

ENERGIATEHOKAS PUULÄMMITYS

LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tekniikan laitos
Puutekniikka
Opinnäytetyö
Kevät 2013
Pekka Laaksovirta

Lahden ammattikorkeakoulu
Puutekniikan Koulutusohjelma

LAAKSOVIRTA, PEKKA

Energiatehokas puulämmitys

Puutekniikan opinnäytetyö,

26 sivua.

Kevät 2013

TIIVISTELMÄ

Tämä opinnäytetyö on laadittu kehittämään ja tutkimaan energia tehokasta puulämmitystä. Opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia puun ominaisuuksia polttoaineena ja sen energiaominaisuuksia. Työssä tutkitaan myös kuinka puuta polttamalla saadaan hyödynnettyä mahdollisimman paljon energiaa. Energian hinnan nousun johdosta kotitalouksien lämmitysjärjestelmiin kuuluu nykyään yhä useammin puulämmitys. Puulämmitystä käytetään joko lisälämmön lähteenä tai päälämmön lähteenä.

Opinnäytetyössä esitellään uudenlainen puulämmitysjärjestelmä vesimiilu. Vesimiilussa lämpöä varaavana aineena on vesi, johon lämpöenergiaa pystytään varaan hyvällä tehokkaasti.

Tietoa opinnäytetyöhön hankittiin energia-alan kirjallisuudesta ja puulämmitystä käsittelevästä kirjallisuudesta. Tiedon hankinnassa käytettiin myös vesimiilun kehittäjä Seppo Laaksovirran tietoutta vesimiilusta.

Avainsanat: puu, lämpöenergia, hyötysuhde, päästöt, lämmönvaraus

Lahti University of Applied Sciences
Degree Program in wood technology

LAAKSOVIRTA, PEKKA:

Energy efficient wood heating

Bachelor's Thesis in wood technology, 26 pages

Spring 2013

ABSTRACT

This thesis was written to investigate and improve energy efficient wood heating. The purpose of the thesis was to investigate the qualities of wood as fuel and its energy features, as well as how it is possible to get the most energy advantage by burning wood. Because of the rise in energy prices, wood heating systems are increasing their popularity in households. Wood heating is often used as the main source or as an additional source of heating.

The thesis introduces a new kind of wood heating system called "vesimiilu". In "vesimiilu" the substance that collects heat is water. Heat energy can be collected in water with good efficiency.

The information for the work was gathered mainly from literature dealing with energy and wood heating. Information was also gathered from Seppo Laaksovirta the inventor of "vesimiilu".

Key words: wood, heat energy, emission.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	PUU POLTTOAINEENA	2
2.1	Palaminen	3
2.2	Pienhiukkaset	4
2.2.1	Puun lämpöarvo	5
2.2.2	Palamisen vaiheet	6
	Kosteuden poistuminen	6
	Pyrolyysi	7
	Jäännöshiilen palaminen	7
3	MARKKINAT	8
3.1	Kilpailu	8
3.2	Kilpailijat	9
3.2.1	La Nordica, Focolare IDRO DSA 80	9
3.2.2	Normatherm, KKH 15	10
3.3	Käytön edistäminen	10
4	HYÖTYSUHDE	11
4.1	Hyötysuhteen laskeminen	12
4.1.1	Suora menetelmä	12
4.1.2	Epäsuora menetelmä	13
	Palamattomien häviöt	14
	Palamattomien kaasujen häviöt	14
	Palamattomien kiintoaineiden häviöt	14
	Savukaasujen terminen lämpöhäviö	15
	Tuhkan mukana poistuva terminen lämpö	15
5	IDEA	17
5.1	Rakenne	17
5.2	Ominaisuudet	21
5.2.1	Lämmönvaraus kyky	21
5.2.2	Lämpöenergian lataaminen uuniin	21
	Kiviuuni	22
	Vesimiilu-uuni	22
5.2.3	Vesimiilun hyötysuhde	23

5.2.4	Käyttöveden lämmitys	25
5.2.5	Lämmön luovutus	25
6	YHTEENVETO	26
	LÄHTEET	27

1 JOHDANTO

Nykyään suurista energian hinnoista johtuen rakentamisessa panostetaan energiatehokkuuteen. Rakennukset suunnitellaan hyvin lämmöneristäviksi ja näin rakennuksista saadaan energiatehokkaampia. Energian hinnat kuitenkin näyttävät vain nousevan, joten pelkästään lämmön eristävyys ei riitä alentamaan energian kuluusta. Jotta päästäisiin pieneen energian kulutukseen, on syytä kehittää lämmitysjärjestelmän tehokkuutta eli hyötysuhdetta. Hieman taaksepäin katseltuna puu on ollut tärkeä lämmön lähde niin teollisuudessa kuin kotitalouksissa. Takat ovat olleet ainoita lämmön lähteitä monissa vanhoissa kotitalouksissa. Puuta on poltettu joko avotakoissa tai varaavissa kivitakoissa. Jotta puun polttaminen saadaan hyötysuhteeltaan vaatimusten tasalle, on takkoja ja uuneja kehiteltävä tehokkaammiksi. Hyvän hyötysuhteen saavuttamiseksi edellytetään, että kaikki energia, joka puun polttamisesta muodostuu, saadaan talteen ja varattua johonkin, josta lämpöä voidaan säännöstellä sopivissa määrin huoneilmaan.

Tämä opinnäytetyö käsittelee puubiomassan energiaominaisuuksia ja sitä, kuinka puubiomassasta saadaan mahdollisimman hyvällä hyötysuhteella energiaa talteen. Lisäksi vertaillaan erilaisia varaavia materiaaleja.

Työn tavoitteena on perehtyä palamisreaktioon ja energian talteenottoon sekä käsitellä puutakkojen ja uunien hyötysuhdetta ja sen kehittämisen tärkeyttä. Opinnäytetyössä myös annetaan ohjeita puupolttoaineen käsittelemiseen sekä tehokkaaseen polttamiseen.

Opinnäytetyö on jaettu kahteen eri osaan. Ensimmäisessä osassa tutustutaan puun palamisreaktioon ja energiaominaisuuksiin sekä tutkitaan tulisijojen markkinoita ja tulisijojen hyötysuhteita. Toisessa osassa kerrotaan vesimiilusta sekä vertaillaan vesimiilua muihin varaaviin tulisijoihin.

2 PUU POLTTOAINEENA

Puubiomassa syntyy kasvien yhteyttämisprosessissa. Vihreät lehdet valmistavat ilmakehän hiilidioksidista ja maaperän vedestä auringon energian avulla yksinkertaisia sokereita. Kasvin elävät solut muokkaavat niistä edelleen monimutkaisempia yhdisteitä, jotka koostuvat hiilestä (C), hapesta (O) ja vedystä (H). Niistä muodostuu puun rakennusaineiksi selluloosaa, hemiselluloosia ja ligniiniä. Puussa on myös erilaisia uuteaineita. Selluloosa on maapallolla tavattavista orgaanisista yhdisteistä runsain. Puuvartisilla kasveilla sen osuus kuivamassasta on 40–50%, lehtipuilla korkeampi kuin havupuilla. Selluloosa koostuu glukoosimolekyylien ($C_6H_{12}O_5$) muodostamista pitkistä ketjumolekyyleistä. Hemiselluloosat, joitten osuus puun biomassasta on 20–35%, muistuttavat alkuainekoostumukseltaan selluloosaa, vaikka koostuvatkin useista erilaisista sokereista. Ligniinin osuus on havupuilla lähes 30 %, mutta lehtipuilla vain 20 % kuivamassasta. (Hakkila 2003,24.)

Yhteyttämisprosessissa metsät sieppaavat siis ilmakehästä hiiltä ja sitovat samalla auringon valoenergiaa kemialliseksi energiaksi. Kun puu tai sen osa kuolee, biomassaa hajoaa hapetusreaktiossa, jossa hiilen ja vedyn sidokset murtuvat ja energia vapautuu. Luonnossa hajoaminen tapahtuu joko puun lahoamisen kautta hitaasti tai metsäpalossa nopeasti. Jos palaminen siirretään suljettuun tilaan, vapautuva energia voidaan ottaa talteen lämmön, höyryn tai sähkön tuottamiseksi. (Hakkila 2003,24–25.)

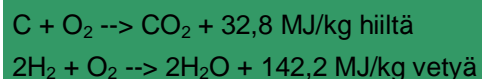
Energiasisältö riippuu polttoaineen kemiallisesta koostumuksesta eli sen hiili- ja vety-yhdisteisiin sitoutuneesta aurinko energiasta. Mitä suurempi hiili- ja vetyypitoisuus on, sitä suurempi on polttoaineen energiasisältö. Puuaineen keskimääräinen hiilipitoisuus on havupuilla 51 % ja lehtipuilla 49 %. Vetyypitoisuus on vastaavasti 6,2 % ja 6,0 %. (Kollmann 1951, Hakkila2003,25.)

2.1 Palaminen

Palamisella tarkoitetaan aineen kemiallista yhtymistä happeen. Happi saadaan yleensä ilmasta, jossa sitä on n. 22 % tilavuudesta. Puu ja tavalliset polttoaineet sisältävät kuitenkin palavina alkuaineita vain hiiltä ja vetyä. Mukana saattaa olla vähän rikkiä ja myös happea, joka ei ole toivottavaa polttoaineessa, koska se pienentää palavien aineiden määrää. Kiinteät polttoaineet, puu ja turve, sisältävät usein paljonkin vettä. Ilmakuiva puu 20 % ja turve jopa 30 %. Pieniä määriä on myös mineraaleja jotka jäävät palamattomina jäljelle tuhkana.

Täydellisessä palamisessa hiili yhdistyy happeen tuottaen hiilidioksidia, ja vety yhdistyy happeen tuottaen vettä (Hakkila 2003,25). Taulukosta 1. nähdään miten energian vapautuminen tapahtuu.

Taulukko 1. Energian vapautuminen



Ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden kannalta ei ole yhdentekevää, onko energia hiili- vai vetyperäistä. Polttoaineen hiilidioksidin ominaispäästö osoittaa, kuinka paljon hiilidioksidia syntyy tuotettua energiayksikköä kohti. Hiilidioksidia vapautuu maakaasusta 56g, raskaasta polttoöljystä 77g, kivihiilestä 95g turpeesta 106g ja puusta 40 %:n kosteudessa 110g, kun tuotetaan 1 MJ. (Hakkila 2003, 25).

Kun polttoaine tuotetaan kestävän maatalouden mukaisesti, hiili vain kiertää ilmakehän ja biomassan välillä. Tällöin puupolttoaineitten käyttö ei juurikaan lisää ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta. Uusiutuvuutensa ansiosta puu on polttoaineena miltei hiilineutraali. (Hakkila 2003, 25)

2.2 Pienhiukkaset

Puun poltossa muodostuvat hiukkaset ovat pääasiassa hyvin pieniä, yleensä alle 10 μm (PM10). Erään jaottelun mukaan pienhiukkaset ovat kooltaan alle 2.5 μm hiukkasia. Pienhiukkaset voidaan jaotella eri ryhmiin kokoluokkansa perusteella esimerkiksi seuraavasti:

Pienhiukkaset, halkaisija $D < 2,5 \mu\text{m}$ (PM2.5)

- ultrapienet $0,01 < D < 0,1 \mu\text{m}$
- kertymähiukkaset $0,1 < D < 1 \mu\text{m}$
- Karkeat hiukkaset $D > 2,5 \mu\text{m}$

Tämän lisäksi voidaan jaottelu tehdä primäärihiukkasiin, joka tarkoittaa ilmaan suoraan hiukkasmuodossa pääsystä ainetta ja sekundaarihiukkasiin, jotka muodostuvat ilmakehässä erilaisista kaasuista tiivistyen.

Kuopion yliopiston ja VTT:n yhteishankkeessa selvitettiin mahdollisuuksia pienhiukkaspäästöjen vähentämiseen puun pienpoltossa. Projekti toteutettiin järjestämällä työpaja, jossa alan asiantuntijat pitivät esitelmiä omalta tutkimusalueeltaan. Työpajan johtopäätöksistä koottiin raportti. Johtopäätösten mukaan panospolton päästöjä pitäisi ensisijaisesti vähentää edistämällä hyviä tulisijojen käyttötapoja ja pidemmällä tähtäyksellä parantamalla laitteiden polttotekniikkaa. Panospoltossa pienhiukkaspäästöjä aiheuttavat ensisijaisesti epätäydellisestä palamisesta johtuvat hiilivedyt ja noki. Jatkuvassa poltossa pienhiukkaslähteitä ovat pääasiassa polttoaineen alkalimetallit, jotka höyrystyvät suhteellisen alhaisessa lämpötilassa ja muodostavat pienhiukkasia kondensoitumalla ulkoilmassa.

Pienhiukkasia muodostavat pääasiassa kalium, natrium ja sinkki, jotka reagoivat rikin ja kloorin kanssa. On siis huomioitava, että nämä pienhiukkaset ovat kemialliselta koostumukseltaan erilaisia. Panospoltossa muodostuu etupäässä terveydelle haitallisempia noki- ja hiilivetyhiukkasia kun taas jatkuvassa poltossa, kuten pellettipolttimissa, stokeripolttimissa ja pellettikamiinoissa pienhiukkaset ovat peräisin pääasiassa tuhkan höyrystyneistä alkalimetalleista. Nämä pienhiukkaset ovat

luonteeltaan hyvin erilaisia eikä niiden mahdollisia terveyshaittoja tunneta niin tarkasti kuin panospolton pienhiukkasten vaikutuksia. (Alakangas 2007, 57).

2.2.1 Puun lämpöarvo

Polttoaineen lämpöarvon mitta suureena on yleensä joko MJ/kg tai kWh/kg. Lämpöarvo saatetaan ilmoittaa myös öljytonniin suhteutettuna. Vertailukohteena on silloin raakaöljy, jonka yksi tonni vastaa lämpöarvoltaan 41,9GJ tai 11,6MWh. (Hakkila 2003, 26).

Kalorimetrinen lämpöarvo osoittaa palamisen vapautuvan kokonaislämpömäärän, joka on riippumaton polttoaineen kosteudesta. Osa vapautuvasta lämmöstä joudutaan todellisuudessa kuitenkin käyttämään puussa alun perin olleen ja palamisessa syntyneen veden höyryttämiseen. (Hakkila 2003, 26). Kalorimetrinen lämpöarvo määritetään kokeellisesti laboratoriossa (Hakkila 2003, 27.)

Tehollinen lämpöarvo ottaa huomioon höyryttämiseen kuluvan energian ja on siis pienempi kuin kalorimetrinen lämpöarvo. Se lasketaan kuitenkin niin, että poistuvan höyryn lämpötila oletetaan samaksi kuin polttoaineen alkuperäinen lämpötila. Mitä enemmän polttoaineessa on vettä ja vetyä, sitä suurempi on ero kalorimetrinen ja tehollisen lämpöarvon välillä. (Hakkila 2003, 26). Tehollinen lämpöarvo saadaan määriteltyä laskemalla. Laskuissa huomioidaan puussa oleva vesi ja vety. Kalorimetrinen ja tehollisen lämpöarvon ero absoluuttisen kuivassa puussa on noin 1.3 MJ/kg.

Kalorimetrinen lämpöarvo on määritelmästä johtuen puun kosteudesta riippumatta aina noin 20,5 MJ/kg, kun taas tehollinen lämpöarvo laskee kosteuden kasvaessa lähtien absoluuttisen kuivan puun tasolta 19,2 MJ/kg (Hakkila 2003, 27.)

2.2.2 Palamisen vaiheet

Polttoainepartikkelin palaminen tai kaasutus jakautuu eri vaiheisiin. Aluksi partikkeli lämpenee kuivumislämpötilaan. Kuivumisen jälkeen seuraa pyrolyysi ja pyrolyysin jälkeen jäännöshiilen palaminen tai kaasutus. Suurelle hiukkaselle nämä eri vaiheet voivat olla osin päällekkäisiä. Poltettaessa puukappaletta kuivuminen, pyrolyysi ja jäännöshiilen palaminen voivat tapahtua tietyissä olosuhteissa kaikki samanaikaisesti, jolloin partikkelin pinta palaa, kun keskiosa on vielä kostea. Kiinteän polttoaineen palamisnopeus riippuu sen kemiallisesta (reaktiivisuus, pyrolysoitumislämpö, lämpöarvo), rakenteellisista (partikkelikoko, tiheys, huokoisuus) ja fysikaalisista ominaisuuksista (ominaislämpö, lämmönjohtavuus). Kiinteän polttoaineen palamiseen oleellisesti vaikuttavia osaprosesseja ovat lämmön- ja aineensierro ja kemiallinen kinetiikka. Toisinaan jokin näistä prosesseista on oleellisesti hitaampi kuin muut, mikä määrittää palamisnopeuden (esim. hapen diffuusion rajoittama palaminen, kun hiukkaskoko on suuri ja lämpötila korkea). Palamisen ylläpitäminen vaatii, että kolme edellytystä on samanaikaisesti läsnä: polttoaine, riittävä lämpötila ja happi. Jos joku näistä puuttuu, palaminen loppuu, mihin myös tulipalon sammuttaminen perustuu (jäähdyttäminen vedellä joka höyrystyy ja osin myös tukahduttaa korvaten happea, hapen pääsyn estäminen tukahduttamalla tai polttoaineen tulon lopettaminen). Polttolaitteissa tärkein palamistehon säätötapa on polttoainevirran säätäminen, mutta myös prosessin lämpötilan ja hapen tuonnin säädöllä vaikutetaan polttoprosessiin. (Raiko 1995, 139)

Kosteuden poistuminen

Palamistuloksen kannalta on edullista, että kosteuden poistumiseen tarvittava aika olisi mahdollisimman lyhyt, sillä kuivuminen laskee tulipesän keskimääräistä lämpötilaa. Jotta tähän päästään on tulipesän olosuhteiden oltava oikeanlaiset, lämpötilan ja ilmakertoimen osalta.

Pyrolyysi

Pyrolyysivaihe tuottaa inerttien kaasujen lisäksi palamiskelpoisia kaasuja ja neste-faasissa olevia terva-aineita, jotka palavat hyvin liekissä, mikäli tarpeeksi happea on läsnä (Raiko 1995, 395.) Pyrolyysivaiheen merkitystä kokonaisprosessin kannalta kuvaa polttoaineen haihtuvien aineiden määrä, eli se osuus kuiva-aineen lämpösisällöstä, joka haihtuu pääasiassa pyrolyysivaiheen aikana (Raiko 1995, 395.)

Jäännöshiilen palaminen

Pyrolyysivaiheen jälkeen polttoaineesta on jäljellä kiinteässä olomuodossa oleva hiili, joka palaa pinnaltaan ilman liekkiä, kun lämpötila on riittävä ja tarpeeksi happea on saatavilla. Tämä palamisvaihe on tyypillisesti hidas ja vaatii suhteessa selvästi enemmän arinapintaa kuin pyrolyysivaihe. Jäännöshiilen palamisaikaan voidaan jonkin verran vaikuttaa polttoaineen palakokoa pienentämällä. (Poltto ja palaminen 1995, 395).

Arinapoltoille on ominaista, että suurin osa polttoaineen sisältämästä tuhkasta poistuu ns. tulipesätuhkana, eikä savukaasun mukana kuten pöly- ja leijupoltossa. Näin ollen oikein mitoitettu jäännöshiilen palamisvaihe on palamishyötysuhteen kannalta merkittävä. (Poltto ja palaminen 1995, 395).

3 MARKKINAT

Suomessa pystytetään vuodessa lähes 70 000 tulisijaa. Niistä suurin osa on varaavia takkoja tai takan ja leivinuunin yhdistelmiä. Kaiken kaikkiaan suomalaisia lämmitteä noin 2.9 miljoonaa tulisijaa. Vähän alle puolet tulisijoista tulee uusiin rakennuksiin – pääasiassa omakotitaloihin ja loma-asuntoihin – ja reilu puolet jo olemassa oleviin. Takkoja laitetaan jonkin verran myös rivitalo- ja jopa kerrostaloasuntoihin.

3.1 Kilpailu

Markkinoilla on nykyään jo kattava valikoima takkoja joista voidaan siirtää lämpöä veteen, josta vesi siirtyy vesivaraajaan, eli niin sanottuja vesikiertoisia takkoja. Erona vesimiiluun näissä takoissa on että, näissä ei ole itsessään varaavaa materiaalia. Tällaiset takat ovat usein varustettu isolla lasiluukulla ja huonolla lämmöneristyksellä, mistä johtuen takkoja ei voida lämmitteä kovinkaan pitkiä aikoja, koska ne luovuttavat paljon suoraa säteilylämpöä huonetilaan. Huoneen lämpötila nousee hyvin korkeaksi ja lämmitäminen täytyy lopettaa, vaikka vesivaraajan varauskyky ei ole vielä täyttynyt. Vesimiilussa hyvällä lämmöneristeellä ja pienellä luukulla päästään hyvin pieneen suoraan lämpösäteilyyn, joten vesimiilua voidaan lämmitteä pitkiäkin aikoja ja huoneessa pysyy silti sopiva lämpötila.

3.2 Kilpailijat

Ohessa esimerkkejä vesikiertoisista takoista.

3.2.1 La Nordica, Focolare IDRO DSA 80

Tämä on vesikiertoinen takkasydän jonka verhoilu voidaan toteuttaa erilaisista materiaaleista kuten kevytsoraharkoista, siporexista, tiilestä tai vaikka lujalevystä. Pinta voidaan koristella esim. laatoilla, liuskekivillä tai pinta voidaan rapata ja maalata halutun väriseksi.

- **Tekniset tiedot:**
 - Mitat (lxkxs): 800x1198x560
 - Teho huoneeseen: 4,3 kW
 - Savukaasuputken halkaisija: 160 mm
 - Teho veteen: 11.1 kW
 - Kokonaisteho: 15,4 kW
 - Lämmönvaihtimen tilavuus: 20 l



Kuvio 1. La Nordica IDRO DSA 80

3.2.2 Normatherm, KKH 15

Saksalainen valmistaja Normatherm valmistaa myös vesikiertoisia takkasydämiä. Normathermin takkasydämissä on vesitilavuutta 120 – 245 litraa. tämä lisää jonkin verran lämmönluovutuksen pehmeyttä, mutta tässäkin on suuri lasiluukku josta lämpöä säteilee runsaasti sisäilmaan.



Kuvio 2. Normatherm, KKH 15.

3.3 Käytön edistäminen

Puupolttoaineiden käytön yleistyminen vaatii kuluttajien ohjeistamista puun polton oikeista tavoista ja energia tehokkaasta polttamisesta. Markkinoille tarvittaisiin enemmän energiatehokkaita uuneja, joissa on hyvä hyötysuhde ja uuneja joissa palaminen tapahtuu tarpeeksi tehokkaasti, jotta pienhiukkasia syntyisi mahdollisimman vähän.

4 HYÖTYSUHDE

Hyötysuhteella tarkoitetaan laitteen tehokkuutta, jonka se pystyy parhaimmillaan polttoaineesta käyttämään hyödykseen. Polttotekniikan kannalta hyvä hyötysuhde edellyttää mahdollisimman täydellistä palamista ja mahdollisimman pieniä lämpöahiöitä, jotka saavutetaan, kun poistokaasujen entalpiavirta on mahdollisimman pieni. Tavallisesti tarvitaan siis mahdollisimman hyvät polttolaitteet, jotka toimivat hyvin pienellä ilmaylimäärällä, jolloin palamislämpötila on suuri. (Raiko 1995, 20).

Hyvään hyötysuhteeseen päästään, kun palopesässä on mahdollisimman korkea lämpötila. Myös happea eli ilmaa pitää olla riittävästi. Teoreettinen ilmamäärä ei riitä vaan sitä pitää olla 1,5 – 2-kertainen määrä teoreettiseen verrattuna. Kuten aikaisemmin mainittiin ilmaylimäärää pitää olla juuri oikean verran, koska ilmassa on tyyppiä 79 % ja se ei mitenkään osallistu palamiseen. Se kuitenkin lämmitetään uunissa ja lämpö kulkeutuu piipusta ulos.

Puiden pitää olla kuivia koska muuten ne eivät pala kunnolla. Lisäksi puissa oleva vesi höyrystetään uunissa ja siihen kuluu paljon energiaa. 100-asteisen veden höyrystäminen 100-asteiseksi höyryksi kuluttaa viisinkertaisen energiamäärän veden lämmittämiseen nolasta sataan asteeseen. Höyry johdetaan myös piipusta ulos. Palamisen jälkeen palokaasut pitää jäähdyttää mahdollisimman tehokkaasti. Silloin kun palaminen on ollut kunnollista ja tehokasta, voidaan palokaasut jäähdyttää mihin lämpötilaan tahansa. Käytännössä se voidaan tehdä vain uunin sisälämpötilaan saakka. Aluksi uuni on melko kylmä ja lämmön siirtyminen on tehokasta. Pian uuni kuitenkin lämpiää ja hyötysuhde pienenee.

Takan hyötysuhteeseen vaikuttaa varaavan massan määrä, materiaali sekä savukanavien pituus ja koko. Tulipesän ja savukanavien lämmitessä lämmönvaraavuuskyky huononee.

Vesimiilun hyvä hyötysuhde verrattuna kiviuniin perustuu siihen, että vesimiilussa hyötysuhde pysyy hyvänä koko lämmitysprosessin ajan. Kuumat savukaasut pystytään jäähdyttämään lähellä 100 astetta, koska vesimiilun sisäpintojen lämpötilat pysyvät aina alle 100 asteen.

Kiviuunissa pitkän lämmitysprosessin aikana uunin sisäosat lämpiävät hyvin kuumiksi ja näin savukaasut eivät enää pysty luovuttamaan lämpöä hyvällä hyötysuhteella. Kiviuunien hyötysuhde saavutetaan siis lämmitysprosessin tietyssä hetkenä, jolloin lämpötilat ovat juuri optimaaliset.

4.1 Hyötysuhteen laskeminen

Kattilan hyötysuhteen määrittämisessä on käytössä kaksi hieman toisistaan poikkeavaa menetelmää: suora menetelmä ja epäsuora menetelmä. Suora menetelmä perustuu kattilasta hyödyksi saatavan energiavirran määrittämiseen. Epäsuora menetelmä perustuu puolestaan kattilan häviöiden määrittämiseen sekä hyötysuhteen määrittämiseen häviöiden kautta.

4.1.1 Suora menetelmä

Kattilan hyötysuhde, jossa mitataan suoraan kattilasta saatua hyötylämpövirtaa sekä kattilaan vietyä energiavirtaa nimitetään suoralla menetelmällä määritetyksi hyötysuhteeksi.

Kattilasta saatava energia voidaan jakaa kahteen eri osaan, polttoainevirtaan verrannolliseen ja polttoainevirrasta riippumattomaan osaan. Energiat jotka ovat verrannollisia polttoainevirtaan, ovat

- polttoaineeseen sitoutunut kemiallinen energia
- polttoaineen esilämmitykseen sitoutunut energia
- palamisilman esilämmitykseen sitoutunut energia

Kattilan hyötysuhteen määrittämisessä käytetään polttoaineeseen sitoutuneen kemiallisen energian mittana DIN 1942 – standardissa polttoaineen alemmaa tehollista lämpö-arvoa, jolloin ajatellaan, että savukaasuihin muodostuneen vesihöyryn

lauhtumislämpöä ei ole mahdollista saada kattilassa talteen. Amerikkalaisissa standardeissa hyötysuhteen määrittämisessä käytetään puolestaan polttoaineen ylempää lämpöarvoa. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2000, 101)

Polttoaineen ja palamisilman esilämmityksen mukana kattilaan tuodut energiavirrat saadaan laskettua, kun tunnetaan ainevirrat, ominaislämpö ja lämpötilat. Kattilaan tulee myös polttoainemäärästä riippumattomia energiavirtoja, kuten

- höyrytoimisen ilman esilämmittimen lämmitys
- polttoaineen hajotushöyry (öljyllä)
- myllyjen, pumppujen ja puhaltimien sähkömoottoreiden käyttö
- tulistuksen säätöön käytetty ruiskutusvesi.

Näidenkin määrä on selvitettävä tapauskohtaisesti ja otettava huomioon tarkemmissa laskelmissa. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen, 2000)

4.1.2 Epäsuora menetelmä

Epäsuora menetelmä perustuu kattilan häviöiden määrittämiseen ja hyötysuhteen määrittämiseen häviöiden kautta. Tätä menetelmää käytettäessä saadaan parempi käsitys siitä, mitkä tekijät huonontavat kattilan hyötysuhdetta ja minkälaisiin toimenpiteisiin kannattaa ryhtyä hyötysuhteen korjaamiseksi. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen, 2000, 104.)

Kattilan häviöt koostuvat

- palamattomien häviöistä (palamaton aines tuhkassa, palamattomat kaasut)
- tuhkan termisestä lämmöstä
- savukaasujen termisestä lämmöstä
- säteily- ja johtumishäviöistä.

Palamattomien häviöt

Kattilassa osa polttoaineesta voi jäädä palamatta. Palamishyötysuhteella tarkoitetaan palaneen polttoaineen suhdetta kattilaan syötettyyn polttoaineeseen. Nykykaisten polttolaitteiden palamishyötysuhde on hyvin lähellä yhtä. Palamatta jäänyt polttoaine voi kattilasta poistua joko kaasumaisessa muodossa tai kiinteässä muodossa tuhkan mukana. Palamishyötysuhde määritetään määrittämällä savukaasuisissa olevien palamattomien kaasujen ja tuhkan sisältämän palamatta jääneen polttoaineen määrän. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2000, 105.)

Palamattomien kaasujen häviöt

Palamatta jääneet kaasut saattavat olla huonosti palanutta hiiltä eli hiilimonoksidia tai erilaisia hiilivetyjä. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2000, 105.) Mikäli savukaasujen CO-pitoisuus on 0,5 %, tämä vastaa muutaman prosentin laskua kattilahyötysuhteessa.

Palamattomien kiintoaineiden häviöt

Kattilasta palamatonta polttoainetta voi poistua myös lentotuhkan tai kattilan tulipesän pohjalta poistuvan pohjatuhkan mukana. Palamatta jääneen polttoaineen osuus tuhkassa saadaan määritettyä polttamalla tuhka laboratorioissa eli määrittämällä tuhkan ns. hehkutushäviö. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2000, 106.)

Palamatta jäävän polttoaineen aiheuttama häviö riippuu polttoaineesta ja poltuntekniikasta sekä laitteiden kunnosta ja säädöistä. Huonolaatuiset, alhaisen lämpöarvon omaavat polttoaineet pyrkivät kasvattamaan palamatta jääneen polttoaineen

häviötä useisiin prosentteihin. Sen sijaan hyvin säädetyillä polttolaitteilla ja hyväkuntoisilla nestemäisillä ja kaasumaisilla polttoaineilla häviöt jäävät alle prosentin luokkaan. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2000, 107.)

Savukaasujen terminen lämpöhäviö

Kuumien savukaasujen mukana kattilasta poistuva energia edustaa yleensä suurinta osaa kattilan häviöistä. Häviötä, jota kutsutaan yleensä lyhyesti savukaasuhäviöksi. Sen suuruus riippuu savukaasujen loppulämpötilasta ja savukaasujen määrästä. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2000, 108.)

Jotta savukaasuhäviö olisi mahdollisimman pieni, tulisi savukaasujen poistua kattilasta mahdollisimman kylminä. Rikkiä sisältävien polttoaineiden savukaasun loppulämpötilan tulee kuitenkin olla happokastepistelämpötilan 140 – 150 °C yläpuolella lämpöpintojen syöpymisen ehkäisemiseksi. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2000, 108)

Lämpöpintojen likaantumisen seurauksena lämmönsiirto huononee kattilassa, jolloin savukaasujen loppulämpötila nousee ja savukaasuhäviö kasvaa. Edelleen savukaasuhäviön kannalta käytetyn ilmakertoimen tulisi olla mahdollisimman lähellä teoreettista minimiarvoa, sillä palamiseen osallistumattoman ilmankierrätys kattilan läpi lisää kaasuvirtaa ja siten myös savukaasuhäviöitä. Ilmakerrointa ei kuitenkaan ole tarkoituksenmukaista pienentää niin alas, että epätäydellisen palamisen seurauksena palamattomien häviöt kasvavat enemmän kuin savukaasuhäviöt pienenevät. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2000, 108)

Tuhkan mukana poistuva terminen lämpö

Kattilasta poistuu energiaa lämpimien savukaasujen lisäksi myös kuuman tuhkan mukana. Tuhkavirtaan kuuluu sekä polttoaineen varsinainen tuhka, että myös sen

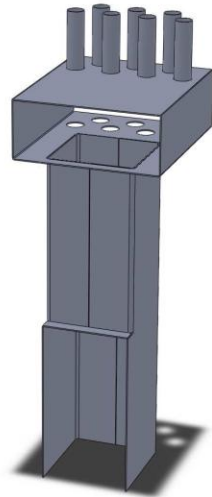
mukana kulkeva, palamatta jäänyt polttoaine. Tuhkahäviöihin lasketaan tulipesästä poistuva pohjatuhka sekä lentotuhka. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2000. 108)

5 IDEA

Vesimiilun idea on syntynyt jo 60-luvun lopulla. Mutta vasta vuoden 2008 alussa Seppo Laaksovirta aloitti perehtyneemmän lähestymisen puu-uunien tehokasta käyttöä ajatellen. Aluksi kehityksen alla oli puun tehokkaampi polttaminen normaaleissa takaoissa, mutta pikkuhiljaa idea veteen varaavasta takasta syntyi. Veden ja kiven lämmönvaraavuusominaisuuksia vertaillessa, vesi osoittautui kiveä huomattavasti paremmaksi. Lämmön varaaminen veteen ei ole uusi keksintö, mutta yleisesti lämmön tuottaminen ja varaaminen on suoritettu jossain muualla kuin huoneistossa. Vesimiilun ideana on olla huoneistossa, josta vesimiilun lämmityksessä tuotettu lämpö sekä varaama lämpö siirtyy suoraan huonetilaan.

5.1 Rakenne

Uuni on valmistettu teräksestä taivuttamalla ja hitsaamalla rakenne vesitiiviiksi, mutta ei ilmatiiviiksi, vesimiilu ei siis ole paineastia. Uunissa on noin 500 litran vesitilavuus, johon puuta poltettaessa vapautuva energia varataan. Vesimiilun periaate on siis varata lämpö siinä itsessään olevaan veteen, eikä kierrättää lämpöä toiseen vesivaraajaan. Vesimiilun vesitila täytyy lämpöeristää hyvin ja lämmön luovutus tapahtuu säädettävien venttiilien kautta. Palotilassa ja ylätilassa on tulimuuraus, koska tulipesän lämpötilan pitää olla tarpeeksi korkea, jotta palaminen tapahtuu täydellisesti. Palotila jäähtyy liikaa, jos veden ja tulen välissä olisi vain teräslevy. Kuvioista 3 nähdään palopesä johon tuli muuraus asennetaan.



kuvio 3 vesimiilun palopesä

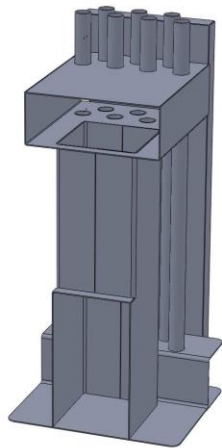
Uunin takaosassa on seitsemän putkea joissa savukaasut jäädytetään lähelle sataa astetta, täältä veteen siirtyy eniten lämpöenergiaa.



Kuvio 4. Savukaasuputket.

Palotilan luukkuna käytetään valurautaista luukkua, lasiluukusta säteilisi liikaa lämpöä huonetilaan ja huoneeseen tulisi liian kuuma ennen kuin uunin varauskyky on täydessä tehossaan. Uuni on varustettu kahdella sulkupellillä, toisella pystytään avaamaan ylätilasta suora reitti hormiin. Tätä täytyy käyttää uunin sytytyksen yh-

teydessä, jotta tarpeeksi hyvä veto hormiin saavutetaan. Sen jälkeen voidaan toinen sulkupelti sulkea ja palokaasut kiertävät putkistoa pitkin veden läpi uunin alaosaan, josta ne palaavat uunin takana olevaa koteloa pitkin ylös ja kääntyvät hormiin. Kuviosta 5. näkyvät uunin sisärakenteet. Ruostumisen estämiseksi veteen lisätään glykolia, joka estää tehokkaasti ruostumista. Glykolin ansiosta vesimiilussa ei ole jäätyminen riskiä esimerkiksi mökkiolosuhteissa.



Kuvio 5. Uunin sisärakenteet

Uunin yläpuolella on seitsemän reikää, joista voidaan suorittaa nuohous ja putsaus sisällä oleville putkille. Uunissa on lisäksi kaksi tarkistus- ja puhdistusluukku, uunin etuosassa ylätilalle ja alhaalla oikealla alatilalle. Uunin kummassakin kyljessä on varaus lämminvesikierukalle, joten sen voi asentaa kummalle puolelle tahansa.

5.2 Ominaisuudet

5.2.1 Lämmönvaraus kyky

Perinteisesti uunien rakennusmateriaaleina on käytetty erilaisia kivilaatuja, luonnonkivet, tiilet ja erilaiset keraamiset tuotteet. Kivi kestääkin melko hyvin liekissä esiintyviä lämpötiloja ja lämpötilaeroja. Sitä myös pidetään hyvänä lämmön varaaajana. Sen lämmönvaraavuus onkin n. $0,8 \text{ kJ/Kg} \cdot \text{K}$ (kilojoulea / kilogramma kertaa aste). Ylivoimainen lämmön varaaja on kuitenkin vesi. Sen lämmönvaraavuus on $4,18 \text{ kJ/Kg} \cdot \text{K}$. Kiveen verrattuna se on viisinkertainen. Jos tiili on kaksi ja puoli kertaa vettä painavampaa, jää veden ominaislämpö tiiliin verrattuna vieläkin kaksinkertaiseksi tilavuusyksikköä kohti.

Esimerkki:

Veden ominaislämpö on $4,16 \text{ kJ/kg} \cdot \text{aste}$

Tiilin ominaislämpö on $0,8 \text{ kJ/kg} \cdot \text{aste}$

Otetaan $0,5$ kuutiometriä vettä ja $0,5$ kuutiometriä tiiliä. Vesi painaa 500 kg ja tiili 1250 kg . Lämmitetään kumpaakin 50 astetta.

Veteen sitoutuu $104\,000 \text{ kJ} = 29 \text{ kWh}$

Tiiliin sitoutuu $50\,000 \text{ kJ} = 14 \text{ kWh}$

5.2.2 Lämpöenergian lataaminen uuniin

Jos nyt tämä lämpömäärä jaetaan vuorokauden 24 tunnin ajalla vesiuunilla voi lämmittää keskimäärin $1,2 \text{ kW}$ teholla ja kiviunilla $0,6 \text{ kW}$ teholla.

Lämmön johtumisella tarkoitetaan lämmön siirtymistä kappaleesta rakenteen hilavärähtelyjen etenemisen ja vapaiden elektronien kulkeutumisen välityksellä toisen pääsäännön mukaisesti alenevan lämpötilan suuntaan. (Raiko, 56)

Kiviuuni

Lämpöenergian siirtäminen uunin varaaviin osiin tapahtuu polttamalla puita uunin palopesässä. Palotapahtumassa syntyy kuumia palokaasuja, joita pyritään siirtämään mahdollisimman paljon ja tehokkaasti ympäristöön eli uunin sisäosiin. Perinteisessä kiviuunissa on sisällä laajahkoja kanavia joissa lämpö siirtyy kanavien seinämiin. Tästä lämpö johtuu aineen sisälle. Huonon lämmönjohtavuuden vuoksi kanavien seinämien lämpötila pyrkii nousemaan sisäosia kuumemmiksi. Pian ollaan tilanteessa jossa kanavan pinta on lähellä liekin lämpötilaa, tällöin hyötysuhde huononee ratkaisevasti ja lämmittäminen kannattaa lopettaa ja odottaa lämmön siirtymistä kiinteään aineen sisälle. Kovin paksuja rakenteita ei voida tästä syystä käyttää vaan uuni on tehtävä käytännössä täyteen erilaisia kanavia. Nämä ovat lämmön varastoimisen kannalta hukkatilaa ja pienentävät uunin massaa ulkotilavuuteen nähden.

Vesimiilu-uuni

Vesimiiluun lämpöenergian siirtäminen tapahtuu myös polttamalla puita palopesässä. Vesimiilussa varaavana aineena on vesi, joka on normaali paineessa aina alle 100 asteista. Näin ollen lämmitetäänpä uunia miten kovasti tahansa kanavat ovat aina alle 100 asteisia. Kuumat palokaasut kiertävät kanavissa joissa lämpö siirtyy seinämiin ja sitä kautta veteen. Melko pienellä pinta-alalla palokaasut pystytään jäädyttämään lähelle 100 astetta ja jopa alle sen. Tällöin hyötysuhde ei huonone pitkänkään lämmityksen jälkeen. Veden hyvän lämmön johtavuuden vuoksi vesi lämpenee tasaisesti joka puolelta uunia, tätä voidaan tehostaa vielä kierrättämällä vettä hiljalleen säiliössä. Veden lähestyessä 100 astetta vesimiilua ei kuitenkaan kannata enää lämmittää, koska lämpöä ei enää voida veteen varata.

Veden kiehumista estetään asentamalla toiseen sulkupeltiin lämpöanturi ja moottori, joka avaa sulkupellin, kun lämpötila lähenee 100 astetta ja näin estää kuumien palokaasujen kiertämisen vesitilan läpi. Vesimiilussa on myös lämpötila hälytin, jotta kiehumista ei syntyisi. Vesimiiluun voidaan asentaa myös sähkövastus,

joka huolehtii veden lämpötilan pysymisen halutun lämpötilan yläpuolella, jos vesimiilua ei päästä lämmittämään tarpeeksi usein.

5.2.3 Vesimiilun hyötysuhde

Määrittäessä hyötysuhde suoralla menetelmällä, tarvitsee tuntea vesimiiluun tuotu energiavirta sekä hyödyksi saatu hyötylämpöenergiavirta. Näiden kahden arvon suhteesta voidaan laskea hyötysuhde.

Hyötysuhde lasketaan seuraavalla kaavalla.

$$\eta = \frac{Q_{hyöty}}{Q_{tuotu}}$$

Missä: η = Kattilan hyötysuhde
 Q_{tuotu} = Kattilaan tuotu energiavirta
 $Q_{hyöty}$ = Kattilasta saatu hyötyenergiavirta

Tässä tapauksessa voidaan laskea tunnin mittaisen lämmitysprosessin hyötysuhde. Koska hyötysuhde pysyy lähes samana koko prosessin ajan, otetaan tunnin mittainen lämmitysjakso. Vesimiilussa kuluu polttoainetta, eli puuta noin 3kg/h. Tässä tunnin jaksossa vesimiilussa oleva 500 litran vesitilavuus lämpenee noin 25 astetta.

Laskeminen aloitetaan selvittämällä vesimiilun polttoaineen massavirta, joka on siis 3kg/h puuta. Muutetaan arvo tunneista sekunneiksi.

$$\frac{3\text{kg} / \text{h}}{3600\text{s} / \text{h}} = 0,000833\text{kg/s}$$

Tästä voidaan laskea polttoaineteho, kun siihen tarvittavat arvot on tiedossa

$$Q_{tuotu} = m_{pa} * c_{pa} * 1000\text{kJ/MJ}$$

$$Q_{tuotu} = 0,000833 \text{ kg/s} * 19.2 \text{ MJ/kg} * 1000 \text{ kJ/MJ} = 16 \text{ kW}$$

missä m_{pa} = polttoaineen massavirta, (kg/s)
 c_{pa} = polttoaineen lämpöarvo, MJ/kg

Seuraavaksi lasketaan vesimiilusta hyödyksi saatu lämpövirta eli lämpöteho. Tunnin mittaisessa lämmitysprosessissa vesimiilun vesi lämpenee noin 25 astetta. Veden ominaislämpökapasiteetti on $4,18 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ ja veden tiheys 1000 kg/m^3 . Vesimiilun 500 litran vesitilavuus lämpiää 25 astetta tunnissa, tästä voidaan laskea vesimiilun tilavuusvirta.

$$500 \text{ l} / \text{h} / 3600 \text{ s} / \text{h} = 0,1389 \text{ l/s}$$

Veden massavirta on $0,1389 \text{ kg/s}$, joka saadaan kertomalla tilavuusvirta veden tiheydellä 1000 kg/m^3 ja jakamalla ne $1000 \text{ l} / \text{m}^3$. Nyt voidaan laskea kattilan lämpöteho.

$$Q_{hyöty} = m * c_p * \Delta T$$

$$Q_{hyöty} = 0,1389 \text{ kg/s} * 4,18 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} * 25^\circ\text{C} = 14,51 \text{ kW}$$

Seuraavaksi voimme selvittää vesimiilun hyötysuhteen suoralla menetelmällä.

$$\eta = \frac{Q_{hyöty}}{Q_{tuotu}}$$

$$\eta = 14,51 \text{ kW} / 16 \text{ kW} * 100 = 90,71 \%$$

Tämä hyötysuhde voidaan olettaa olevan koko lämmitysprosessin ajan, koska vesimiilun sisälämpötilat pysyvät lähes samoina ja vesi voi vastaanottaa yhtä tehokkaasti lämpöä aina 100 asteeseen asti.

5.2.4 Käyttöveden lämmitys

Vesisäiliöstä saadaan talouden tarvitsema lämminkäyttövesi asentamalla vesimiilun lämminvesikierukka. Lämminvesikierukka asennetaan vesisäiliöön ja sen läpi kiertävä kylmävesi lämpiää sen aikana. Vesimiilun ollessa 70–80 asteinen, lämminkäyttövesi lämpiää hyvin kuumaksi. Jotta lämminvesi saataisiin tasaisena käyttövesiputkistoon, on vesikierukan perään asennettava sekoitusventtiili, joka sekoittaa kylmää vettä lämpimän sekaan ja näin säätelee veden lämpötilan sopivaksi. Vesi voidaan johtaa lämminvesikierukkaan vesiverkostosta, tai esimerkiksi mökkiolosuhteissa, jossa ei ole vesijohtoverkostoa, voidaan vesi johdattaa yläpuolisesta vesisäiliöstä painovoiman avulla lämminvesikierukkaan.

5.2.5 Lämmön luovutus

Vesimiilun vesisäiliö on lämpöeristetty hyvin, jotta lämpöä ei siirtyisi liikaa huonetilaan. Huonetilan lämpöä säädellään vesimiilussa olevilla säädettävillä venttiileillä, näin saavutetaan haluttu lämpötila. Vesimiilun varaamaa lämpöä voidaan myös siirtää muihin huoneisiin asentamalla kiertovesipumppu ja kierrättämällä lämmintä vettä lämmityspattereissa. Koska vesimiilun ei ole paineistettu astia, täytyy kiertovesipumppu asentaa lähtevän veden puolelle, jotta saadaan haluttu vesikierto.

Lämmönvaraus kykyä voidaan lisätä asentamalla vesimiilun rinnalle toinen vesivaraaja. Vesimiilusta johdetaan lämmityskierukan kautta lämpöä vesivaraajaan. Vesivaraajan kokoa muuttamalla saadaan varaamiskykyä nostettua kuinka suureksi tahansa.

6 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutustua puun energia ominaisuuksiin ja tutkia sekä kehittää puulämmityksen tehokkuutta. Puulämmityksen tehokkuutta tutkittiin laskemalla vesimiilun hyötysuhde. Hyötysuhde laskettiin suoraa menetelmää käyttäen. Vesimiilun hyötysuhteeksi saatiin suoraa menetelmää käyttäen vähän yli 90 %, joka pysyy samana koko lämmitys jakson aikana.

Johtopäätöksenä mielestäni voidaan sanoa, että nykyisiin puulämmitys järjestelmiin verrattuna tulevaisuudessa puulämmitys menetelmiä pystytään kehittämään entistä paremmiksi ja tehokkaammiksi. Tulevaisuudessa tullaan panostamaan talojen lämmityksessä uusiutuvaan energiaan ja puulämmitys on yksi näistä. Joten tehokkaille puulämmitysjärjestelmille on varmasti kysyntää ja hyvät tulevaisuuden näkymät.

LÄHTEET

Hakkila, P. 2003 Puuenergia. Jyväskylä Gummerus. Toimittanut Kirsi Knuutila

Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P, & Pakkanen, H. 2000 Höyrykattilatekniikka 5.painos. Helsinki: Edita Prima Oy

Kollmann, F. 1951 Technologie des holzes und de holzwerkstoffe. Berliini.

Raiko, R. 1995. Poltto ja palaminen. Suomi: Teknillistieteelliset.

Alakangas, E. 2007. Puupolttoaineiden pienkäyttö. Helsinki: Tekes.

Laaksovirta, S. 2006-2013. Insinööri. Vesimiilun kehittäjä. Haastattelu