

Aurinkoenergian hyödyntäminen puuhakkeen kuivaamisessa

Hilli Anu, Posio Mikko, Kylmänen Erkki, Åman Eemeli, Åman Kasper

4.4.2017 ::

Metatiedot

Nimeke: Aurinkoenergian hyödyntäminen puuhakkeen kuivaamisessa

Tekijä: Hilli Anu; Posio Mikko; Kylmänen Erkki; Åman Eemeli; Åman Kasper

Aihe, asiasanat: aurinkoenergia, energiantuotanto, hake, kuivaus, puutavara

Tiivistelmä: Kesäaikaan tuoreen kaadetun puutavaran ja siitä valmistetun hakkeen laatua heikentävät nopeasti lahoittaja- ja homesienet ja lämpöarvo laskee. Tämän vuoksi hakkeeksi tuleva puutavara kuivataan luonnon olosuhteissa tai tuoreesta puusta valmistettu hake kuivataan keinokuivauksella. Hakkeen kuivauksen energiantarpeeseen vaikuttavat muun muassa hakkeen alkukosteus, palakoko, kerralla kuivattava määrä, kuivauslämpötila, ilman suhteellinen kosteus ja ilman virtausnopeus ja kuivaustapa.

Tässä työssä selvittiin hakkeen kuivauksen energiankulutusta avolavakuivurissa auringon lämpöenergiaa hyödyntämällä tai kuivaamalla hake keskipakoispuhaltimen ilmavirralla ulkoilman lämpötilassa.

Auringon lämpöenergiasta saatiin hyötyä hakkeen kuivauksessa, sillä sähkönkulutus oli vähäisempää ja hake-erät kuivuivat nopeammin. Sähkönkulutus kuivauserissä vaihteli 6,0–9,7 kWh. Hakkeen kuivausaika oli keskimäärin neljä tuntia, kun aurinkokeräimen lämpöenergiaa hyödynnettiin ja pelkän keskipakoispuhaltimen ilmavirralla kuivausaika oli yli viisi tuntia. Myös ilman kosteuspiitoisuus vaikutti selvästi hakkeen kuivumiseen.

Julkaisija: Oulun ammattikorkeakoulu, Oamk

Aikamääre: Julkaistu 2017-04-04

Pysyvä osoite: <http://urn.fi/urn:nbn:fi-fe201703031957>

Kieli: suomi

Suhde: <http://urn.fi/URN:ISSN:1798-2022>, ePooki - Oulun ammattikorkeakoulun tutkimus- ja kehitystyön julkaisut

Oikeudet: Julkaisu on tekijänoikeussäännösten alainen. Teosta voi lukea ja tulostaa henkilökohtaista käyttöä varten. Käyttö kaupallisiin tarkoituksiin on kielletty.

Näin viittaat tähän julkaisuun

Hilli, A., Posio, M., Kylmänen, E., Åman, E. & Åman, K. 2017. Aurinkoenergian hyödyntäminen puuhakkeen kuivaamisessa. ePooki. Oulun ammattikorkeakoulun tutkimus- ja kehitystyön julkaisut 7. Hakupäivä 4.4.2017. <http://urn.fi/urn:nbn:fi-fe201703031957>.

Hake sopii energiantuotannossa niin yksittäisten rakennusten lämmitykseen kuin kaupunkien kaukolämpöyhtiöiden voimalaitoksiin, joissa hakkeella tuotetaan kaukolämmön lisäksi sähköä. Suomessa haketta käytettiin vuonna 2015 yhteensä 7 349 000 m³, joka vastaa 587 920 litraa öljyä, joten ympäristöystävällinen ja kotimainen hake on merkittävässä roolissa Suomen energiaomavaraisuuden parantamisessa. Laadukas puuhake syntyy hyvästä raaka-aineesta, kunnollisesta haketuksesta ja oikeasta hakkeen kosteudesta.

Tuoreen puun ja siitä valmistetun hakkeen kosteuspitoisuus vaihtelee 43–60 % puulajista ja kaatoajankohdasta riippuen [1]. Kosteaa haketta ei voida varastoida, sillä ongelmaksi muodostuvat jäätyminen ja mikrobitoiminta. Mikäli kosteaa haketta varastoidaan, varastoinninaikaiset kuiva-ainetappiot alentavat hakkeen lämpöarvoa. Myös puuta lahottavat sienet kasvavat hyvin puun kosteuden ollessa 25–60 % [2].

Hakkeen, kuten muunkin puumateriaalin, kuivumiseen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa puulajin ominaisuudet, alkukosteus, palakoko, kerralla kuivattava määrä, kuivauslämpötila, ilman suhteellinen kosteus ja ilman virtausnopeus ja kuivaustapa [3].

Suurin osa energiaksi käytettävästä puusta kuivataan luonnonolosuhteissa. Keinokuivauksessa pyritään lyhentämään kuivausaikaa lisälämmön ja puhaltimien avulla, joista kylmä- ja lämminilmakuivaus ovat Suomessa yleisimpiä. Kylmäkuivauksella tarkoitetaan kuivausta, jossa puhallusilmaa lämmitetään muutamia asteita auringon säteilyenergiaa hyödyntäen tai puuraaka-aine kuivataan ulkoilman lämpötilassa. Lämminilmakuivauksessa kuivausilman lämpötila kohotetaan 60–70 asteeseen. [4]

Työn tavoitteena oli selvittää, miten aurinkolämpökeräimet sopivat hakkeen kuivatuksen lämmönlähteeksi ja hakkeen kuivaukseen energiankulutusta avolavakuivurissa auringon lämpöenergiaa hyödyntämällä tai kuivaamalla hake pelkästään keskipakoispuhaltimen puhallusilmalla ulkoilman lämpötilassa.

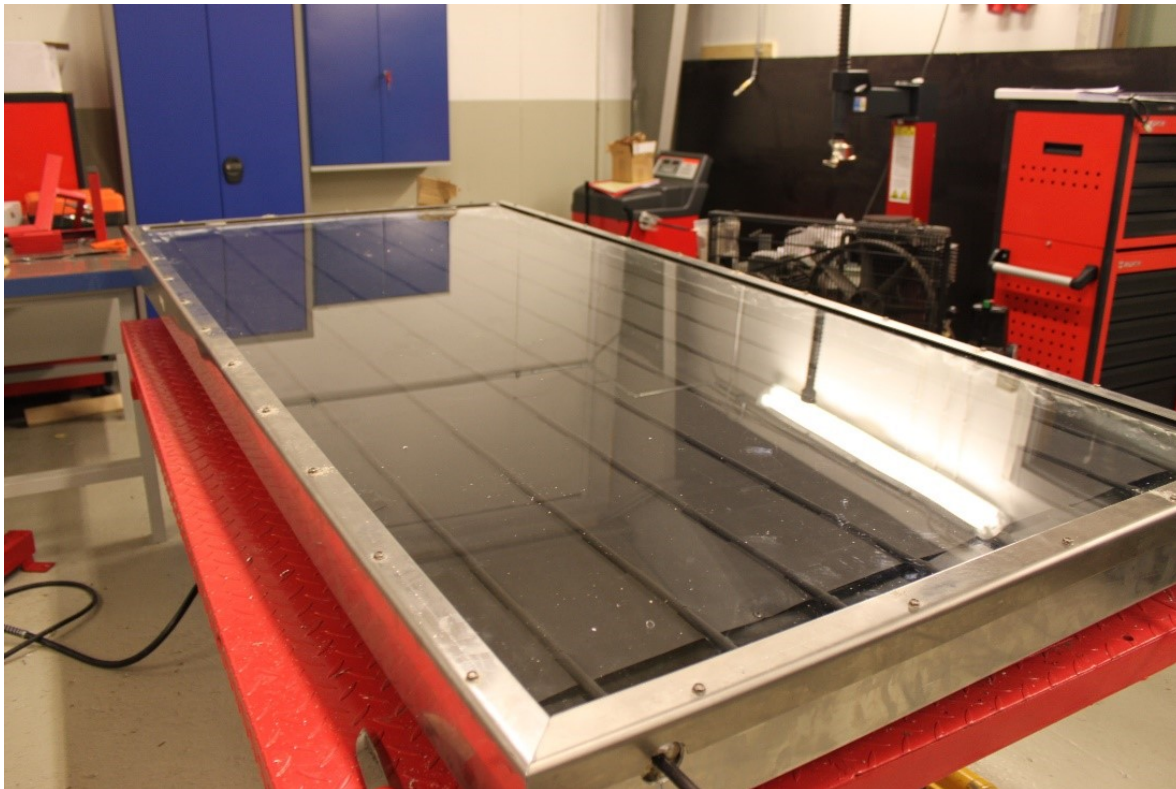
Aineisto ja menetelmät

Aurinkokeräimestä saatavan lämmön hyödyntämistä hakkeen kuivaamisessa testattiin Oulun ammattikorkeakoulun biomassakuivurissa (kuva 1). Kuivurin pohjassa on suomulevy, jonka läpi kuivausilma puhalletaan kuivuriin keskipakoispuhaltimella (Ventur Finland Oy Ab:n MSB-2-355/125-220). Keskipakoispuhallin toimii 2,2 kilowatin sähkömoottorilla. Kuivuriin on liitetty Vacon 10-taajuusmuuntaja, jolla puhaltimen kierrosnopeutta voidaan säätää. Kuivausilmaa voidaan tarvittaessa lämmittää sähkövastuksella tai lämmönvaihtimella, kuten aurinkolämmön hyödyntämisen yhteydessä tehtiin.



KUVA 1. Oulun ammattikorkeakoulun biomassakuivuri

Aurinkokeräin oli kooltaan 1 m x 2 m (kuva 2) ja teholtaan noin yhden kilowatin. Aurinkokeräin sijoitettiin peräkärkyyn, joten sen suuntaa pystyttiin muuttamaan auringon säteilykulman mukaan. Aurinkokeräimen kallistuskulma oli noin 38°. Aurinkokeräimen lämmittämä neste kierrätettiin kuivuriin menevän tuloilmakanavan eteen asennettuun lämmönvaihtimeen, aurinkokeräimen ja lämmönvaihtimen lämpötilaeron kasvaessa yli 5°C:een. Aurinkokeräimen ja lämmönvaihtimen lämpötiloja mittasi pumppuyksikkö, jossa oleva kiertovesipumppu käynnistyy lämpötilaerojen kasvaessa tarpeeksi suureksi. Lämmönvaihtimena toimi messinkinen syyläri. (Ks. [video vastaavanlaisen keräimen rakentamisesta.](#))



KUVA 2. Auringosta saatava säteilyenergia muutettiin lämmöksi tasokeräimen avulla

Hake oli valmistettu koivurangasta. Hake-erien kuivaus aurinkokeräimen lämpöenergiaa hyödyntämällä ja keskipakoispuhaltimen (pyörimisnopeus 50 herziä) ilmavirralla suoritettiin 13.6., 16.6. ja 22.6.2016. Pelkkää keskipakoispuhaltimen ilmavirtaa käyttäen kuivaukset suoritettiin 14.6., 17.6. ja 20.6.2016. Haketta kuivattiin kerralla noin 0,5 i-m³. Kaikkien hake-erien kuivaus aloitettiin kello 10–11.

Hakkeen tavoitekosteus oli 25 %. Hakkeen kosteuspitoisuutta seurattiin Wile bio moisturen hakkeen kosteuspitoisuuden mittarilla puolen tunnin välein. Kosteuspitoisuus laskettiin kuuden mittauksen keskiarvona. Mittauksista kaksi suoritettiin lavakuivurin etuosasta, kaksi keskeltä ja kaksi mittausta perästä. Lisäksi hakkeen alku- ja loppukosteus määritettiin uunikuvausmenetelmällä: märkápainoa kohti laskettu kosteus saapumistilassa (%) [5]. Hakkeen irtotiheys määritettiin kuivauksen alkaessa ja päättyessä. Ilmankosteutta, ilman lämpötilaa, auringon säteilytehoa ja sähkönkulutusta mitattiin puolen tunnin välein. Hake-erää käännettiin jokaisen mittauksen yhteydessä tasaisen kuivumisen aikaansaamiseksi.

Tulokset

Hakkeen alkukosteus oli keskimäärin 43 % ja irtotiheys 246–277kg/m³. Ilmankosteus kuivauserien aikana oli keskimäärin 58 % ja lämpötila 17,5 astetta (taulukko 1 ja 2). Ilmankosteus oli kuivauserien aikana korkeimmillaan 80 % ja alhaisimmillaan 34 %. Auringon säteilyteho vaihteli 100–765 W/m², ollen keskimäärin 440 W/m². Kolmannessa kuivauserässä auringon säteilyteho oli koko kuivausajan huomattavasti korkeampi kuin muina päivinä.

Hake kuivui aluksi hyvin hitaasti, sillä ensimmäisen kahden tunnin aikana hake-erien kosteuspitoisuus laski vain muutaman prosenttiyksikön. Kuivuminen nopeutui selvästi, kun hake-erien kosteuspitoisuus oli laskenut noin 35 %:iin. (Kuviot 1 ja 2.) Aikaa hakkeen kuivaukseen kului keskimäärin neljä tuntia aurinkokeräimen lämpöenergiaa hyödyntäen ja pelkän keskipakoispuhaltimen ilmavirralla keskimäärin 5 tuntia 16 minuuttia.

Aurinkokeräintä käytettäessä kuivausajat olivat 0,5–1,5 tuntia lyhyempiä. Kuivan hakkeen irtotiheys oli 205–215 kg/i-m³. (Taulukot 1 ja 2.)

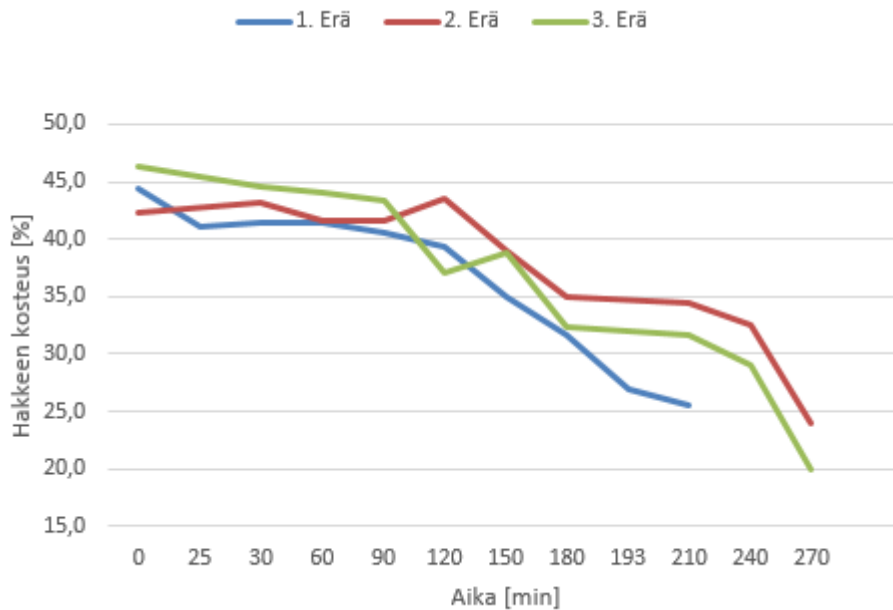
Sähkönkulutus hake-erien kuivauksessa oli keskimäärin 6,7 kWh, kun käytettiin aurinkokeräintä ja 8,7 kWh kuivattaessa hake pelkällä keskipakoispuhaltimen ilmavirralla (taulukot 2 ja 3). Sähkönkulutus oli keskimäärin 1,9 kWh pienempi hyödynnettäessä aurinkoenergiaa ja eräkohtainen vaihtelu oli 1–2,3 kWh. Hake kuivui noin 2,1 % käytettyä kilowattituntia kohden käytettäessä aurinkokeräintä ja vastaavasti 1,85 %, kun kuivaukseen käytettiin vain keskipakoispuhallinta.

TAULUKKO 1. Hake-erien kuivaus aurinkokeräimellä ja keskipakoispuhalltimella

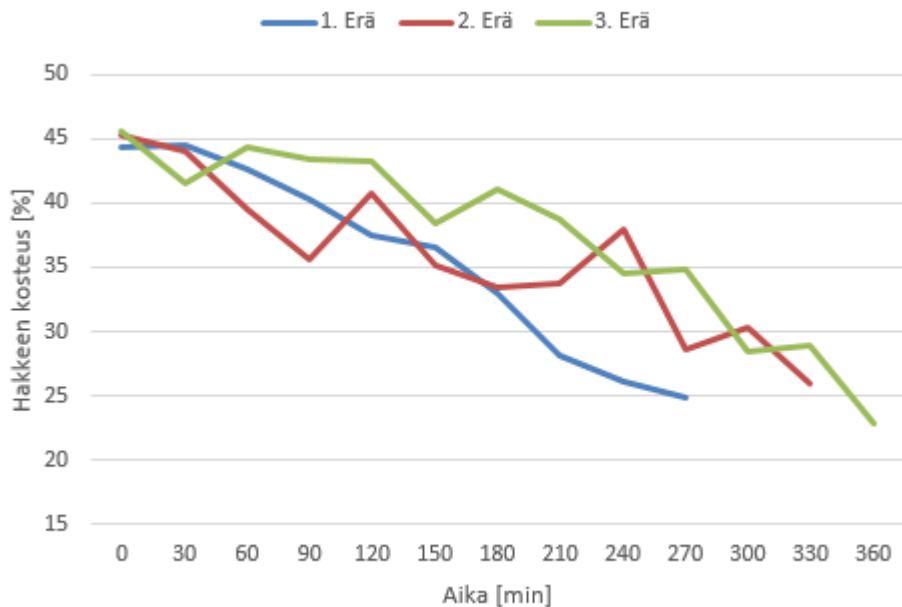
| | Alku-kosteus % | Loppu-kosteus % | Irto-tiheys alku kg/i-m ³ | Irto-tiheys kuiva kg/i-m ³ | Ilman-kosteus % | Ilman lämpö-tila | Säteily-teho W/m ² | Kesto min | Sähkön kulutus kWh |
|------------------|----------------|-----------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-----------------|------------------|-------------------------------|-----------|--------------------|
| Erä 1 | 47,2 | 34,9 | 259,7 | 207,3 | 55,9 | 15,5 | 345 | 218 | 6,0 |
| Erä 2 | 43,6 | 27,7 | 249,4 | 204,5 | 49,0 | 17,8 | 351 | 240 | 7,1 |
| Erä 3 | 39,4 | 24,9 | 245,9 | 215,1 | 61,3 | 19,5 | 624 | 270 | 7,4 |
| Keskiarvo | 43,4 | 29,2 | 251,7 | 209,0 | 55,4 | 17,6 | 440 | 243 | 6,7 |

TAULUKKO 2. Hake-erien kuivaus keskipakoispuhalltimella

| | Alku-kosteus % | Loppu-kosteus % | Irto-tiheys alku kg/i-m ³ | Irto-tiheys kuiva kg/i-m ³ | Ilman-kosteus % | Ilman lämpö-tila | Kesto min | Sähkön kulutus kWh | Teho kW |
|------------------|----------------|-----------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-----------------|------------------|-----------|--------------------|---------|
| Erä 1 | 42,8 | 28,1 | 276,9 | 213,2 | 51,4 | 18,5 | 255 | 7,0 | 1,65 |
| Erä 2 | 44,1 | 28,9 | 253,1 | 205,7 | 67,8 | 17,7 | 331 | 9,4 | 1,70 |
| Erä 3 | 40,6 | 22,9 | 256,8 | 211,1 | 61,0 | 16,0 | 361 | 9,7 | 1,61 |
| Keskiarvo | 42,5 | 26,6 | 262,3 | 210,0 | 60,1 | 17,4 | 316 | 8,7 | 1,65 |



KUVIO 1. Hake-erien kuivuminen aurinkokeräintä käytettäessä



KUVIO 2. Hake-erien kuivuminen keskipakoispuhaltimen ilmavirtaa käyttäen

Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset

Auringon lämpöenergiasta saatiin hyötyä hakkeen kuivauksessa. Kuivaus tehostuu, kun kuivausilmaa lämmitetään. Lämmitetyn ilman kuivauskykyyn vaikuttaa ilman lämpötila ja suhteellinen kosteus. Jos kuivausilmaa saadaan lämmitettyä yhdellä asteella, tällöin ilman suhteellinen kosteus alenee 5 prosenttiyksikköä ja ilman kuivauskyky paranee. Ilman vedensitomiskyky paranee noin $0,3 \text{ g/m}^3$, jos kuivausilman lämpötila nousee yhden asteen. [21]

Ympäristöystävällinen aurinkoenergia soveltui hakkeen kuivauksen lämmönlähteeksi. Auringon lämpöenergiasta saatava hyöty hakkeen kuivauksessa oli selvä, sillä se lyhensi kuivausaikaa huomattavasti. Auringon lämpöenergiasta saatava hyöty olisi voinut olla suurempikin, sillä nyt käytetyssä järjestelmässä keskipakoispuhallin oli voimakas suhteessa aurinkokeräimen tuottamaan tehoon, joten keräimeen olisi tarvittu useampi aurinkopaneeli.

Hakkeen kosteuspitoisuudet jäivät hieman korkeiksi tavoitteeseen nähden ja hake ei kuivunut tasaisesti, vaikka haketta käännettiin puolen tunnin välein. Lehtipuilla on havaittu kosteuspitoisuuden vaihtelua, jota esiintyy niin metsiköiden kuin puuyksilöiden välillä ja pienissä rungoissa kosteuspitoisuuden vaihtelu on suurinta [31]. Myös hake-erän palakoko saattaa vaikuttaa kuivumisen tasaisuuteen. Kuivausilma pyrkii virtaamaan helpointa kautta kuivattavan materiaalin läpi, jolloin harvempi rakenne eli suurempi palakoko kuivuu nopeammin kuin tiivis, pieni palakoko [61].

Sähköä yhden hakeirtokuution kuivaamiseen kuluu noin 6–10 kWh [41] [71]. Näissä tuloksissa sähkönkulutus oli saman suuruinen, kun kuivattava määrä oli noin puoli irtokuutiota. Lavakuivuri sijaitsi lautarakenteisessa hallissa, jossa se on alttiina sään vaihteluille. Ilman suhteellisen kosteuspitoisuuden nousu näkyi kuivaustuloksissa selvästi. Pisin kuivausaika ja suurin sähkönkulutus olivat erissä, joissa ilmakeuhasteus oli yli 60 %. Tällöin hake kuivui lähes $0,5 \text{ %}$ -yksikköä vähemmän kilowattituntia kohden verrattuna eriin, joissa ilman kosteus oli alhaisempi.

Hakkeen kuivaus parantaa polttoaineen laatua, sen energiasisältö kasvaa ja homehtumisriski alenee. Kosteuspitoisuus luonnonkuivauksella kuivatussa hakkeessa jää yleensä 30–50 %:iin, mutta hyvin onnistuessaan voidaan jopa päästä 25 % kosteuspitoisuuksiin. Jotta luonnonkuivauksella hake saadaan kuivumaan hyvin, edellytyksenä on hakekasan tuulettavuus alapäin. [41] [61] Koneellisessa keinokuivauksessa hakkeen kosteuspitoisuus saadaan halutuksi. Kosteuspitoisuudeltaan 45 % koivuhakkeen energiasisältö on noin $0,7 \text{ MWh/i-m}^3$, kun puolestaan 25 % kosteuteen kuivatun hakkeen energiasisältö on noin $1,0 \text{ MWh/i-m}^3$ [81].

Hakkeen kosteuspitoisuudella on myös merkitystä sen kuljetuskustannuksiin: 120 i-m^3 :n hakeauton kuorman paino 55 %:in kosteudessa on 42 667 kg, kun taas kosteuden ollessa 35 % se painaa 29 538 kg [91].

Artikkeli on laadittu osana [PUUTA-hanketta](#) (Puuraaka-aineen hyödyntäminen Utajärven kunnassa). Hanketta rahoittaa Pohjois-Pohjanmaan liitto ja Euroopan aluekehitysrahasto. Yksityisrahoitus tulee alueen yrityksiltä. Hanke toteutetaan yhteistyössä Utajärven kunnan, Oulun yliopiston kauppakorkeakoulun ja Oulun Ammattikorkeakoulun kanssa.



Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020

POHJOIS-POHJANMAA
Council of Oulu Region



OAMK
OULUN AMMATTIKORKEAKOULU

Lähteet

1. [^] [Routa, J.](#) 2014. Energiapuuvarastojen kosteusmallit. Laava-seminaari, Vantaa 19.2.2014.
2. [^] [ab](#) [Borén, H. & Pietilä, J.](#) 1995. Hakkeen kuivaus imuilamalla. Maatalouden tutkimuskeskus. VAKOLAn tiedote 70. Hakupäivä 22.11.2016.
<http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2014081532918>
3. [^] [ab](#) [Kauppinen, V-P.](#) (toim.) 2014. Puupolttoaineen kuivuriopas. Suomen Metsäkeskus. Vammalan kirjapaino Oy, Vammala. Hakupäivä 22.11.2016.
<https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/kuivuriopas-web.pdf>
4. [^] [abc](#) [Lepistö, T.](#) (toim.) 2010. Laatuhaakkeen tuotanto-opas. 2. p. Metsäkeskus. Vammalan kirjapaino, Sastamala. Hakupäivä 22.11.2016.
<https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files...>
5. [^] [VTT.](#) 2014. Puupolttoaineiden laatuohje VTT-M-07608-13. Hakupäivä 22.11.2016.
http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2014/VTT-M-07608-13_2014_%20update.pdf
6. [^] [ab](#) [Niemitalo, V.](#) 2011. Hakkeen kuivaus; yhteenvetoa eri koe- ja tutkimustoiminnasta.
7. [^] [Rahikainen, O.](#) 2005. Hakkeen kuivaus bioenergiakeskuksen monikäyttökuivurissa auringon energiaa lisälämmön lähteenä hyödyntäen. Bioenergiakeskuksen julkaisusarja nro 17. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Hakupäivä 22.11.2016.
<https://www.theseus.fi/handle/10024/20522>
8. [^] [Energiapalvelu.](#) 2016. Energialaskuri. Hakupäivä 24.1.2017.
<http://energiapalvelu.fi/fi/energialaskuri>
9. [^] [Hakonen, T. & Laurila, J.](#) 2011. Metsähakkeen kosteuden vaikutus polton ja kaukokuljetuksen kannattavuuteen. Seinäjoen ammattikorkeakoulun julkaisusarja B. Raportteja ja selvityksiä 55. Hakupäivä 24.1.2017.
<https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/34746/B55.pdf?sequence=1>