

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikka / Energia- ja ympäristötekniikka

Heikki Korjus

MONIPOLTTOAINEKATTILAN JATKOKEHITYS

Opinnäytetyö 2012

TIIVISTELMÄ

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikka

KORJUS, HEIKKI

Monipolttoainekattilan jatkokehitys

Opinnäytetyö

36 sivua + 3 liitesivua

Työn ohjaaja

TkL Markku Huhtinen, osaamisalapäällikkö

Toimeksiantaja

Runtech Energy Oy

Tammikuu 2012

Avainsanat

lämmitys, kattila, puupolttoaine, pienkäyttö

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella pientalomittakaavan lämpökattila. Sen tuli olla panossyöttöinen alipainepolttoinen yläpalokattila, jonka polttoaineena käytetään ensisijaisesti pellettiä ja klapia. Kattilan palaminen tapahtuisi etupesäpoltinperiaatteella, missä polttoaine kaasuuntuu arinalla ja kaasu palaa tulikanavassa.

Kattilasta piirrettiin 2D-rakennekuvat. Piirtämistä tuettiin kattilan toiminnan laskennallisella tarkastelulla. Lisäksi tarkasteltiin palamisen teoriaa ja puun käyttöä pienpoltossa sekä annettiin ehdotuksia kattilan testausta varten.

Työ onnistui suunnittelutavoitteessaan. Suunnittelun tueksi laskettiin kattilan polttoainepanoksen koko, palamisilman ja savukaasun tilavuusvirtaus sekä savuhormin veto ja kattilan ilmanoton virtausvastukset. Kattilaa ei ole vielä testattu. Sen jatkokehityksen tarpeen määräävät testien tulokset, lämmitysenergian eri tuotantomuotojen hinnankehitys ja energiankäytön ohjaaminen poliittisin keinoin. Kattilan rakennekuvat ovat liikesalaisuus, joten niitä ei esitellä ulkopuolisille.

ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Mechanical and Production Engineering / Energy and Environmental Engineering

KORJUS, HEIKKI

Further Development of a Multifuel Boiler

Bachelor's Thesis

36 pages + 3 pages of appendices

Supervisor

Markku Huhtinen (Lic. Sc.), Manager of Departments

Commissioned by

Runtech Energy Oy

January 2012

Keywords

heating, boiler, wood fuel, small scale

The objective of this work was to design a small scale central heating boiler. It was to be a gasifying batch fed multifuel boiler with an open flue. The fuel was first to be gasified and then the gas to be burned in a combustion channel. The primary types of fuels to be used were chopped firewood and pellets.

The design process included creating two dimensional construction drawings of the boiler and calculations regarding the combustion. Also, the theory of combustion and the small scale usage of wood fuels were studied and suggestions for boiler testing were made.

The work reached its design objective. The size of the fuel batch, the volume flow rate of the combustion air and the flue gas, the draft of the stovepipe and the flow resistance of the air intake were calculated to support the design. The boiler is yet to be tested. The need for its further development will be determined by the results of the tests, the price development of different forms of heat energy production and the political control of energy usage. The construction drawings are a trade secret and can therefore not be presented here.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1 JOHDANTO	6
2 RUNTECH ENERGY	7
3 LÄMMITYSENERGIAN KULUTUS SUOMESSA	8
3.1 Rakennusten lämmitys	8
3.2 Lämmityksen energiankulutuksen kehittyminen	9
3.3 Asuinrakennusten lämmitysteknologian kehittyminen	11
4 PUUPOLTTOAINEET PIENKÄYTÖSSÄ	12
4.1 Puupolttoaineiden kilpailukyky	13
4.1.1 Polttoaineiden hinnat	13
4.1.2 Lämmitystavan valinta	14
4.1.3 Puupolttoaineiden käytön tukeminen	15
4.1.4 Puupolttoaine Euroopassa	16
4.2 Laitteiden markkinanäkymät	17
4.3 Standardit ja määräykset puupolttoaineille	17
5 POLTTOTEKNIIKAT PIENKÄYTÖSSÄ	17
5.1 Tulisijat	17
5.2 Pienkattilat ja polttimet	18
5.2.1 Yläpalo	18
5.2.2 Alapalo	19
5.2.3 Käänteispalo	20
5.2.4 Stokeripoltin	20
5.2.5 Etupesäpoltin	21
5.3 Säännökset pienpoltolle	21
5.3.1 Päästörajat Suomessa ja muualla	21

5.3.2 Päästörajat tulevaisuudessa	22
6 PALAMINEN	22
6.1 Alkulämpeneminen ja kuivuminen	23
6.2 Syttyminen	23
6.3 Pyrolyysi	24
6.4 Jäännöshiilen palaminen ja kaasutus	25
7 KATTILAN LASKENNALLINEN TARKASTELU	26
7.1 Kattilan teho ja polttoaineen lämpöenergia	26
7.2 Palamisilma	26
7.3 Savukaasut	28
7.4 Veto	29
7.5 Tulokset	31
8 KATTILAN TESTAUS	32
9 KATTILAN JATKOKEHITYS	33
10 YHTEENVETO	33
LÄHTEET	35
LIITTEET	
Liite 1. Puun ja mustalipeän polton kaasuvirrat	
Liite 2. Puulämmityslaitteiden päästöt ja hyötysuhteet	
Liite 3. Pellettien laatuvaatimukset eri maiden standardeissa	

1 JOHDANTO

Energiantarve ja energian eri tuotantomuotojen keskinäinen suhde ovat jatkuvassa muutoksen tilassa. Energian käyttöä lisää teknologian kehittyminen ja ihmisten kulutustottumukset. Energian tuotantomuotoihin vaikuttavat niiden kustannukset ja poliittiset ohjailukeinot. Öljyn ja sähkön hinta on kasvanut tasaisen varmasti vuosikymmenien ajan, ja energiantuotantoa tullaan säädöksiin ja taloudellisin keinoin ohjaamaan ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi vähemmän hiilidioksidipäästöjä tuottavaan suuntaan. Myös lämmitysenergian eri tuotantomuotojen keskinäiset voimasuhteet muuttuvat kaiken aikaa, vaikka rakennusten lämmityksen ominaiskulutus väheneekin paremman lämmöneristämisen ansiosta. (1)

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on piirtää 2D-rakennekuvat pientalokäyttöön sopivasta puupolttoaineita käyttävästä lämmityskattilasta toimeksiantaja Runtech Energy Oy:n antamien lähtökohtien mukaisesti. Piirtämisen tueksi ja kattilan mitoittamiseksi palamista tarkastellaan laskennallisesti. Rakennekuvat piirretään AutoCAD-suunnitteluohjelmalla.

Kehitteillä olevan kattilan ensimmäisessä rakennetussa prototyypissä oli ongelmia sekä palamisen hyötysuhteessa että päästöarvoissa. (2) Tämän opinnäytetyön kattila eroaa aikaisemmasta versiosta hyvin paljon. Aikaisempi versio oli painepolttoinen eli palamisilma ohjattiin puhaltimella tulipesään, mikä sai sen ylipaineiseksi. Tämän työn kattila on alipainepolttoinen: savuhormin aiheuttama veto alipaineistaa tulipesän. Vedon hormiin muodostaa painovoima ja polttoaineen sytytysvaiheessa vetoa tukee kattilan rakenteeseen kuuluvaan savupiippuun liitettävä ejektoripuhallin.

Kattilan suunnittelun tavoitteena on panossyöttöinen etupesäpolttimen tapaisesti toimiva yläpalokattila. Klapi, pelletti tai muu puupolttoaine kaasuuntuu arinalla ja muodostunut kaasu palaa myöhemmässä vaiheessa kattilan tulikanavassa ilman lisäämisen vaikutuksesta. Lämpöenergia siirtyy lämmitysveteen Runtech Energy Oy:n tuotteisiin kuuluvasta RunPipe-putkesta valmistetussa lämmönsiirtimessä, joka sijoitetaan kattilan savupiippuun. Kattilaan syötetyn polttoainepanoksen lämpöteho on 15 kW.

Kattilaa on tarkoitus käyttää lämmönkulutushuippujen aikana tukena muille pienrakennuksen lämmöntuotantomuodoille, joita ovat esimerkiksi aurinkokeräimet, lämpöpumput ja suora sähkölämmitys. Kattilan voi sijoittaa mahdollisen vanhan öljykattilan paikalle.

Tämä työ tarkastelee aihetta lähinnä energiatekniikan näkökulmasta.

Materiaalitekniisiä tai liiketaloudellisia seikkoja ei tässä työssä käsitellä. Kattilan rakennepiirroksat ovat liikesalaisuus, joten niitä ei esitellä tässä raportissa.

2 RUNTECH ENERGY

Runtech Energy Oy on sellu- ja paperiteollisuuden laitetoimittaja Runtech Systems Oy:n tytäryhtiö, jonka tuotteita ovat kiinteistöjen ja teollisuuden energiantuotantoon liittyvät laitteet- ja palvelut. Yrityksellä on erikoisosaamista mm. komposiittimateriaaleista. Runtech Energy Oy:llä on toimipisteet Kolhossa ja Kotkassa.

Opinnäytetyön aiheena olevan kattilan vesi lämpenee Runtech Energy Oy:n tuotteisiin kuuluvasta haponkestävästä aallotetusta RunPipe-putkesta valmistetussa lämmönsiirtimessä, joka asennetaan kattilan savupiippuun. (3)



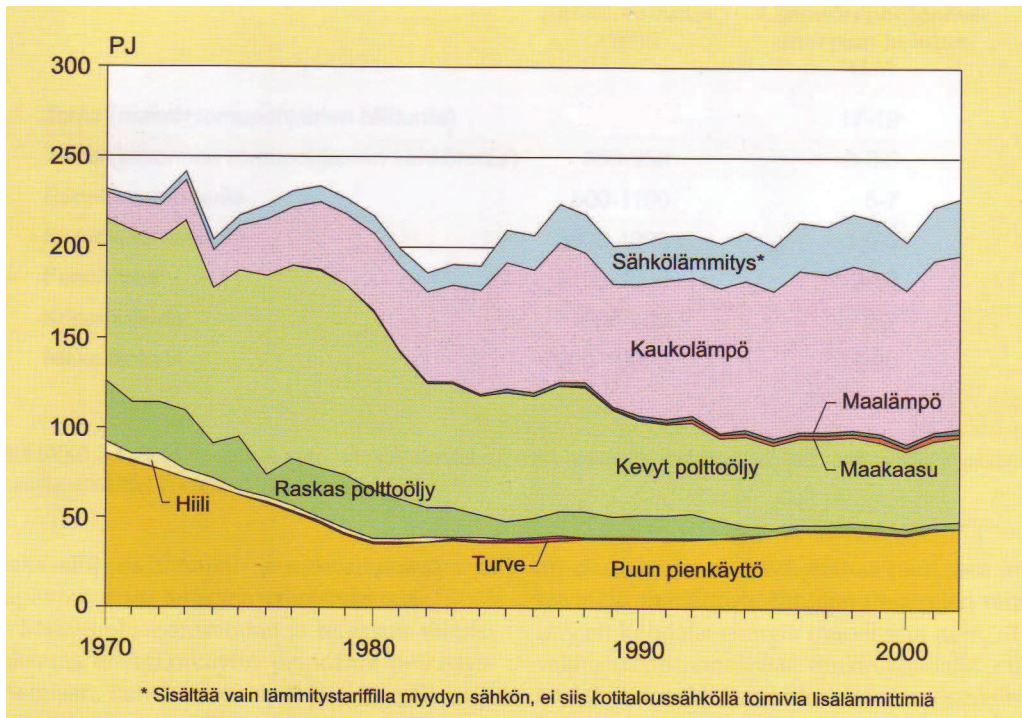
Kuva 1. RunPipe-putkesta valmistettu lämmönsiirrin (3)

3 LÄMMITYSENERGIAN KULUTUS SUOMESSA

Rakennusten lämmityksen osuus Suomen primäärienergian vuoden 2002 kulutuksesta oli 21 %. Teollisuuden osuus oli 50,3 %, liikenteen 13,4 % ja kotitalouksien, maatalouden ym. 15,3 %. Lämmitykseen käytetyn energian osuus on pudonnut 1970-luvulta yli 10 prosenttiyksikköä. Tämä pitkä muutosprosessi on ollut käynnissä jo vuosikymmenien ajan, ja sen voidaan katsoa huipentuneen 1970-lukuun. Vielä 1960-luvulla rakennusten lämmittämiseen kului enemmän energiaa kuin teollisuustuotantoon. Muutos aiheutui erityisesti uudisrakentamisen vilkastumiseen liittyvästä rakennusten energiatalouden tehostumisesta. Kaukolämmön yleistymisellä oli olennainen merkitys. Rakennusten lämmittämiseen käytetyn energian määrä on laskenut myös absoluuttisesti, joten kyse on hyvin merkittävästä energiataloudellisesta muutoksesta. (1, 44)

3.1 Rakennusten lämmitys

Rakennusten lämmittämiseen vuonna 2002 käytetystä energiasta noin 70 % käytettiin asuinrakennusten lämmittämiseen. Rakennusten lämmönlähteet ovat muuttuneet merkittävästi. Puun osuus polttoaineista oli vielä 1970-luvun alussa noin 40 %. Uudisrakentamisen tuloksena voitiin kaupungeissa siirtyä kaukolämpöön hyvin nopeasti. Asuintalojen kaukolämmön kulutus onkin 1970-luvun jälkeen vuoteen 2002 mennessä yli nelinkertaistunut. Vastaavasti talokohtainen, aikaisemmin pääasiassa fossiililla polttoaineilla lämmittäminen on vähentynyt samassa suhteessa. Sähkölämmitys lisääntyi voimakkaasti 1980- ja 1990-luvuilla. Fossiilisten polttoaineiden ja puun pienpolton osuus asuin- ja palvelurakennusten lämmityksessä oli vuonna 2002 lähes yhtä suuri (1, 60). Maalämpöpumput ovat kasvattaneet lämmitysjärjestelmistä suosiotaan eniten. Vuonna 2008 maalämpö valittiin lähes 30 %:iin uusista pientaloista (4). Pientalojen energiankulutuksesta rakennuksen lämmittämisen osuus on 50 %, veden lämmittämisen 20 % ja kotitaloussähkön 30 %. (5). Pientalojen ja vapaa-ajan asuntojen osuus Suomen rakennuskannan lämmitysenergian kulutuksesta vuonna 2002 oli noin 42 %. (1, 221)



Kuva 2. Asuin- ja palvelurakennusten lämmitys energiamuodoittain vuosina 1970-2002 (1)

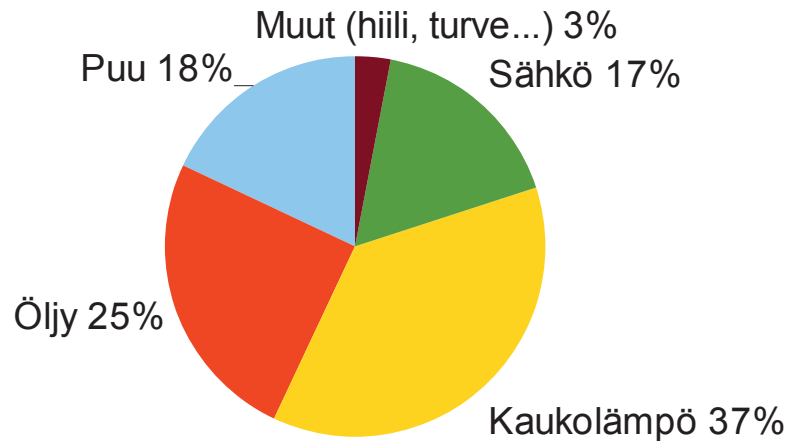
3.2 Lämmityksen energiankulutuksen kehittyminen

Vuosina 2000–2020 uusien asuntojen kysynnän odotetaan pysyvän maltillisena muun muassa asuntojen perimisen vuoksi. Väestön määrä säilynee lähes ennallaan eikä maahanmuuttoa esiinny merkittävästi. Väestö keskittyy tulevaisuudessa yhä enemmän asutuskeskuksiin. Toisaalta asumisväljyyden odotetaan kasvavan ja kotitalouksien keskikoon pienenevän.

Tulevaisuudessa rakennusten lämmitykseen käytettävän energian tarve ei nouse merkittävästi lämmityksen energialähteiden muuttumisen ja siihen liittyvän tuotannon hyötysuhteen paranemisen vuoksi. Rakennusten uudistustoiminta ja saneeraukset parantavat rakennuskannan energiatehokkuutta. Vaikka rakennusvolyymi kasvaa, ei lämmittämiseen käytettyjen primääripolttoaineiden kulutus kasva.

Ihmisten vaatimustason noustessa myös energiankulutus lisääntyy. Varsinkin vapaa-ajan asunnoissa laatutaso on selvästi noussut. Sähkölämmitteiset kesämökit ovat yleistymässä.

Rakennusten lämmitykseen käytettyjen energiamuotojen kohdalla on tapahtunut viime vuosikymmeninä merkittäviä muutoksia. Kuvassa 3 esitellään koko rakennuskannan primäärienergian kulutus vuonna 2002 lämmitysmuotojen mukaan jaoteltuna.



Kuva 3. Suomen rakennuskannan lämmitysenergian kulutus lämmitysmuodoittain vuonna 2002 (1)

Puuta tullaan käyttämään asuinrakennusten lämmittämiseen jatkossakin eniten varaavissa tulisijoissa. Tulisijat kehittyvät polttotekniikaltaan entistä ympäristöystävällisemmiksi päästömääräysten alati tiukentuessa. Uusien rakennusten lämmitystehon tarve pienenee, mikä vaikuttaa tulisijojen mitoitukseen. Tulevaisuuden tulisijassa hyödynnetään nykyistä enemmän teknologian suomia mahdollisuuksia palamisprosessin optimoinnissa ja lämmönluovutuksen hallinnassa.

Perinteisen klavin rinnalle polttoaineeksi ovat tulleet pidemmälle jalostetut puupolttoaineet, kuten brikitit ja pelletit. Pelleteille lämmöntarpeen mukaan suunnitelluissa polttimissa ja kamiinoissa on mahdollista hyvin puhdas palaminen ja automaattinen toiminta. Nykyisillä laitehinnoilla pellettilämmittäminen vaatii kuitenkin kalliita investointeja. Ruotsissa ja Tanskassa pellettien kilpailukyky on parempi, koska polttoaineen verotus on erilainen. Toinen ongelma pelletin käytössä on varastointi. Pelletit vaativat paljon varastotilaa kuivissa olosuhteissa.

Uusien öljylämmityskattiloiden hyötysuhteet kehittyvät entisestään.

Pientaloasumisessa sähkölämmitys tulee olemaan edelleen merkittävä lämmitysmuoto. Sähkölämmityksen suosio on kuitenkin laskenut kohonneiden sähkön hintojen seurauksena. Maalämmön suosio on sen sijaan noussut. Taajamien suuret rakennuskokonaisuudet tulevat kaukolämmön piiriin, jolloin sen keskitetty tuotanto sekä yhteistuotanto lisäävät polttoaineesta saatavaa hyötyä vähentäen rakennusten primäärienergian tarvetta. Kaukolämmityksen lisääntyessä kiinteäpolttoisten lämmitysmuotojen osuuksien oletetaan vastaavasti pienenevän, koska vanhat

rakennukset poistuvat käytöstä tai niitä saneerataan uudemmilla lämmitysjärjestelmillä. Öljylämmityksen oletetaan edelleen menettävän osuuttaan sähkölämmitykselle varsinkin pientaloissa.

(1, 220-222)

3.3 Asuinrakennusten lämmitysteknologian kehittyminen

Nykypäivän vaihtoehtoiset lämmitysratkaisut asuinrakennuksissa tulevat olemaan myös tulevaisuuden ratkaisuja. Rakennusten lämmitykseen käytetyn energian tarve tulee pienenemään paremman lämmöneristyksen ja vettä säästävien vesikalusteiden myötä. Esimerkiksi ikkunat ovat kehittyneet viime vuosina huomattavan nopeasti. Markkinoilla on jo saatavilla kilpailukykyiseen hintaan ikkunoita, joiden lämmöneristyskyky on lähes kaksinkertainen perinteisiin ratkaisuihin verrattuna. Energiatarvetta vähentää oleellisesti myös koneellisen ilmanvaihdon ja sen myötä ilmanvaihdon lämmöntalteenottotekniikan yleistyminen. Lämmitysjärjestelmien ja niiden osien energiatehokkuus kehittyy, kun siirrytään yhä pidemmälle vietyihin teollisesti esivalmistettuihin moduuliratkaisuihin. Aurinkoenergiatekniikan ja lämpöpumppujen tai muiden korkean hyötysuhteen laitteiden taloudellinen kannattavuus ja yleistyminen tulee riippumaan eri energiamuotojen keskinäisistä hintasuhteista. Tekniset ratkaisut ovat olleet olemassa jo pitkään.

Rakennusten käyttäjät tulevat yhä energia- ja ympäristötietoisemmiksi. Energiaa kuluttaville laitteille laaditaan erilaisia energia- ja ympäristömerkintöjä sekä -luokitteluja. Tämä tulee ulottumaan asteittain jopa rakennuksiin asti, mikä tulee ohjaamaan päätöksentekoa lämmitystapaa ja laiteteknisiä valintoja tehtäessä. EU:n energiansäästödirektiivi vaatii rakennuksille energialuokitusta, mikä ohjaa energiaa säästäviin toimenpiteisiin.

Energian hinnoittelu tulee vaikuttamaan ratkaisevasti yksittäisen kansalaisen lämmitystapavalintoihin, aivan kuten on tapahtunut tähänkin mennessä. Uutena piirteenä on energian hinnan markkinalähtöinen määräytyminen kysynnän ja tarjonnan mukaan vuoden- ja vuorokaudenajasta riippuen. Muuttuva energian hinta tulee osaltaan lisäämään rakennusten ja energianjakeluyhtiöiden välistä tiedonsiirtoa nykyaikaisin tietoteknisin keinoin. Tietotekniikan kehittymisen myötä myös rakennusten taloteknisiin järjestelmiin tulee uusia ratkaisuja, kuten automaattiset häiriöiden ja vikojen tunnistamis- ja paikantamistoiminnot.

(1, 222-224)

4 PUUPOLTTOAINEET PIENKÄYTÖSSÄ

Puun käyttöä lämmitykseen halutaan edistää, koska sitä pidetään hiilidioksidipäästöiltään neutraalina polttoaineena ja siten ilmastonmuutoksen hidastajana. Samalla kuitenkin ymmärretään puun pienpolton mahdolliset haittavaikutukset. Puun palaessa syntyy pienhiukkasia, jotka ovat ihmisen terveydelle haitallisia. Kuiva ja hyvä polttoaine sekä oikea polttotekniikka oikein huollettuna ja säädettynä takaavat tehokkaan ja puhtaan palamisen sekä kemiallisesti vaarattomat päästöt.

Mikä tahansa biopolttoaine ei sovellu pienpoltoon, eivätkä perinteiset polttotavat välttämättä tuota puhdasta palamista. Epätäydellisessä palamisessa tulee enemmän pienhiukkasia kuin täydellisessä palamisessa, ja hiukkaset ovat kemialliselta koostumukseltaan haitallisempia terveydelle. Haitallisinta on kitupoltto ja huonolaatuisten roskien polttaminen.

Puu on pysynyt suomalaisten kiinteistöjen lämmityspolttoaineena, vaikka öljy- ja sähkölämmitys ovat yleisiä ja alue- ja kaukolämpöverkkoja on asennettu pieniinkin taajamiin. Perinteisten puupolttoaineiden klapiin ja puuhakkeen rinnalle on tullut sahanpurusta, höylälästusta ja puun hiontapölystä puristettu pelletti.

Klapit ovat pienten tulisijojen ja vesikeskusjärjestelmään liitettyjen pienkattiloiden lämmönlähde. Klapiä käytetään yleisimmin lisälämmönlähteenä sähkölämmitteisissä pientaloissa, mutta sitä käytetään jonkin verran myös ainoana lämmönlähteenä.

Metsähakkeen käyttö on lisääntymässä ja on lisääntynyt myös isojen kiinteistöjen lämmönlähteenä. Parhaiten se soveltuu metsätiloille ja lämpöyrittäjille.

Pienkiinteistöissä metsähakkeen laadun tulee olla parempaa kuin isommissa lämpölaitoksissa. Pelletit ovat hakkeen ja klapien vahva kilpailija.

Pellettilämmitysjärjestelmien asennus- ja huoltopalveluiden kehittyminen lisäävät polttoaineen suosiota.

Suomessa arvioidaan olevan vuonna 2007 noin 2,2 miljoonaa tulisijaa, joista 1,2 miljoonaa omakotitaloissa, 0,8 miljoonaa vapaa-ajan asunnoissa ja 0,2 miljoonaa rivitaloissa. Suurin osa polttopuista saadaan edelleen omista metsistä ja vain noin 15 prosenttia on ostopuuta. Neljännes polttopuun käyttöönsä lisäävistä aikoo ostaa tarvitsemansa puun. Puun myynti lisääntyy jatkossa erityisesti pääkaupunkiseudulla ja muissa taajamissa.

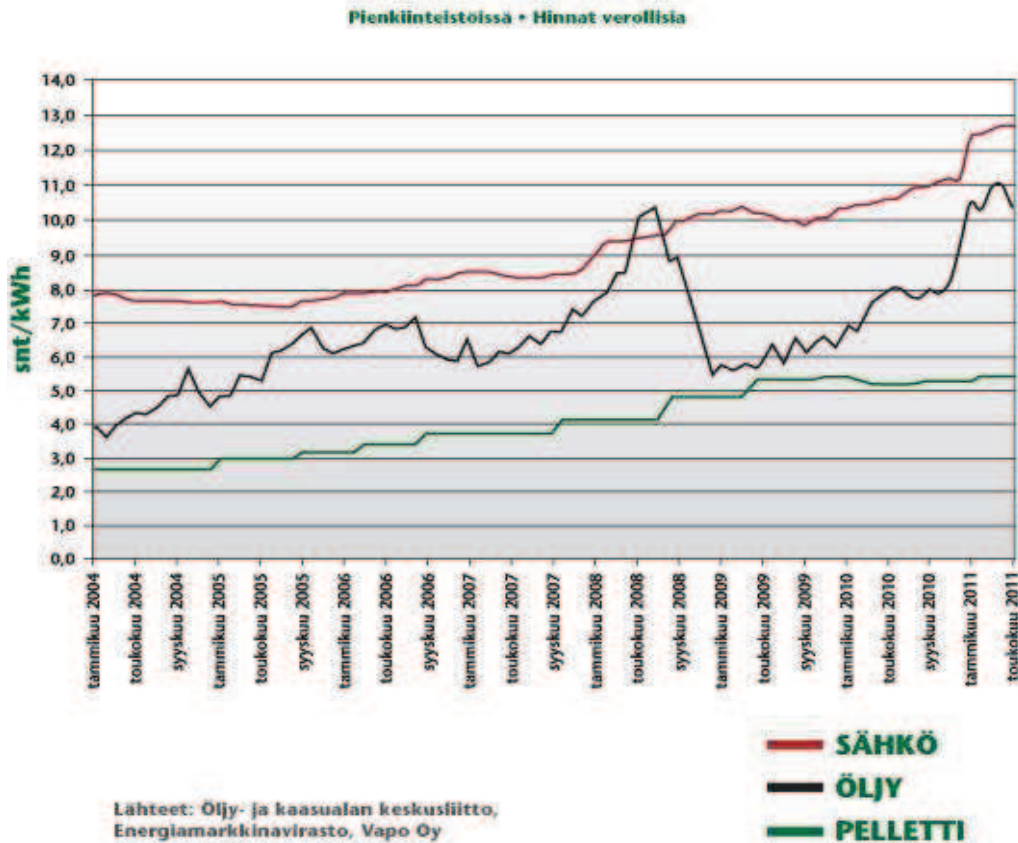
(6, 7-8)

4.1 Puupolttoaineiden kilpailukyky

4.1.1 Polttoaineiden hinnat

Puupolttoaine kilpailee kiinteistöjen lämmityksessä lähinnä kevyen polttoöljyn, sähkön ja maalämmön kanssa. Maakaasua käytetään Suomessa lämmitykseen pääasiassa kaukolämpölaitosten kautta. Maaperän ja ilman lämpöä käyttävien lämpöpumppujen käyttö on lisääntynyt, kuten myös useamman lämmitysmuodon yhdistäminen, josta esimerkkinä on aurinkoenergian hyödyntäminen käyttöveden lämmitykseen. Etelä-Suomessa aurinkolämpökeräimillä voidaan saada jopa kolmasosa vuoden lämmitysenergian tarpeesta. Kevyen polttoöljyn hinta seuraa öljyn maailmanmarkkinahintaa. Lisäksi hintaa nostavat polttoaineverot, joita on asetettu useissa maissa fossiilisille polttoaineille edistämään biopolttoaineiden kysyntää. Sähkölämmitys on ollut Suomessa puupolttoaineiden ja muiden lämmitysjärjestelmien vakava haastaja sähkön ollessa halpaa. Sen lisäksi sähkölämmitysjärjestelmä on helppo ja edullinen asentaa.

Puupolttoaineiden hintakehitys on ollut vakaata. Toisaalta puupolttoainemarkkinat ovat olleet kehittymättömät. Vasta 2000-luvun alusta lähtien on esimerkiksi pilkkeelle kehitetty jakelu- ja hankintakanavia. Suurin osa omakotitalojen puupolttoaineista hankitaan edelleen omasta metsästä. Pelletistä on muodostumassa vähitellen merkittävä polttoaine ja sen hintakehityskin on ollut suhteellisen vakaata. Kysyntä Keski-Euroopassa ja raaka-aineen kuivatustarve on kuitenkin nostanut pelletin hintaa. Siitä huolimatta pelletti on edelleen huomattavasti halvempaa kuin öljy.
(6, 9-10)



Kuva 6. Lämmitysmuotojen hinnankehitys (7)

4.1.2 Lämmitystavan valinta

Polttoaineen hinta, käyttömukavuus ja investoinnit vaikuttavat lämmitystavan valintaan. Lämmitysjärjestelmän investointikustannuksiin vaikuttaa paljon, onko kyseessä uusinvestointi vai vanhan järjestelmän korvaaminen. Kiinteän polttoaineen kattilan investointi on kalliimpi kuin öljykattilan. Kustannukset on kyettävä korvaamaan järjestelmän eliniän aikana halvemmilla polttoainekuluilla. Mitä pienempi kattila, sitä suurempi osuus vuotuisista lämmityskustannuksista on kiinteitä laitehankintakustannuksia. Pienet kattilat mitoitetaan niin, että ne vastaavat koko lämmöntarpeesta ja varustetaan sähkövastuksilla häiriötilanteita varten. Isommilla kiinteän polttoaineen kattiloilla ei pyritä kattamaan lämmön huipputehon tarvetta, vaan huippu- ja varatehoa varten on öljykattila ja biopolttoaineella saadaan 80–90 prosenttia lämpöenergiasta.

Käyttäjät voivat arvottaa eri tavoin lämmitysjärjestelmän halvan hankintahinnan suhteessa käyttökustannuksiin tai oman työn määrään. Usein järjestelmän valinnan perusteena on laitteiden käytön helppous. Kiinteä polttoaine vaatii jonkin verran enemmän valvontaa ja käytön harjoittelemista kuin öljylämmitys. Pellettilämmitys

voidaan automatisoida ja pelletti tarvitsee haketta ja klapeja vähemmän varastotilaa suuremman energiatiheydensä ansiosta.

Suoran sähkölämmityksen asentaminen on huomattavasti edullisempaa kuin vesikiertoisen järjestelmän. Lämmitystapa on myös helppohoitoinen. Laitteiston eliniän aikana sähkölämmitys ei kuitenkaan ole edullisin varsinkin kun sähkön hinnan ennakoitaan nousevan.

Puupolttoaineen kilpailukykyyn vaikuttaa merkittävimmin vaihtoehtoisen polttoaineen hinta, joka on kiinteistöissä tavallisimmin kevyt polttoöljy. Klavin ja metsähakkeen kilpailukyky riippuu olennaisesti polttoaineen edullisesta hankintahinnasta. Suomessa on vielä hyvin yleistä tehdä klavit itse, mutta tämä saattaa jopa korottaa puunhankintakuluja, mikäli pääomia käytetään hankinta- ja kuljetuskalustoon.

Ympäristöasioiden näkökulmasta hiilidioksidipäästöiltään neutraali puupolttoaine voittaa öljyn ja sähkön. Sähkölämmityksen aiheuttamiin hiilidioksidipäästöihin vaikuttaa olennaisesti se, kuinka paljon sähköä käytetään talven kulutushuippujen aikana, jolloin sähkön tuotantoon käytetään hiililauhdevoimaa. Puun käyttö lisälämmitykseen pienentää sähkön kulutushuippuja huomattavasti.

(6, 10-12)

4.1.3 Puupolttoaineiden käytön tukeminen

Suomi on sitoutunut energia- ja ympäristöpolitiikassaan vähentämään fossiilisten polttoaineiden aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä. Näitä polttoaineita pyritään korvaamaan uusiutuvalla energialla. Päästövähennystavoitteiden saavuttamiseksi voidaan käyttää uusiutuvan energian kilpailukykyä parantavia poliittisia ohjauskeinoja. Uusiutuvien energialähteiden laitteistojen investointikustannukset ovat suuremmat kuin sähkö- ja öljylämmityksessä, joten niiden käyttöä pientalojen ja julkisten kiinteistöjen lämmitykseen edistetään investointituen sekä verottamalla fossiilisia polttoaineita. Myös tiedotuksella ja valistuksella yritetään vaikuttaa kuluttajan päätöksiin lämmitysjärjestelmän valinnassa. Laitteille voidaan myös asettaa valintaa ohjaavia hyötysuhde- ja päästörajoja.

Laitteiden tekniikkaa on pyritty kehittämään tutkimusta ja tuotekehitystä tukemalla. Tärkeänä on pidetty hyötysuhteen parantamista ja polton päästöjen vähentämistä. Julkista tutkimusta on rahoittanut Tekes sekä maa- ja metsätalousministeriö. Yritykset rahoittavat merkittävästi alan tutkimusta ja tuotekehitystä.

Suurimmassa osassa Euroopan maista on biopolttoaineilla yleistä tasoa alhaisempi arvonlisävero. Suomessa verotus on sama kaikille polttoaineille. Korkein arvonlisävero biopolttoaineille on Ruotsissa ja Tanskassa. Fossiilisten polttoaineiden verotus on muuttunut useaan otteeseen kahden viime vuosikymmenen aikana.

Suuriin ja pieniin lämpö- ja voimalaitoksiin sekä polttoaineen tuottamiseen ja käsittelyyn tarvittaviin laitteisiin on myönnetty investointiavustuksia. Tuesta suurin osa on ohjattu puupolttoaineisiin. Myös metsähakkeen tuotanto on saanut tukea, jonka avulla pyritään edistämään harvennushakkuita ja alentamaan pieniläpimittaisen puun tuotantokustannuksia ja siten parantamaan sen kannattavuutta.

Asuinrakennuksille myönnetään energia-avustuksia, joiden tavoitteena on parantaa rakennuskannan energiatehokkuutta. Samalla edistetään uusiutuvien ja vähäpäästöisten energialähteiden käyttöä. Vuonna 2006 otettiin käyttöön myös yksityisille henkilöille suunnattu investointiavustus, jolla on tuettu pientalojen lämmitysjärjestelmien muuttamista öljy- tai sähkölämmityksestä kaukolämpö-, pelletti- tai puu-, maalämpöpumppu- ja aurinkolämmitysjärjestelmäksi.

(6, 12-15)

4.1.4 Puupolttoaine Euroopassa

Euroopan unionissa lähes 40 prosenttia bioenergiasta käytetään kotitalouksissa. Biopolttoaineiden osuus energian kokonaiskulutuksesta on alle neljä prosenttia. Puolet kokonaiskulutuksesta käytetään lämmöntuotantoon. Lämmöstä 33 prosenttia tuotetaan maakaasulla ja 31 prosenttia sähköllä.

Investointikustannukset vaihtelevat eri maissa. Kustannuksiin vaikuttaa laitteiden tekninen vaatimustaso. Esimerkiksi Itävallassa ja Saksassa hyötysuhteen on oltava 90 prosenttia ja biopolttoaineita käyttävien laitteiden päästöt ja hyötysuhde on testattava.

Keski-Euroopassa on yleisesti tiukemmat määräykset kuin Suomessa. Lisäksi laitteiden muotoiluun, automatiikkaan, huoltoon ja varusteluun panostetaan enemmän kuin meillä, mikä korottaa hintoja. Esimerkiksi Itävallassa biopolttoaineita käyttävät kattilalaitokset ovat paljon kalliimpia kuin Suomessa. Kotitalouksien investointeja biopolttoaineiden käyttöön on tuettu Itävallassa, Saksassa, Ranskassa, Espanjassa, Irlannissa, Ruotsissa ja Tanskassa.

(6, 15)

4.2 Laitteiden markkinanäkymät

Suomessa puun pienpolton laitteista eniten myydään tulisijoja ja kiukaita. Varaavia tulisijoja viedään myös ulkomaille. Joillakin yrityksillä viennin osuus on jopa yli puolet liikevaihdosta. Kattiloiden ja laitostoimitusten vientiin on suomalaisilla yrityksillä ollut liian pienet resurssit. Puukattiloita on valmistettu lähinnä kotimarkkinoille. Tuotannon laajuus on seurannut öljyn markkinahinnan heilahtelua. Alalle odotetaan taas noususuhdannetta. Esimerkiksi Saksassa sikäläiset tiukat investointiavustusten vaatimukset täyttävät kattilat kävisivät kaupaksi erittäin hyvin. Suomalaiset kattiloita valmistavat yritykset ovat pieniä verrattuna Keski-Euroopan suuriin kattilavalmistajiin.

Suomalainen puukattilateknologia on vielä teknisesti yksinkertaista, koska Suomessa ei ole päästörajoituksia, jotka olisivat pakottaneet yritykset kehittämään vähäpäästöisempiä ja hyötysuhteeltaan parempia kattiloita. Määräykset tulevat varmasti jossakin vaiheessa tiukkenemaan. Pienille yrityksille tuotekehitys ja laitteiden testaaminen voi kuitenkin olla liian kallista. Osa toimijoista saattaa tästä syystä kadota markkinoilta uusien päästömääräysten myötä. Tuotteiden laatu ja vientimahdollisuudet kuitenkin tulevat paranemaan uusien päästörajoitusten tultua voimaan.

(6, 25)

4.3 Standardit ja määräykset puupolttoaineille

Pienkattiloille, tulisijoille ja pellettipolttimille on laadittu eurooppalaiset EN-standardit ennen polttoainestandardeja. Biopolttoaineille on useita kansallisia toisistaan poikkeavia standardeja, joita alettiin yhtenäistää EN-standardeiksi vuonna 2007. Laatuluokitukset laadittiin vain tärkeimmille kaupallisille biopolttoaineille, joita ovat briketit, pelletit, oliivikakku, puuhake, puumurske, sahanpuru, kuori, klapit ja olkipaalit. (6, 59)

5 POLTTOTEKNIIKAT PIENKÄYTÖSSÄ

5.1 Tulisijat

Puuta poltetaan kaikissa kokoluokissa omakotitaloista aina suuriin voimaloihin asti. Pienessä kokoluokassa käyttökohteet vaihtelevat yksinkertaisesta tulisijasta automatisoituihin hake- ja pellettisovelluksiin

Suomessa puu poltetaan pientaloissa suurimmaksi osaksi klapeina erilaisissa tulisijoissa, jotka ovat pääasiassa yläpaloisia ja panospolttoisia. Tämä tarkoittaa, että koko kerralla syötetty polttoainepanos syttyy. Varaavat tulisijat ovat yleisin tulisijatyyppejä. Niissä puu palaa nopeasti suurella teholla ja energia varastoituu tulipesän ympärillä olevaan varaavaan massaan. Tehdasvalmisteiset varaavat tulisijat valmistetaan vuolukivestä ja erilaisista tulenkestävistä materiaaleista, jotka voidaan pinnoittaa rappaamalla tai kaakeloimalla. Myös perinteisiä tiiliuuneja on saatavana valmispakettina. (8, 92)(9)

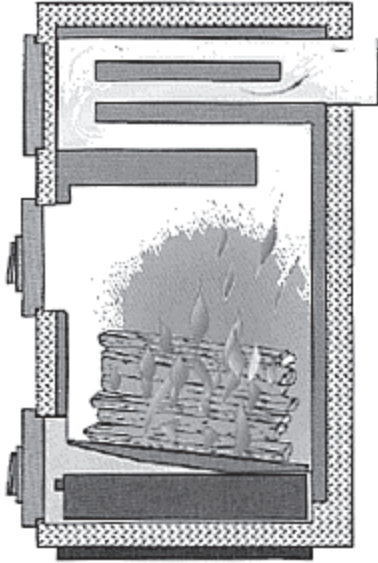
5.2 Pienkattilat ja polttimet

5.2.1 Yläpalo

Yläpalokattilat ovat yleisimpiä klapien polttoon tarkoitettuja kattiloita Suomessa. Ne ovat edullisia hinnoiltaan, koska niiden rakenne on yksinkertainen. Puu poltetaan niissä samalla tavalla kuin tulisijoissa. Polttoaine lisätään isona panoksena, jonka yläosa palaa ja alemmat kerrokset kaasuuntuvat. Palamisilma ohjataan kattilan pohjalla olevan rakoarinnan läpi primääri-ilmaksi ja kattilan luukuista sekundääri-ilmaksi. Poltto on puhdasta ja tehokasta, kun alhaalta tulevat kaasut kulkevat liekin läpi syttyen ja palaen.

Yleensä kattila liitetään varaajaan. Tämä mahdollistaa kattilan käytön sen nimellisteholla, jolloin päästöt ovat alhaisimmat, palaminen tehokkainta ja kokonaislämmitys aika lyhyt. Varaajaan liitetään myös yleensä sähkövastus. Liian pienellä teholla polttaminen aiheuttaa suuret päästöt.

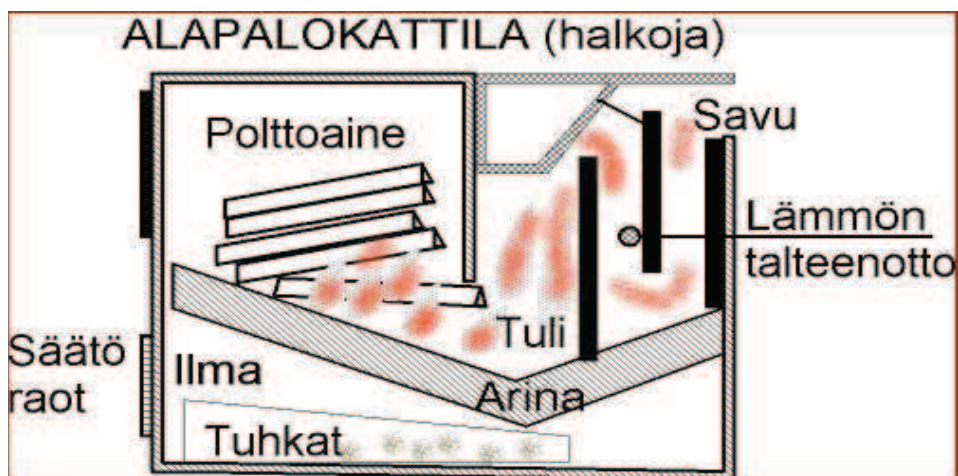
(8, 93)(9)



Kuva 8. Yläpalokattila (10)

5.2.2 Alapalo

Alapalokattiloissa polttoaine kaasuuntuu ja palaa osittain pienessä osassa polttoainepanosta kattilan alaosassa. Tästä syntyneet kaasut palavat loppuun erillisessä jälkipalotilassa. Tuhka tippuu arinan läpi tuhkatilaan. Alapalokattiloissa käytetään polttoaineena yleensä klapeja, haketta ja palaturvetta. Kattilat toimivat joko luonnonvedolla tai palamisilma syötetään paloon puhaltimella. Alapalokattilassa palaminen on jatkuvampaa, tasaisempaa ja täydellisempää kuin yläpalokattilassa. Siksi se on myös puhtaampaa ja tehokkaampaa. Alapalokattilat ovat monimutkaisemman rakenteensa takia kalliimpia kuin yläpalokattilat. (8, 93)



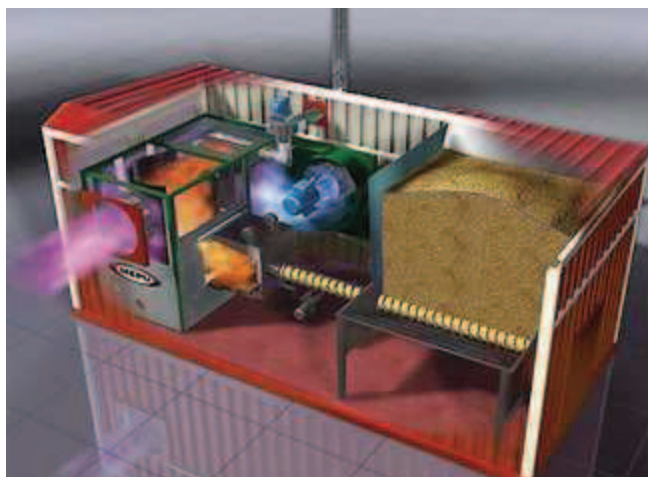
Kuva 9. Alapalokattila (11)

5.2.3 Käänteispalo

Käänteispalokattilassa palamiskaasut kulkevat pakotettuna kattilan polttoainekerroksen alaosassa olevan arinan läpi keraamiseen jälkipalotilaan, jossa kaasut palavat korkeassa lämpötilassa. Käänteispalokattila on paranneltu versio alapalokattilasta ja siinä kaasujen jälkipoltto on paremmin hallinnassa. Korkea lämpötila aiheuttaa kattilan materiaaleille kovan rasituksen.

Kattila toimii parhaiten, jos siinä on savukaasupuhallin. Suomessa kattilatyyppejä ei ole kalliin hintansa vuoksi yleistynyt, mutta muutamassa Keski-Euroopan maassa tiukkojen puun pienpolton päästörajoitusten takia vähäpäästöiset käänteispalokattilat ovat ainoita hyväksytyjä klapikattiloita. (8, 94)(9)

5.2.4 Stokeripoltin



Kuva 10. Stokeripoltin (12)

Stokeripolttimella poltetaan haketta tai pellettejä. Laitteistoon kuuluu erillinen varastosäiliö, ruuvikuljetin ja poltin. Stokeripolton periaatteena on, että polttoainetta syötetään polttimelle lämmöntarvetta vastaava määrä. Erillistä vesivaraajaa ei siis välttämättä tarvita. Hakkeelle poltin on usein pieni kiinteä arina ja pelletille alta syötettävä kuppi. Polttoaine voidaan syöttää polttimelle alta, sivusta tai päältä. Palamisilmaa ohjataan puhaltimilla. Stokeripoltin voidaan asentaa vanhaan kattilaan öljypolttimen tilalle.

Stokeripolttimessa polttoaine palaa kuten yläpalokattilassa, mutta koska polttoainetta syötetään tasaisesti pienissä erissä, on palaminen tehokasta, tasaista ja vähäpäästöisempää. Monimutkainen rakenne, sytytysautomaattikka ja termostaattiohjaus vaativat kuitenkin suuren investoinnin. (8, 94-96)(9)

5.2.5 Etupesäpoltin

Etupesäpoltin muodostuu arinasta ja kattilaan johtavasta tulikanavasta. Arinassa kaasutetaan kiinteää polttoainetta polttamalla sitä vähäisellä hapella. Epätäydellisen palamisen muodostamat savukaasut ohjataan tulikanavaan. Sekundääri-ilma sytyttää kaasun kanavassa ja varsinainen palo tapahtuu yleensä kattilan tulipesässä. (9)

5.3 Säännökset pienpoltolle

Pienpolttolaitteiden päästörajat ja palamisen puhtaus määritellään lähinnä savukaasujen hiukkaspitoisuuden tai häkä- eli hiilimonoksidipitoisuuden (CO) mukaan. Hiukkaspitoisuuksia on perinteisesti mitattu USA:ssa, Kanadassa, Australiassa ja Uudessa-Seelannissa. Euroopassa hiilimonoksidin osuus savukaasusta on ollut yleensä riittävä indikaattori osoittamaan onko palaminen puhdasta.

Laboratoriokokeet ovat osoittaneet, että hiilimonoksidipitoisuuden, hiilivetytuloisuuden ja hiukkaspäästöjen välillä on hyvä korrelaatio. Kun CO-pitoisuus on riittävän alhainen, on myös muiden haittayhdisteiden määrät alhaiset. CO-pitoisuutta on hiukkaspitoisuutta helpompi mitata jatkuvatoimisesti. Myös orgaanisten yhdisteiden hiilipäästöjä eli OGC-päästöjä (Organic Gaseous Compound) mitataan. (6, 62-64)

Lisäksi viime aikoina on kiinnitetty yhä enemmän huomiota pienhiukkaspäästöihin. Niiden merkittävimmät kotimaiset lähteet ovat tieliikenne ja puun pienpoltto. Ympäristöministeriö selvittää tarvetta asettaa päästörajoituksia pienhiukkasille niiden terveysvaikutusten takia. Jos rajoituksiin päädytään, ne koskevat uusia lämmityskattiloita ja tulisijoja. (13)

5.3.1 Päästörajat Suomessa ja muualla

Suomessa ei ole päästörajoja pienpoltolle. Ympäristöministeriössä valmisteltiin niitä vuosina 2006–2008, mutta ei pantu täytäntöön tulevien EU-määräysten vuoksi. Luonnoksessa nimellisteholtaan alle 50 kW lämmityslaitteella hyötysuhteen olisi tullut olla vähintään 70 % tai $67 + 6 \log P$ % (P=teho). Savukaasun CO-pitoisuus olisi saanut olla enintään 3000–5000 mg/m³n 10 %:n happipitoisuudessa. Hiilivetyjä olisi saanut olla savukaasussa 100–150 mg/m³n.

Useassa Euroopan maassa on huomattavan tiukat päästörajat. Esimerkiksi Saksassa polttolaitteen hyötysuhteen pitää olla vähintään 90 prosenttia. Jo vuodesta 1988 on Saksassa ollut nimellisteholtaan yli 15 kilowatin laitteilla hiukkaspäästöjen sallittu enimmäispitoisuus $150 \text{ mg/m}^3 \text{ n}$ (O_2 13 %).

(6, 67)(14)

5.3.2 Päästörajat tulevaisuudessa

Päästömääräykset tulevat tiukkenemaan merkittävästi Euroopassa lähivuosina. Määräyksiä on tulossa lisää niin kansallisesti kuin kansainvälisesti EU:n ja YK:n kautta. Tehdasvalmisteisille tulisijoille on tulossa CE-merkintävaatimus 1.1.2012. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että laitteiden on alitettava EN-testausstandardeissa asetetut vaatimukset. Pienpolttolaitteiden hiukkaspäästöille on EU:ssa ehdotettu rajaksi ensimmäisessä vaiheessa $50\text{--}200 \text{ mg/m}^3 \text{ n}$ (O_2 13%) ja toisessa vaiheessa neljän vuoden siirtymäajan jälkeen $20\text{--}40 \text{ mg/m}^3 \text{ n}$.

Pellettilaitevalmistajat ovat ilmoittaneet, että tiukentuvia päästörajoja ei tavoiteta pelkästään polttotekniikkaa parantamalla, vaan tarvitaan puhdistustekniikan kehittämistä. Tämä tulee olemaan suuri haaste laitekehitykselle lähivuosina.

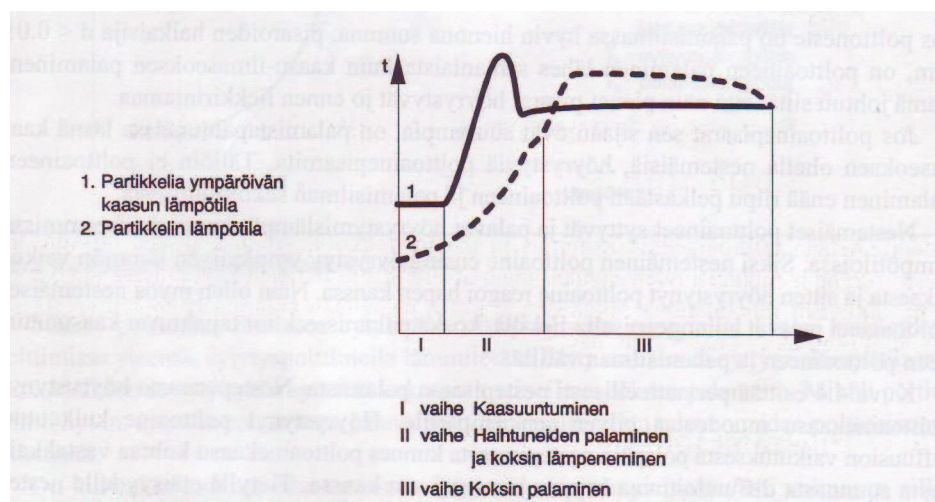
(6, 67)(14)

6 PALAMINEN

Palaminen on aineen kemiallista yhtymistä happeen. Polttoaineiden palavia aineita ovat hiili (C), vety (H_2), rikki (S) ja typpi (N). Palamisreaktiot ovat enimmäkseen eksotermisiä, eli niissä vapautuu kullekin reaktiolle ominainen energia lämpönä. Typen ja hapen välinen reaktio on kuitenkin endoterminen eli lämpöä kuluttava.

Polttoainepartikkelin palaminen ja kaasuuntuminen jakautuu eri vaiheisiin. Ensin partikkeli lämpenee kuivumislämpötilaan, minkä jälkeen seuraa pyrolyysi. Sen jälkeen tapahtuu jäännöshiilen palaminen ja kaasutus. Suuren hiukkasen palaessa nämä vaiheet voivat olla osittain päällekkäisiä. Esimerkiksi puukappaletta poltettaessa kuivuminen, pyrolyysi ja jäännöshiilen palaminen voivat tapahtua olosuhteiden salliessa kaikki samalla kertaa. Silloin partikkelin pinta palaa, kun keskiosa on vielä kostea.

Palamisen ylläpito vaatii yhtä aikaa seuraavia asioita: palavan aineen, riittävän lämpötilan, happea ja katkeamattoman ketjureaktion. Palaminen pysähtyy, kun yksi näistä edellytyksistä poistetaan. Tähän perustuu myös tulipalon sammuttaminen. Polttolaitteissa palamisen säätötavoista tärkein on polttoaineen syötön säätäminen. Lisäksi polttoprosessiin voidaan vaikuttaa lämpötilan ja hapentuonnin säädöllä. (15, 139)(16)(17, 79)



Kuva 11. Palamisen vaiheet (17)

6.1 Alkulämpeneminen ja kuivuminen

Polttoainehiukkasen sisältämä vesi höyrystyy ympäröivän lämpötilan ollessa riittävän korkea. Palamisolosuhteissa kaasun lämpötila on korkea, jolloin vesi höyrystyy lähellä kiehumislämpötilaa. Hiukkasen lämpötilan nousu hidastuu hieman veden höyrystyessä. Tämän jälkeen lämpötila jatkaa nousuaan nopeammin kohti pyrolyysin alkamista. Veden höyrystymisen lisäksi polttoainepartikkelista haihtuu myös kaasuuntuvia komponentteja. (15, 142)(17, 83)

6.2 Syttyminen

Kiinteä polttoaine syttyy joko homogeenisesti tai heterogeenisesti. Heterogeenisessä syttymisessä kiinteä aine syttyy, minkä jälkeen liekki saattaa irrota polttoainehiukkasen pinnasta pyrolyysin voimistumisen myötä. Tällöin pyrolyysituotteet palavat hiukkasen ympärillä.

Homogeenisessä syttymisessä pyrolyysituotteet syttyvät hiukkasen ulkopuolella. Syttyminen voi tapahtua apuenergian avulla, jolloin lähellä oleva liekki tai apuenergia sytyttää hiukkasen tai siitä poistuvan pyrolyysikaasun. Vaihtoehtoisesti hiukkanen voi

syttyä, kun se lämpenee kuumassa ympäristössä. Ympäröivässä kaasussa on oltava happea, jotta polttoaine voi syttyä.

Syttymisprosessissa partikkeli lämpenee ympäröivän kaasun lämmön ja säteilyn vuoksi. Heterogeenisessä syttymisessä kiinteä aine reagoi vähitellen sen pinnalla olevan hapen kanssa synnyttäen lämpöä. Kun lämpötila ylittää rajan, jolloin lämmönkehitys ylittää lämpöhäviöt, nousee lämpötila nopeasti uuteen tasapainotilaan. Pienillä hiukkasilla kemiallisen kinetiikan vaikutus on suurempi, joten niiden syttymislämpötila on korkeampi kuin suurilla partikkeleilla.

Syttymisaikaan vaikuttavat hiukkaskoko, kaasun lämpötila ja happipitoisuus sekä polttoaineen tiheys, ominaislämpö, lämmönjohtavuus ja reaktiivisuus. Hiukkasen syttymisaika kasvaa hiukkaskoon kasvaessa. Säteilyn merkitys syttymiseen kasvaa hiukkaskoon kasvaessa ja kemiallisen kinetiikan merkitys kasvaa pienillä hiukkasilla. (15, 145)

6.3 Pyrolyysi

Pyrolyysissä kiinteä aine muuntuu lämmöntononin vuoksi kaasu- ja tervamaiseen muotoon. Pienten hiukkasten pyrolyysinopeutta rajoittaa palamisolosuhteissa kemiallinen kinetiikka. Suurilla partikkeleilla pyrolyysin nopeutta rajoittaa joko lämmönsiirto ympäristöstä partikkeliin tai tuotteiden aineensiirto pois partikkelista. Hiukkaskoolla 50–500 µm sekä kinetiikka että siirtoprosessit vaikuttavat pyrolyysiin. Kiinteästä polttoaineesta pyrolysoituvaa osuutta kutsutaan usein käytännössä haihtuviksi aineiksi. Pyrolyysin jälkeen jäävää kiinteää osuutta kutsutaan jäännöshiileksi. Puun jäännöshiiltä kutsutaan puuhiileksi.

Kiinteiden polttoaineiden jäännöshiilen palamista tai kaasuuntumista edeltää aina pyrolyysivaihe. Pyrolysoituvuus osuus riippuu polttoaineesta, loppulämpötilasta ja kuumennusnopeudesta. Puun massasta noin 80 %, mikä vastaa noin 50 % puun lämpöarvosta, vapautuu pyrolyysissä lämpötilan noustessa hitaasti 800–900 °C:een. Pyrolysoituvuus osuus kasvaa hiukkasen saavuttaman lämpötilan tai kuumennusnopeuden kasvaessa.

(15, 145-146)

6.4 Jäännöshiilen palaminen ja kaasutus

Pyrolyysistä jäljelle jääneen jäännöshiilen palaminen ja kaasuuntuminen eroaa pyrolyysistä, jota ylläpitää lämmönsiirto ympäristöstä polttoaineeseen. Jäännöshiilen palamisessa ja kaasuuntumisessa molekyylit reagoivat polttoaineen pinnalla ja sisäosissa homogeenisesti. Partikkelin korkea lämpötila nopeuttaa reaktiota. Palamisreaktioksi kutsutaan yleensä eksotermisiä ja kaasutusreaktioiksi endotermisiä reaktioita, mutta myös hapen reaktioita hiilen kanssa kutsutaan joskus kaasutusreaktioiksi.

Matalammissa palamislämpötiloissa happi absorboituu ympäröivistä kaasuista jäännöshiilen pintaan, jossa se hiilen kanssa reagoidessaan muodostaa hiilimonoksidia ja hiilidioksidia. Palamislämpötilan noustessa hapen osuus hiilen pinnassa laskee, jolloin tapahtuu reaktio, jossa hiilidioksidi muuttuu hiilimonoksidiksi. Myöhemmin siirtyessään runsashappiseen kaasuun hiilimonoksidi oksidoituu hapen vaikutuksesta hiilidioksidiksi.

Palamisen kannalta tärkeimmät kaasun ja kiinteän aineen väliset reaktiot ja niiden reaktioentalpiat Δh ovat:

Palamisreaktiot:



Kaasutusreaktiot:



Entalpiarvot ovat hiilen massaa kohden lämpötilassa 298,15 K (1 bar).

(7, 153-154)(17, 83)

7 KATTILAN LASKENNALLINEN TARKASTELU

7.1 Kattilan teho ja polttoaineen lämpöenergia

Lämpöteho Φ :

$$\Phi = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad [6]$$

missä

Q = lämpöenergia $[Q] = J$

t = aika

$[\Phi] = J/s = W$

Valitaan tarkasteltavaksi polttoaineeksi pelletti ja oletetaan polttoainepanoksen palavan kaksi tuntia. Tällöin 15 kW:n kattilan polttoaineen lämpöenergian on oltava

$$\Delta Q = \Phi \cdot \Delta t = 15 \frac{kJ}{s} \cdot 2 \cdot 3600 s = 108 MJ \quad [7]$$

Pelletin tehollinen lämpöarvo H kosteana (H_2O 10 %) on 17,1 MJ/kg. (18) Lasketaan polttoainepanoksen massa:

$$Q = H \cdot m_{pa} \quad [8]$$

$$m_{pa} = \frac{Q}{H} = \frac{108 MJ}{17,1 \frac{MJ}{kg}} = 6,316 kg \quad [9]$$

Pelletin tiheys ρ_{pa} irtokuutiolina on 650 kg/i-m³. (18) Polttoainepanoksen tilavuudeksi saadaan

$$V_{pa} = \frac{m_{pa}}{\rho_{pa}} = \frac{6,316 kg}{650 \frac{kg}{i-m^3}} = 0,00972 i-m^3 \approx 9,7 l \quad [10]$$

7.2 Palamisilma

Polttoaineen palamisen varmistamiseksi palamisprosessiin täytyy tuoda ylimääräistä ilmaa. Teoreettisessa palamisessa ilmakerroin $\lambda = 1$. Tarvittavalle palamisilmalle voidaan laskea ilmakerroin λ kaavalla

$$\lambda = 1 + \frac{V_{kuivask_{TEOR}}}{V_{ilma_{TEOR}}} \cdot \left(\frac{X_{O_2}}{21 - X_{O_2}} \right) \quad [11]$$

missä X_{O_2} on savukaasun happipitoisuuden prosenttiosuus.

Koska kaikkien polttoaineiden teoreettisen kuivan savukaasuvirran ja ilmvirran suhde on hyvin lähellä yhtä, saadaan ilmakertoimelle riittävän tarkka likiarvo kaavalla

$$\lambda = \frac{21}{21 - X_{O_2}} \quad [12]$$

Todellinen ilmamäärä saadaan kaavalla

$$V_{ilma_{TOD}} = V_{ilma_{TEOR}} \cdot \lambda \quad [13]$$

Palamisilman tilavuus polttoainekiloa kohti on

$$V_{i\ pa} = \frac{V_{ilma}}{m_{pa}} \quad [14]$$

Tilavuusvirran yhtälö on

$$\dot{V} = \frac{V}{t} \quad [15]$$

Kaavoista saadaan palamiseen tarvittava todellinen ilman tilavuusvirta:

$$\dot{V}_{ilma} = \frac{m_{pa} \cdot V_{i\ pa}}{t} \cdot \lambda \quad [16]$$

Puun palamisilman teoreettinen tarve ($\lambda = 1$) on 0 %:n kosteudessa $4,71 \text{ m}^3\text{n/kg}_{pa}$ ja 50 %:n kosteudessa $2,35 \text{ m}^3\text{n/kg}_{pa}$. (17) Pelletin 10 %:n kosteudessa ilmantarve on

$$V_{i10} = V_{i0} - \frac{V_{i0} - V_{i50}}{50} \cdot 10 = 4,71 \frac{\text{m}^3 \text{ n}}{\text{kg}_{pa}} - \frac{4,71 \frac{\text{m}^3 \text{ n}}{\text{kg}_{pa}} - 2,35 \frac{\text{m}^3 \text{ n}}{\text{kg}_{pa}}}{50} \cdot 10 = 4,238 \frac{\text{m}^3 \text{ n}}{\text{kg}_{pa}} \quad [17]$$

Valitaan savukaasun happipitoisuudeksi 10 %. Tällöin ilmakertoimeksi saadaan

$$\lambda = \frac{21}{21 - 10} \approx 1,9$$

Lasketaan palamisilman todellinen tilavuusvirta kaavalla 16:

$$\dot{V}_{ilma} = \frac{6,316 \text{ kg} \cdot 4,238 \frac{\text{m}^3 \text{ n}}{\text{kg}_{pa}}}{2 \cdot 3600 \text{ s}} \cdot 1,9 = 7,1 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3 \text{ n}}{\text{s}}$$

7.3 Savukaasut

Teoreettisen savukaasumäärän lisäksi savukaasussa on jäännöshappea syötetystä ylimääräisestä palamisilmasta. Savukaasujen määrä polttoainekiloa kohden saadaan kaavalla

$$V_{sk\ pa_{TOD}} = V_{sk\ pa_{TEOR}} + (\lambda - 1) \cdot V_{ilma_{TEOR}} \quad [18]$$

Savukaasun tilavuusvirta on

$$V'_{sk} = \frac{m_{pa} \cdot V_{sk\ pa_{TEOR}} + (\lambda - 1) \cdot m_{pa} \cdot V_{i\ pa}}{t} \quad [19]$$

Kostean savukaasun teoreettinen tilavuus polttoainekiloa kohti on $5,35 \text{ m}^3/\text{kg}_{pa}$, kun polttoaineen kosteus on 0 % ja $3,30 \text{ m}^3/\text{kg}_{pa}$ kosteudessa 50 %. (17)

Kosteaan savukaasuun sisältyy savukaasujen vesihöyry. Pelletin 10 %:n kosteudella savukaasun tilavuus polttoainekiloa kohti on

$$V_{sk10} = V_{sk0} - \frac{V_{sk0} - V_{sk50}}{50} \cdot 10 = 5,35 \frac{\text{m}^3 \text{ n}}{\text{kg}_{pa}} - \frac{5,35 \frac{\text{m}^3 \text{ n}}{\text{kg}_{pa}} - 3,30 \frac{\text{m}^3 \text{ n}}{\text{kg}_{pa}}}{50} \cdot 10 = 4,94 \frac{\text{m}^3 \text{ n}}{\text{kg}_{pa}}$$

Lasketaan savukaasun tilavuusvirta kaavalla 19:

$$V'_{sk} = \frac{6,316 \text{ kg} \cdot 4,94 \frac{\text{m}^3 \text{ n}}{\text{kg}_{pa}} + (1,9 - 1) \cdot 6,316 \text{ kg} \cdot 4,238 \frac{\text{m}^3 \text{ n}}{\text{kg}_{pa}}}{2 \cdot 3600 \text{ s}} = 7,7 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3 \text{ n}}{\text{s}}$$

Muutetaan saatu savukaasun tilavuusvirta ideaalikaasun tilanyhtälöllä palamislämpötilaan $1000 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$V_2 = \frac{V_1 \cdot T_2}{T_1} \quad [20]$$

jolloin

$$V_{sk1000} = \frac{V'_{sk} \cdot T_{sk1000}}{T_0} = \frac{7,7 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3 \text{ n}}{\text{s}} \cdot 1273 \text{ K}}{273 \text{ K}} = 0,036 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

7.4 Veto

Savuhormin aikaansaama alipaine lasketaan kaavalla

$$\Delta p = (\rho_i - \rho_{sk}) \cdot g \cdot h - \frac{1}{2} \cdot \rho_{sk} \cdot w_{sk}^2 \cdot \left(\lambda_{hormi} \cdot \frac{h}{d} + 1 \right) \quad [21]$$

missä

Δp = hormin kehittämä veto (alipaine), Pa

ρ_i = ilman tiheys, kg/m³

ρ_{sk} = savukaasun tiheys, kg/m³

h = hormin korkeus, m

w_{sk} = savukaasun nopeus, m/s

λ_{hormi} = kitkakerroin

d = hormin halkaisija, m

g = maan vetovoima, 9,81 m/s²

Kitkakerroin lasketaan yhtälöllä

$$\lambda_{hormi} = 0,3164 \cdot Re^{-0,25} \quad [22]$$

josta Reynoldsin luku saadaan kaavalla

$$Re = \frac{\rho_{sk} \cdot w_{sk} \cdot d}{\mu_{sk}} \quad [23]$$

missä μ_{sk} on savukaasun dynaaminen viskositeetti, Pa·s

Ilma-aukkojen aiheuttama sisäänvirtauksen painehäviö lasketaan kaavalla

$$\Delta p_i = \frac{1}{2} \cdot \rho_i \cdot w_i^2 \quad [24]$$

Kostean savukaasun tiheys polttoaineen kosteudella 0 % on 1,32 kg/m³n. Tiheys polttoaineen kosteudella 50 % on 1,22 kg/m³n. Savukaasun tiheys pelletin 10 %:n kosteudella on

$$\rho_{10} = \rho_0 - \frac{\rho_0 - \rho_{50}}{50} \cdot 10 = 1,32 \frac{kg}{m^3 n} - \frac{1,32 \frac{kg}{m^3 n} - 1,22 \frac{kg}{m^3 n}}{50} \cdot 10 = 1,3 \frac{kg}{m^3 n}$$

Savukaasun tilavuus muutetaan ideaalikaasun tilanyhtälöllä oletettuun kattilan jälkeiseen lämpötilaan 100 °C:

$$V_{sk100} = \frac{V_{sk0} \cdot T_{sk100}}{T_0} = \frac{1 \text{ m}^3 \cdot 373 \text{ K}}{273 \text{ K}} = 1,366 \text{ m}^3$$

mistä saadaan savukaasun tiheys 100 °C lämpötilassa

$$\rho_{sk100} = \frac{1,3 \text{ kg}}{1,366 \text{ m}^3} = 0,952 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Savukaasun tilavuusvirta 100 °C lämpötilassa on

$$V_{sk100} \cdot = \frac{V_{sk} \cdot T_{sk100}}{T_0} = \frac{7,7 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 373 \text{ K}}{273 \text{ K}} = 0,011 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Savuhormin poikkileikkausalaksi oletetaan ½ tiiltä, joka on

$$A_{hormi} = 0,13 \text{ m} \cdot 0,135 \text{ m} = 0,018 \text{ m}^2$$

Savukaasun nopeus 100 °C lämpötilassa on

$$w_{sk100} = \frac{V_{sk100} \cdot}{A_{hormi}} = \frac{0,011 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0,018 \text{ m}^2} = 0,588 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad [25]$$

Oletetaan hormi pyöreäksi putkeksi, jolloin sen halkaisijaksi saadaan

$$d = \sqrt{\frac{A_{hormi} \cdot 4}{\pi}} = \sqrt{\frac{0,018 \text{ m}^2 \cdot 4}{\pi}} = 0,1514 \text{ m}$$

Savukaasun dynaaminen viskositeetti μ_{sk} on 100 °C lämpötilassa $20,4 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (19).

Lasketaan Reynoldsin luku sileälle putkelle, jotta saadaan suuntaa antava arvo muita laskutoimituksia varten:

$$Re = \frac{\rho_{sk} \cdot w_{sk} \cdot d}{\mu_{sk}} = \frac{0,952 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,588 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,1514 \text{ m}}{20,4 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 4,153 \times 10^3$$

minkä avulla saadaan hormin kitkakerroin

$$\lambda_{hormi} = 0,3164 \cdot Re^{-0,25} = 0,3164 \cdot (4,153 \times 10^3)^{-0,25} = 0,039 \quad [26]$$

Ilman tiheys on normaalioloissa $1,293 \text{ kg/m}^3$. Hormin korkeudeksi oletetaan 5 metriä.

Saadut arvot sijoitetaan savuhormin alipaineen kaavaan 21:

$$\Delta p = \left(1,293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 0,952 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 5 \text{ m} - \frac{1}{2} \cdot 0,952 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(0,588 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 \cdot \left(0,039 \cdot \frac{5 \text{ m}}{0,1514 \text{ m}} + 1\right)$$

Tulokseksi hormin muodostamaksi alipaineeksi saadaan

$$\Delta p = 16 \text{ Pa}, \text{ kun Reynoldsin luku on laskettu sileälle putkelle.}$$

Kattilan ilma-aukkojen aiheuttaman sisäänvirtauksen painehäviön laskemiseksi tarvitaan ilmavirtauksen nopeus. Ilma-aukkojen yhteenlaskettu ala on $0,003978 \text{ m}^2$.

Ilman virtausnopeus aukoissa on

$$w_i = \frac{V_{\text{ilma}}}{A_i} = \frac{7,1 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0,003978 \text{ m}^2} = 1,792 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Lasketaan ilma-aukkojen aiheuttama painehäviö

$$\Delta p_i = \frac{1}{2} \cdot 1,293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(1,792 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 2 \text{ Pa}$$

Tästä voidaan todeta, että hormin veto ylittää ilma-aukkojen painehäviön reilusti.

Ilma-aukkoja on siis varaa kuristaa huomattavasti. Lisäksi on huomioitava vielä kattilan sisäiset painehäviöt, jotka aiheutuvat mutkista ja tulipesän ilmakehävistä.

7.5 Tulokset

Pellettipanoksen sisältämä lämpöenergia:

$$\Delta Q = 108 \text{ MJ}$$

Pellettipanoksen massa:

$$m_{pa} = 6,316 \text{ kg}$$

Pellettipanoksen tilavuus:

$$V_{pa} = 9,7 \text{ l}$$

Palamisilman tilavuusvirta normaaliolosuhteissa:

$$V_{\text{ilma}} = 7,1 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

1000 °C savukaasun tilavuusvirta:

$$V_{sk1000} \cdot = 0,036 \frac{m^3}{s}$$

100 °C savukaasun tilavuusvirta:

$$V_{sk100} \cdot = 0,011 \frac{m^3}{s}$$

5 metriä korkean ½ tiilen savuhormin aikaansaama alipaine savukaasun lämpötilalla 100 °C:

$$\Delta p = 16 Pa$$

8 KATTILAN TESTAUS

Kattila on mahdollista testata Kymenlaakson ammattikorkeakoulun päästömittauslaboratoriossa. Kattilan testipoltossa tulisi käyttää sekä klapia että pellettiä, koska palamisilma läpäisee ne eri tavalla pellettipanoksen ollessa tiiviimpi ja klapipanoksen harvempi. Näin ilman kulkeutumista voidaan arvioida paremmin.

Kattilaa tulisi testata myös useammalla primääri-, sekundääri- ja tertiääripalamisilmojen suhteella. Kattilan palamisilma jaetaan arinalle polttoaineen kaasuttamiseksi ja tulikanavaan, jossa pyrolyysikaasut syttyvät. Testaus tulisi suorittaa optimaalisen ilmanjaon löytämiseksi vähintään seuraavilla tulipesän ja tulikanavan palamisilman suhteilla:

- 1 osa arinalle ja 2 osaa tulikanavaan
- 1 osa arinalle ja 1 osa tulikanavaan
- 2 osaa arinalle ja 1 osa tulikanavaan

Palamisilmojen suhteita voidaan ohjata avaamalla ja kuristamalla kattilan ulkopuolella olevia ilmanottoaukkoja. Vedon ollessa liian kova tulee ilmanottoaukkoja kuristaa samassa suhteessa toisiinsa nähden. Lisäksi voidaan ohjata ilmanjakoa arinalle kattilan sisällä olevia ilmankanavia kuristamalla.

Tavoitteeksi kattilan hyötysuhteelle ja päästöarvoille tulisi ottaa vähintään ympäristöministeriön vuosina 2006–2008 valmistelemat pienpolton tehon ja päästöjen raja-arvot. Nämä rajat toissijaisen lämmitysjärjestelmän 15 kW kattilalle ovat:

- Hyötysuhde vähintään 74 %
- CO-pitoisuus kuivassa kaasussa (O₂ 10 %) enintään 5000 mg/m³n
- Kokonaishiilivetyjen (OGC, Organic Gaseous Compound) määrä kuivassa kaasussa (O₂ 10 %) enintään 150 mg/m³n
- Lisäksi hiukkaspäästöjen tulisi olla 50–200 mg/m³n (O₂ 13 %)

9 KATTILAN JATKOKEHITYS

Kattilan polttokokeiden tulokset määrittävät kattilan jatkokehitystarpeen. Päästöarvoja ja hyötysuhdetta voidaan yrittää parantaa tekemällä muutoksia ja lisäyksiä palamisilman jakoon sekä tehostamalla ilman ja palokaasujen sekoittumista. Savuhormin veto ylittäneen reilusti ilma-aukkojen niiden nykyisillä mitoilla aiheuttamat painehäviöt, joten aukkoja on varaa tarvittaessa pienentää. Lisäksi niihin voidaan suunnitella säädettävät luukut, joilla palamisilmansyöttöä ja palamista voidaan paremmin hallita. Mikäli kattilan hyötysuhde ja päästöarvot eivät näiden muutosten jälkeen vastaa tavoitteita, on syytä harkita kattilan muuttamista alapalokattilaksi.

10 YHTEENVETO

Tässä opinnäytetyössä suunniteltiin pientalomittakaavan monipolttoainekattila ja piirrettiin siitä 2D-rakennekuvat. Suunnittelua tuettiin laskemalla polttoaineen panoskoko, palamisilman ja savukaasun tilavuusvirtaukset sekä savupiipun veto ja ilmanottoaukkojen virtausvastus. Tuloksena oli kuvat alipainepolttoisesta yläpalokattilasta, jossa palaminen tapahtuu etupesäpoltinperiaatteella. Kattilassa käytettävät pääasialliset polttoaineet ovat klapi ja pelletti. Rakennekuvat ovat liikesalaisuus, joten niitä ei esitellä ulkopuolisille.

Kattilalle suoritetaan polttokokeet, joissa mitataan sen hyötysuhde ja päästöarvot. Polttokokeiden tulokset määrittävät kattilan jatkokehityssuunnan. Kattilan palamisilman jakoa ja ilman sekoittumista palokaasuihin voidaan edelleen parantaa. Mikäli tulokset jäävät edelleen huonoiksi, voidaan kattila muuttaa alapalokattilaksi. Tällöin päästöarvot ja hyötysuhde paranisivat, mutta monimutkaisempi rakenne olisi kalliimpi valmistajalle ja kuluttajalle. Tämä on otettava huomioon varsinkin siinä tapauksessa, että kattila on rakennuksen toissijainen lämmityslähde, koska lämmityksen kokonaiskustannus voi kohota liian korkeaksi. Muita jatkokehitystä

ohjaavia tekijöitä ovat eri lämmitysmuotojen hinnankehitys ja energiantuotannon poliittiset ohjauskeinot.

LÄHTEET

1. VTT Prosessit 2004. Energia suomessa. 3., täysin uudistettu painos. Helsinki: Edita Prima Oy
2. Ruokola, Pekka 2011. Pellettikattilan prototyypin kehittäminen tuotantoasteelle. Opinnäytetyö. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201104084057>. [Viitattu 31.1.2012]
3. Runtech Energy Oy. Saatavissa: <http://www.runtechenergy.fi/>. [Viitattu 9.1.2012]
4. Motiva Oy. Maalämpö. Saatavissa: http://www.motiva.fi/rakentaminen/lammitysjarjestelman_valinta/eri_lammitysmuodot/maalampo. [Viitattu 8.12.2011]
5. Valtion ympäristöhallinto. Pientalon energiankulutus ja päästöt. Saatavissa: <http://www.korjaustieto.fi/pientalot/pientalojen-energiatehokkuus/energiatehokkuus-pientaloissa/pientalon-energiankulutus-ja-paastot.html>. [Viitattu 8.12.2011]
6. Lappalainen, Iris 2007. Puupolttoaineiden pienkäyttö. Helsinki: Tekes
7. Vapo Oy. Kuva: Polttoaineiden hintakehitys. Saatavissa: http://www.vapo.fi/filebank/5289-pelletin_hintakehitys_052011.jpg. [Viitattu 15.1.2012]
8. Knuutila, Kirsi 2003. Puuenergia. Jyväskylä: Jyväskylän Teknologiatekniikka Oy
9. Bioenergian verkkotieto. Keskuslämmityskattilat. Saatavissa: http://www.bioenergia.fi/default/www/etusivu/tietoa_bioenergiasta/energiatuotannon_tekniikka/polttotekniikka_kiinteille_polttaineille/keskuslammityskattilat/. [Viitattu 29.12.2011]
10. Kuva yläpalokattilasta. Saatavissa: http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/pientalon_lammitys/yleiset_kuvat/ylapalokattila.gif. [Viitattu 15.1.2012]
11. Lapin ammattiopisto. Kuva alapalokattilasta. Saatavissa: http://www.raol.roiakk.fi/kt/rake/02-virt/lammitys/kattila_ap.jpg. [Viitattu 15.1.2012]
12. Mepu. Kuva stokeripolttimesta. Saatavissa: <http://www.mepu.fi/tuotteet/lammittimet/getfile.php?id=88>. [Viitattu 15.1.2012]

13. Valtion ympäristöhallinto. Pienhiukkaset kuriin. Saatavissa:
<http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=184030#a0>. [Viitattu 31.1.2012]
14. Kaivosoja, Terhi 2011. Hiukkasten päästömääräykset ja mittausmenetelmät puun pienpoltossa. Saatavissa: http://www.ketek.fi/oske/Analytiikkapaivat_Kaivosoja.pdf.
[Viitattu 15.1.2012]
15. Raiko, R., Kurki-Suomio, I., Saastamoinen, J. & Hupa, M. 1995. Poltto ja palaminen. Jyväskylä: Teknillisten Tieteiden Akatemia
16. Anttila, Kalle. Palofysiikka. Saatavissa: <http://www.tml.tkk.fi/Opinnot/T-110.5690/2005/Palofysiikka1.pdf>. [Viitattu 3.1.2012]
17. Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P. & Pakkanen, H. 2004. Höyrykattilatekniikka. 6., muuttamaton painos. Helsinki: Edita Prima Oy
18. HT Enerco Oy. Puupelletin tyypillisiä arvoja . Saatavissa:
<http://www.htenerco.fi/fi/bioenergialammitys/polttoainevertailu/?id=208>. [Viitattu 12.1.2012]
19. Pipe Flow Calculations. Flue gases properties table. Saatavissa:
<http://www.pipeflowcalculations.com/tables/flue-gas.php>. [Viitattu 12.1.2012]

Taulukko 4. 7 Puun (kuoren) ja mustalipeän polton kaasuvirrat ($\lambda=1$, ilman suht. kost. 0 %)

		Puu kosteus 50 %	Puu kosteus 0 %	Mustalipeä kosteus 40 %	Mustalipeä kosteus 20 %
Hapen- tarve	kmol/kgpa	0,0220	0,0441	0,0174	0,0232
	kg/kgpa	0,705	1,410	0,556	0,741
Ilman- tarve	kmol/kgpa	0,105	0,210	0,082	0,110
	m ³ n/kgpa	2,35	4,71	1,855	2,474
	kg/kgpa	3,04	6,09	2,399	3,199
Kosteaa savukaa- suvirta	kmol/kgpa	0,147	0,239	0,114	0,134
	m ³ n/kgpa	3,30	5,35	2,56	3,000
	kg/kgpa	4,03	7,06	3,13	3,840
Kuiva savukaa- suvirta	kmol/kgpa	0,104	0,208	0,0814	0,109
	m ³ n/kgpa	2,33	4,66	1,82	2,43
	kg/kgpa	3,25	6,51	2,54	3,38
Savu- kaasun molekyyli- paino kg/kmol	kosteat kaasut	27,4	29,5	27,4	28,6
	kuivat kaasut	31,2	31,2	31,1	31,1
Savu- kaasun mooliosuudet kosteat / kuivat	N ₂	0,565 0,800	0,696 0,800	0,573 0,806	0,653 0,806
		H ₂ O	0,293 0,0	0,129 0,0	0,288 0,0
	CO ₂	0,142 0,200	0,175 0,200	0,138 0,195	0,158 0,195
	SO ₂	0,0 0,0	0,0 0,0	0,0 0,0	0,0 0,0
Savu- kaasun tiheys kg/m ³ n	kosteat kaasut	1,22	1,32	1,39	1,39
	kuivat kaasut	1,40	1,40	1,22	1,28
CO ₂ maks mooliosuus	kosteat kaasut	0,142	0,175	0,138	0,158
	kuivat kaasut	0,200	0,200	0,195	0,195

Liite F Puulämmityslaitteiden päästöt ja hyötysuhteet – Määräykset ja ohjeet Suomessa vuonna 2008

Vaatimukset pääasiallisen lämmitysjärjestelmän lämmityskattilalle			
Mitattava suure ja sille asetettavat vaatimukset			
Nimellisteho (P), kW	CO-pitoisuus 10 % O ₂ kuivaa kaasua enintään mg/m ³ _n	OGC-pitoisuus 10 % O ₂ kuivaa kaasua enintään mg/m ³ _n	Hyötysuhde vähintään, %
P ≤ 50 kW	3 000	100	67 +6 log P
50 kW < P ≤ 150 kW	2 500	80	67 +6 log P
150 kW < P	1 200	80	67 +6 log P
Vaatimukset pääasiallisen lämmitysjärjestelmän tulisijalle (varaavat takat, pelletti- ja puukamiinat)			
Mitattava suure ja sille asetettavat vaatimukset			
Nimellisteho (P), kW	CO-pitoisuus 13 % O ₂ kuivaa kaasua enintään, % (vastaa 10 % O ₂ kuivaa kaasua mg/m ³ _n)	Hyötysuhde vähintään, %	
P ≤ 50 kW	0,17 (3 000)	70	
Vaatimukset toissijaisen lämmitysjärjestelmän lämmityskattilalle (yhdistelmäkattilat)			
Mitattava suure ja sille asetettavat vaatimukset			
Nimellisteho (P), kW	CO-pitoisuus 10 % O ₂ kuivaa kaasua enintään mg/m ³ _n	OGC-pitoisuus 10 % O ₂ kuivaa kaasua enintään mg/m ³ _n	Hyötysuhde vähintään, %
P ≤ 50 kW	5 000	150	67 +6 log P
50 kW < P ≤ 150 kW	2 500	100	67 +6 log P
150 kW < P	1 200	100	67 +6 log P
Vaatimukset toissijaisen lämmitysjärjestelmän tulisijalle (varaavat takat, leivinuunit, pelletti- ja puukamiinat, liesilämmittimet, takkasydämet, avotakat ja kotitalousliedet)			
Mitattava suure ja sille asetettavat vaatimukset			
Nimellisteho (P), kW	CO-pitoisuus 13 % O ₂ kuivaa kaasua enintään, % (vastaa 10 % O ₂ kuivaa kaasua mg/m ³ _n)	Hyötysuhde vähintään, %	
P ≤ 50 kW	0,3 (5 156)	70	
Vaatimukset saunan lämmitysjärjestelmän tulisijalle (kiukaat ja muuripadat)			
Mitattava suure ja sille asetettavat vaatimukset			
Nimellisteho (P), kW	CO-pitoisuus 13 % O ₂ kuivaa kaasua enintään, % (vastaa 10 % O ₂ kuivaa kaasua mg/m ³ _n)	Hyötysuhde vähintään, %	
P ≤ 50 kW	0,5 (5 156)	55	

Selityksiä taulukkoon: CO = hiilimonoksidi eli häkä
m³_n = normaalikuutiometri kaasua (lämpötila 0 °C ja paine 1 013 mbar)
OGC = kokonaishiilivetyjen määrä (Organic Gaseous Compound)
O₂ = savukaasun happipitoisuus kuivassa savukaasussa

Taulukko 10. Pellettien laatuvaatimukset eri maiden standardeissa

LÄHDE: EJA ALAKANGAS / VTT

Ominaisuus	Standardi	Arvo	Muita kommentteja
Mitat halkaisija, D, mm pituus, L, mm	Ruotsi SS 18710 Saksa DIN 51731 Itävalta ÖNORM M 7135 CEN/TS 14961	Laatu 1 < 4 × D, Laatu 2 < 5 × D Useita luokkia 4 ≤ D < 10, ≤ 5 × D 4 tai 5 × D	Pituus sidotaan halkaisijaan; halkaisija Keski-Euroopassa 6 mm ja Suomessa 8 mm
Kosteus saapumistilassa, paino-%	Ruotsi SS 18710 Saksa DIN 51731 Itävalta ÖNORM M 7135 CEN/TS 14961	Kaikilla alle 10 p-% M10 (alin luokka)	Pelletin kosteus on keskimäärin 8 %
Tuhkapitoisuus kuiva-aineesta, %	Ruotsi SS 18710 Saksa DIN 51731 Itävalta ÖNORM M 7135 CEN/TS 14961	≤ 0,7 % ≤ 1,5 % ≤ 0,5 % ≤ 0,7 % (alin luokka)	Kuoretomalla havupuulla päästään alle 0,5 %
Mekaaninen kestävyys, DU (%) tai hienoaineksen määrä, F (%)	Ruotsi SS 18710 Saksa DIN 51731 Itävalta ÖNORM M 7135 CEN/TS 14961	1,5 % (alle 3 mm) ei sanottu DU ≥ 97,7 % DU ≥ 97,5 % ja F < 1 % tai 2 % (< 3,15 mm)	Hienoaineksen määrä tuottajan varastossa Pellettejä, % (Lignotester) DU (CEN/TS 15210) ja hienoaines (CEN/TS 15149)
Irto- tai kiintotiheys, kg/irto-m ³ tai kg/kiinto-m ³	Ruotsi SS 18710 Saksa DIN 51731 Itävalta ÖNORM M 7135 CEN/TS 14961	kaksi luokkaa: ≥ 500 tai 600 kg/irto-m ³ 1 000 tai 1 400 kg/kiinto-m ³ 1 000 tai 1 400 kg/kiinto-m ³ useita luokkia	kiintotiheys luokkina, ei velvoittava
rikki (S), typpi (N), kloori (Cl), paino-% kuiva-aineesta	Ruotsi SS 18710 Saksa DIN 51731 Itävalta ÖNORM M 7135 CEN/TS 14961	S ≤ 0,08 %, Cl ≤ 0,03 % S ≤ 0,08 %, Cl ≤ 0,03 % S ≤ 0,04 %, Cl ≤ 0,02 %, N ≤ 0,03 % alimmat luokat S ≤ 0,05 %, Cl ≤ 0,03 %, N ≤ 0,3 %	myös useita muita kemiallisia aineita velvoittava kemiallisesti käsitellylle puulle; kotitalouden korkealaatuisille polttoaineille S0.05
Tehollinen lämpöarvo, q _{net,ar} MJ/kg (kWh/kg) saapumistilassa	Ruotsi SS 18710 Saksa DIN 51731 Itävalta ÖNORM M 7135 CEN/TS 14961	≥ 15,1 (4,2 kWh/kg) tai ≥ 16,9 (4,7 kWh/kg) 4,8–5,4 kWh/kg ≥ 18 (5 kWh/kg)	ei velvoittava; kotitalouden korkealaatuisille polttoaineille ≥ 16,9 (4,7 kWh/kg)
Lisäaineet	Ruotsi SS 18710 Saksa DIN 51731 Itävalta ÖNORM M 7135 CEN/TS 14961	< 2 % bioperäistä	pitoisuus ja tyyppi ilmoitettava ei mainintaa määrä ja tyyppi ilmoitettava; kotitalouden korkealaatuisille polttoaineille sama kuin ÖNORM