* 39(3): 527–536. <https://doi.org/10.1139/X08-187>.
- Jyske T., Suuronen J.-P., Pranovich A., Laakso T., Watanabe A., Kuroda K., Hisashi A. (2015). Seasonal variation in formation, structure, and chemical properties of phloem in *Picea abies* as studied by novel microtechniques. *Planta* 242(3): 613–629. <https://doi.org/10.1007/s00425-015-2347-8>.
- Kothandaraman J., Goeppert A., Czaun M., Olah G.A., Prakash S. (2016). Conversion of CO₂ from air into methanol using a polyamine and a homogeneous ruthenium catalyst. *Journal of the American Chemical Society* 138(3): 778–781. <https://doi.org/10.1021/jacs.5b12354>.
- Laasasenaho J. (1982). Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. *Seloste: Männyn, kuusen ja koivun runkokäyrä- ja tilavuusyhtälöt*. *Communicationes Insitituti Forestalis Fenniae* 108. 74 s. [Väitöskirja].
- Laasasenaho J., Timonen R. (2016). Pieni virhe mullistaa puun polttoa. [Yliökirjoitus Maaseudun Tulevaisuus -lehdessä 11.4.2016].
- Luoma V. (2013). Malli männyn sydänpuun läpimitan ja tilavuuden ennustamiseksi. Helsingin yliopisto, Metsätieteiden laitos. [Pro gradu tutkielma]. https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/41931/Ville_Luoma.pdf?sequence=1.
- Marjomaa J., Uurtamo K. (1996). Puutavaran tilavuuspainon määrittäminen. Metsätehon raportti 7. http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/1996/12/metsatehon_raportti_007.pdf.
- Motiva. [Verkkodokumentti]. Biopolttoaineiden lämpöarvoja. Saatavissa: http://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/bioenergia/tietolahteita/biopolttoaineiden_lampoarvoja.
- Ojansuu R., Maltamo M. (1995). Sapwood and heartwood taper in Scots pine stems. *Canadian Journal of Forest Research* 25(12): 1928–1943. <https://doi.org/10.1139/x95-208>.
- Ronkainen P., Sirkiä S., Lindblad J. (2014). Harvennusenergiapuun ja latvusmassan kosteuden määrittäminen metsäkuljetuksessa. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2014: 211–228. <https://doi.org/10.14214/ma.5882>.
- Sjöström E. (1993). Wood chemistry, fundamentals and applications. Second edition. Academic Press, Inc.
- Vanhatalo A., Chan T., Aalto J., Korhonen J.F., Kolari P., Hölttä T., Nikinmaa E., Bäck J. (2015). Tree water relations can trigger monoterpene emissions from Scots pine stems during spring recovery. *Biogeosciences* 12: 5353–5363. <https://doi.org/10.5194/bg-12-5353-2015>.
- Vuosalmi L. (2016). Männyn sydänpuun muodostuminen ja mallintaminen. Helsingin yliopisto, Metsätieteiden laitos. [Pro gradu tutkielma]. <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/160189?show=full>.

15 viitettä.