

Petri Anttila ja Mika Rönkkönen

VOIMALAITOKSEN POLTTOAINEEN SYÖTÖN OPTIMOINTI


Opinnäytetyö
Sähkövoimatekniikka

Syyskuu 2017




**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

KUVAILULEHTI

		Opinnäytetyön päivämäärä 7.9.2017
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu		Koulutusohjelma ja suuntautuminen Sähkövoimatekniikka YAMK
Tekijä(t) Petri Anttila ja Mika Rönkkönen		
Nimeke Voimalaitoksen polttoaineensyötön optimointi		
Tiivistelmä Opinnäytetyön tarkoituksena oli edistää työnantajamme Kouvo Automation Oy:n tuotteiden tuntemusta potentiaalisten asiakkaiden keskuudessa ja näyttää miten työnantajamme mittalaitteilla voimalaitosta pystytään ajamaan luotettavasti ja säästämään polttoainetta. Opinnäytetyössä kerrotaan mitä mittalaitteita työnantajamme toimittaa voimalaitoksille ja mikä on niiden toimintaperiaate. Opinnäytetyössä käy ilmi tämän päivän voimalaitosten toimintaperiaatteet ja niiden pääosat. Työssä on myös tarkasteltu polttoaineiden koostumusta ja ominaisuuksia polton kannalta sekä erilaisia polttoaineen syöttötapoja kattilaan.		
Voimalaitoksen polttoaineen syötön optimointiin liittyy olennaisena osana polttoaineen massavirtaus kattilaan, polttoaineen kosteusprosentti ja hapen syöttö kattilaan. Kouvo Automation Oy:n mittalaitteilla saadaan juuri nämä tärkeät asiat selville ja niiden avulla pystytään prosessia säätämään paremmaksi. Tarkoitus oli saada selville rahallinen vaikutus ja verrata sitä voimalaitokseen, josta löytyvät edellä mainitut optimointiin vaikuttavat mittaukset sellaiseen voimalaitokseen, josta mittauksia ei löydy. Ymmärrettävistä syistä asiakkaat eivät voi paljastaa aivan kaikkea tietoa kilpailullisista syistä ja suorita lukuja ei voi ilmoittaa.		
Tulokset kertovat, kuinka tärkeä on tietää polttoaineen kosteus ja miten se vaikuttaa kattilan hyötysuhteeseen. Rahallinen vaikutus on laskettavissa, mitä tarkemmin polttoaineen kosteus ja massavirtaus kattilaan tiedetään. Hapen säätö on olennainen osa kattilan toimintaa, ja polttoaineen kosteus näyttelee suurta osaa sen optimaalisessa säädössä. Näitä kolmea asiaa mittaamalla voimalaitos pystyy toimimaan säästäen polttoainetta. Ennen ei ole ollut luotettavasti toimivia polttoaineen reaaliaikaisia kosteusmittauksia, mutta Kouvo Automation Oy:n toimittama kosteusmittaus on osoittautunut luotettavaksi. Lisäksi monesta voimalaitoksesta puuttuu massavirtauksen mittaus, jossa myös Kouvo Automation Oy pystyy auttamaan.		
Asiasanat (avainsanat) voimalaitos, polttoaine, kosteusmittaus, happimittaus, radiometrinen mittaus, massavirtaus, kattila, optimointi		
Sivumäärä 108 + 15	Kieli suomi	URN
Huomautus (huomautukset liitteistä) Liite on energiatekniikan kurssilla tehty ryhmätö liittyen voimalaitos kattilan suunnitteluun perustuen eri ryhmille annettujen lähtötietojen perusteella, jotka olivat poltettavan polttoaineen kosteus ja suhde.		
Ohjaavan opettajan nimi Hannu Honkanen		Opinnäytetyön toimeksiantaja Kouvo Automation Oy

DESCRIPTION

		Date of the bachelor's thesis 7.9.2017
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu		
Author(s) Petri Anttila and Mika Rönkkönen	Degree programme and option Electrical power technology	
Name of the bachelor's thesis Optimizing the fuel supply of the power plant		
Abstract The purpose of the thesis is to promote the knowledge of our employer Kouvo Automation Oy's products among potential customers. The thesis also show how you can reliably drive power plant and save fuel with our employers measuring equipment. The thesis describes what measuring instruments our employer can supply to power plants and what is their operating principle. The thesis reflects the principles of today's power plants. The work has also looked at fuel composition and properties for combustion, as well as different fuel input methods for boiler. The fuel mass flow into the boiler, fuel moisture content and oxygen supply to the boiler is an essential part of the optimization of fuel supply in the power plant. Kouvo Automation Oy's measuring instruments make these important things clear and they make it possible to adjust the process better. The purpose was to find out the monetary impact and compare it to a power plant that has the above-mentioned optimization measurements in a power plant that don't have those. For understandable reasons, customers can not disclose just about all information for competitive reasons and direct figures cannot be reported. The results show how important it is to know the fuel moisture and how it affects the boiler efficiency. The monetary effect can be calculated as much as the fuel moisture and mass flow into the boiler is known. Oxygen control is an integral part of the boiler operation and the fuel moisture plays a large part in its optimum control. By measuring these three things, the power plant can operate to save fuel. There have been no reliable, real-time fuel moisture measurements before, but the moisture measurement provided by Kouvo Automation Oy has proven to be reliable. In addition, many power plants lack mass flow measurement, where Kouvo Automation Oy can also help.		
Subject headings, (keywords) power plant, fuel, moisture measurement, oxygen measurement, radiometric measurement, mass flow, boiler, optimization		
Pages 108 + 15	Language finnish	URN
Remarks, notes on appendices Appendix is a group work where we had to design a boiler based on different fuel mixes and moistures on different groups, which we made in our energy technology course.		
Tutor Hannu Honkanen	Bachelor's thesis assigned by Kouvo Automation Oy	

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	1
2	HÖYRYVOIMALAITOKSET	2
2.1	Toimintaperiaate	2
2.1.1	Lauhdutusvoimalaitos	3
2.1.2	Vastapainevoimalaitos	4
2.1.3	Kaasuturbiinivoimalaitos	5
2.1.4	Kombivoimalaitos.....	5
2.2	Kattilatyypit	6
2.2.1	Luonnonkiertokattila.....	6
2.2.2	Pakkokiertokattila	7
2.2.3	Läpivirtauskattila	9
2.3	Höyrykattilan lämmönsiirtimet.....	10
2.3.1	Keittoputkisto	11
2.3.2	Tulistimet	11
2.3.3	Syöttöveden esilämmitin (EKO, Ekonomaiser)	12
2.3.4	Ilmanesilämmitin (LUVO, Luftvorwärmer)	12
2.4	Tulipesäratkaisut	13
2.4.1	Ölly- ja maakaasukattilat.....	13
2.4.2	Pölypoltto	15
2.4.3	Arinapoltto.....	16
2.4.4	Leijukerrosoltto.....	18
3	RADIOMETRISET MITTALAITTEET	23
3.1	Tietoa säteilystä	24
3.1.1	Radiometrisen mittalaitteen rakenne	24
3.1.2	Umpilähteet	25
3.1.3	Gammasäteilylähteet.....	25
3.1.4	Säteilijänsuojus.....	26
3.2	Säteilyn ilmaisimet.....	27
3.2.1	Kaasutäytteiset ilmaisimet.....	28
3.2.2	Tuikeilmaisimet.....	30
3.3	Radiometrinen pintamittaus.....	31
3.3.1	Toimintaperiaate	32

3.3.2	Käyttökohteet	33
3.4	Radiometrinen massavirtausmittaus.....	33
3.4.1	Toimintaperiaate	34
3.4.2	Käyttökohteet	35
4	ONLINE-KOSTEUSMITTAUS.....	36
4.1	Toimintaperiaate	36
4.2	Käyttökohteet.....	39
5	HAPPIMITTAUS	40
5.1	Toimintaperiaate	41
6	VOIMALAITOKSEN POLTTOAINEET	42
6.1	Kiinteän biopolttoaineen kosteuden määrittäminen.....	43
6.2	Polttoaineen näytteenotto	44
6.3	Puu ja biomassa polttoaineena	47
6.3.1	Puun lämpöarvo	52
6.3.2	Kalorimetrinen lämpöarvo	53
6.3.3	Tehollinen lämpöarvo	53
6.3.4	Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa	54
6.3.5	Energiatiheys saapumistilassa	55
6.3.6	Toimitettu energiamäärä	55
6.4	Päästökertoimen laskeminen	56
6.5	Puun mineraaliaineet	56
6.6	Polttoaineiden ominaisuuksia	59
6.6.1	Puupolttoaineen kosteus.....	59
6.6.2	Puupolttoaineen tiheys	61
6.7	Hake ja murske	62
6.7.1	Hakkuutähteet.....	63
6.7.2	Kokopuu- ja rankahake	67
6.7.3	Kuori ja kannot	68
6.7.4	Sahapuru ja kutterinlastu.....	70
6.7.5	Puubriketti	70
6.7.6	Kierrätyspuu	70
6.8	Turve	72
6.8.1	Jyrsinturve	72
6.8.2	Palaturve.....	73

6.8.3	Turve polttoaineena	74
6.9	Lietteet.....	76
6.10	Kivihiili.....	79
6.11	Kierrätyspolttoaineet	81
7	POLTTOAINEOMINAISUUKSIEN VAIKUTUS POLTTOON.....	87
7.1	Polttoaineen aiheuttamat haasteet polttoprosessille	90
7.2	Turpeen/kivihiilen ja biopolttoaineen seospolttto.....	92
8	KATTILAN HYÖTYSUHDE.....	97
8.1	Suora menetelmä.....	98
8.2	Epäsuora menetelmä	99
8.2.1	Palamattomien kaasujen häviöt	100
8.2.2	Palamattomien kiintoaineiden häviöt.....	100
8.2.3	Savukaasujen terminen lämpöhäviö	100
8.2.4	Tuhkan mukana poistuva terminen lämpö	101
8.2.5	Säteilyhäviöt	101
9	POLTON OPTIMOINTI	101
10	YHTEENVETO	106
	LÄHTEET	108

LIITE

1 Höyrykattilan suunnittelu

1 JOHDANTO

Tämän työn tarkoituksena on tutkia kattiloiden polttoaineen syöttöä ja sen parantamista. Opinnäytetyön teemme potentiaalisia asiakkaita ja työnantajamme, Kouvo Automation Oy:tä varten. Kouvo Automation Oy toimittaa eri teollisuuden alojen käyttöön tarkoitettuja mittalaitteita. Palvelukokonaisuus muodostuu laite-edustuksista, laitesovellusten toimituksista, sekä käyttöönotosta, huollosta ja varaosatoimituksista. Yritys tarjoaa myös laite- ja säteilyturvakoulutusta. Kouvo Automation Oy kuuluu ruotsalaiseen, Tukholman pörssissä noteerattuun Addtech-konserniin.

Kouvo Automation Oy:llä on yli kolmenkymmen vuoden kokemus mittalaitteista. Yrityksen asiakkaita ovat voima- ja lämpölaitokset, sellutehtaat, öljynjalostamot, kemianteollisuuden yritykset, kaivokset ja suomalaiset laitostoimittajat ja konepajat.

Uusien laite-edustusten myötä heräsi kiinnostus tutkia tarkemmin polttoaineen syöttöä ja kattiloiden polttoprosessia. Vegan (ent. Ohmart) radiometriset mittalaitteet ovat kuuluneet yrityksemme edustamiin mittalaitteisiin jo 30 vuotta. Niiden avulla voidaan mitata voimalaitoksilla esimerkiksi polttoaineen pintaa silloista tai tasaustaskuista sekä polttoaineen massavirtoja. SWR-Engineeringin online-kosteusmittauksen edustus siirtyi Kouvo Automation Oy:lle noin viisi vuotta sitten. Polttoaineen kosteus on aina kiinnostanut voima- ja lämpölaitoksia, mutta siihen sopivaa online mittausta ei ole ollut. Lisäksi noin kaksi vuotta sitten yritys sai edustuksen Fujin mittalaitteille, johon kuuluu mm. happianalysaattorit.

Näiden mittausten avulla polttoaineen polttoprosessia pystytään hallitsemaan paremmin. Olemme selvittäneet ja nähneet monen voima – ja lämpölaitoksen mittauksia ja todenneet, että monissa laitoksissa ei ole käytössä massavirtausmittausta eikä kosteusmittausta, joiden avulla kattilaan menevää materiaalivirtaa voitaisiin seurata reaaliajassa. Kosteus saadaan yhden päivän viiveellä laboratoriotuloksista ja massavirta oletetaan ruuvin pyörimisen momentista monissa laitoksissa. Tulevaisuudessa jatkuvasti tiukentuvat päästönormit lisäävät näiden mittausten tarpeellisuutta.

Ideana on tutkia näiden mittausten tarpeellisuus biopolttoaineen poltossa ja mahdollisesti laskea näiden mittausten tuoma säästö polttolaitoksiin.

2 HÖYRYVOIMALAITOKSET

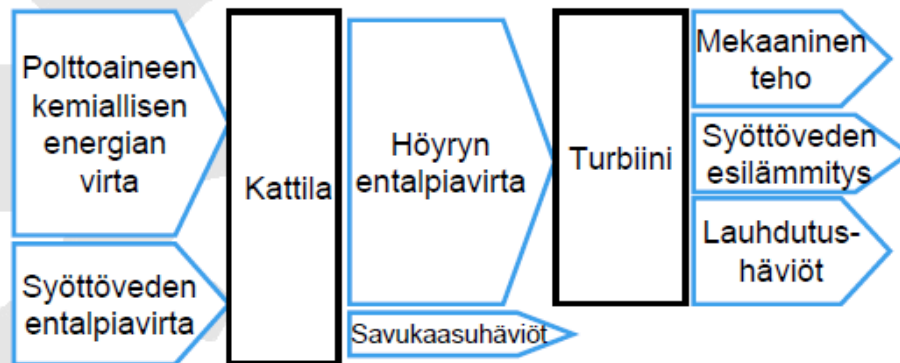
Höyryvoimalaitokset voidaan jakaa turbiinista ulos tulevan höyrynpaineen perusteella vastapainevoimalaitoksiin ja lauhdutusvoimalaitoksiin. Vastapainevoimalaitoksesta tulevaa höyryä voidaan käyttää lämmitystarkoituksiin siitä ulostulevan höyryn korkean paineen ja sen myötä höyryn korkean lauhtumislämpötilan takia. Näitä ovat esimerkiksi kaukolämpöä tai teollisuudelle höyryä ja sähköä tuottavat höyryvoimalaitokset. Vastapainevoimalaitoksen hyötysuhde voi olla jopa yli 90 %. Lauhdutusvoimalaitokset ovat tarkoitettu sähköntuotantoon niiden alhaisen höyryn paineen ja sen myötä alhaisen lauhtumislämpötilan takia. (Huhtinen ym. 2013, 12.) Lauhdutusvoimalaitoksien hyötysuhteet jäävät alle 45 %. Suomen paras lauhdevoimalan hyötysuhde 40 % on Meri-Porin hiililauhdevoimalassa (Perttula. 2000, 183).

”Höyry on erittäin suosittu lämmitysaine teollisuudessa prosesseja lämmitettäessä. Höyryn suosio perustuu siihen, että kun höyry lauhtuu vedeksi, lauhtuvaa höyrykiloa kohti vapautuu erittäin suuri määrä lämpöä lämpötilassa, joka riippuu tietyssä lauhtumistilassa vallitsevasta paineesta. Näin suuria lämpötehoja voidaan siirtää pienillä putkiko’oilla” (Huhtinen ym. 2013, 80.)

2.1 Toimintaperiaate

Höyrykattilan perusidea on muuttaa kattilaan syötetty vesi tulistetuksi höyryksi. Tulistettu höyry on tilanteen painetta vastaavaa höyrystymispistettä korkeammassa lämpötilassa. Tulistettua höyryä syntyy kuumentamalla kylläistä höyryä. Kylläinen höyry on kaasuuntunutta vettä kastepisteen lämpötilassa. Jäähdyttyään riittävästi tulistettu höyry muuttuu kylläiseksi höyryksi ja se edelleen lämpötilan laskiessa tiivistyy vedeksi. Tavanomaisessa lämpövoimaprozessissa muunnetaan polttoaineeseen sitoutunut kemiallinen energia lämpö- ja/tai sähköenergiaksi höyryprosessin avulla. Palamisprosessissa polttoaineesta vapautunut kemiallinen energia siirretään höyryyn lämpöenergiaksi. Höyryyn sitoutunut lämpöenergia muunnetaan mekaaniseksi energiaksi höyryturbiinissa ja generaattorissa se muunnetaan sähköenergiaksi (kuva 1). (Knowenergy, 2012.)

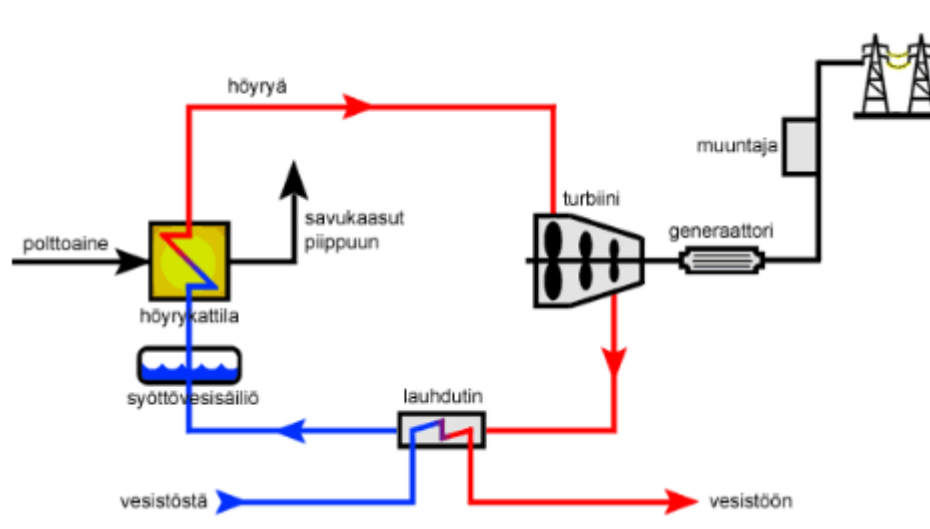
Energian siirtyminen voimalaitoksessa



KUVA 1. Energian siirtyminen voimalaitoksessa (Majanne ym. 2007, 17)

2.1.1 Lauhdutusvoimalaitos

Lauhdutusvoimalaitoksessa (kuva 2) höyry johdetaan turbiinin jälkeen mahdollisimman matalassa paineessa lauhduttimeen, jossa höyry muutetaan vedeksi eli lahteeksi ja vapautuva lämpö siirretään lauhduttimen jäähdytysveteen (Huhtinen ym. 2013, 89).



KUVA 2. Yksinkertaistettu lauhdutusvoimalaitoksen kaavio (Energiaverkko 2003)

Lauhdutusvoimalaitoksissa Suomessa pääpolttoaineena on hiili ja näitä voimalaitoksia on myös myöhemmin muutettu lämpöä tuottaviksi laitoksiksi, joita kutsutaan CHP (Combined Heat and Power) – laitoksiksi. Yksi on esimerkiksi Alholmens Kraft Pietarsaassa, jossa polttoaineen syötön massavirtaus kattilaan on toteutettu meidän yrityksen toimittamalla radiometrisillä vaaoilla. Lauhdutusvoimalaitoksissa halutaan käyttää korkeita tuorehöyryn paineita (180-240 bar), jotta sähköntuotannon hyötysuhde olisi mahdollisimman hyvä, siksi niissä käytetään läpivirtauskattiloita. (Huhtinen ym. 2013, 90.)

2.1.2 Vastapainevoimalaitos

Kaukolämpölaitokset ovat vastapainevoimalaitoksia, lisäksi teollisuudessa käytetään vastapainevoimalaitoksia, joista siis suuri osa höyrystä menee lämmitykseen tai teollisuudessa tarvittavan höyryn valmistukseen, mutta lisäksi sivutuotteena saadaan sähköä (kuva 3). Kaukolämpölaitos rakennetaan yleensä niin, että sen teho on 50 % kaukolämmön huipputehosta. (Huhtinen ym. 2013, 12.) Lämmönvaihtimien välityksellä lämpöenergiaa voidaan käyttää suoraan kattilasta tai turbiinin välitoista lämmitystarkoituksiin (kaukolämpö) tai prosessihöyryksi (Perttula. 2000, 183).



KUVA 3. Vastapainevoimalaitoksen periaatekaavio (Knowenergy 2012)

Vaikka vastapainevoimalaitoksen kokonaishyötysuhde on tuplata verrattuna lauhdutusvoimalaitokseen, niin sähköntuotannon hyötysuhde on huomattavasti alhaisempi. Tätä asiaa parantamaan useissa vastapainevoimalaitoksissa on nykyään käytössä lämpöakut, johon voidaan varastoida lämpöenergiaa, kun sähkönkulutus on suuri, mutta kaukolämmönkulutus pieni. Jos käytössä ei ole lämpöakkua, niin silloin ylimääräinen lämpö voidaan ohjata mereen tai järveen, jos mahdollista. (Perttula. 2000, 184.)

2.1.3 Kaasuturbiinivoimalaitos

Kaasuturbiinivoimalaitoksessa ei tarvita kattilaa tai muuta ulkoista lämmön lähdettä, sillä kaasuturbiini itse muuntaa polttoaineen energian lämmöksi ja muodostuneen lämmön mekaaniseksi energiaksi. Kaasuturbiiniprosessin hyötysuhde on parhaimmillaan 36 %. Avoimia kaasuturbiineja käytetään kuitenkin paljon varavoima- ja huippukuormalaitoksina, koska laitoksen investointikustannukset ovat alhaiset. (Huhtinen ym. 2013, 204-206.)

Suljetussa kaasuturbiiniprosessissa lämpö tuodaan järjestelmään ulkoa päin kuumentimella, ja niissä sama kaasu kiertää jatkuvasti järjestelmässä. Näin olleen suljetussa järjestelmässä voidaan käyttää polttoaineina myös kiinteitä polttoaineita, koska pakokaasut eivät näin ollen mene turbiinin läpi ja pääse likaamaan sitä. (Huhtinen ym. 2013, 207.)

Kokonaishyötysuhdetta on pystytty kasvattamaan kaasuturbiinivoimalaitoksessa noin 75 %:iin, kun pakokaasujen lämpöä otetaan talteen lämmön talteenottokattilassa. Tällaisia laitoksia voidaan käyttää jo peruskuormakäytössä. Lämmön talteenottokattilan avulla voidaan sitä hyödyntää myös kaukolämpöverkon vedenlämmittäjänä tai teollisuuslaitoksissa joissa tarvitaan kuumaa vettä tai höyryä. (Huhtinen ym. 2013, 208.)

2.1.4 Kombivoimalaitos

Kombivoimalaitoksella tarkoitetaan kaasuturbiini- ja höyryprosessin yhdistelmää. Esimerkiksi perinteisiin hiilivoimalaitoksiin verrattuna maakaasukombivoimalaitoksen sähköntuotannon hyötysuhde on lähes kaksinkertainen. (Perttula. 2000, 188.) Sähköntuo-

tannon hyötysuhde on höyryturbiinilla noin 40 %, kaasuturbiinilla noin 30 % ja kombi-prosessilla yli 50 %. Lämmön talteenottokattilassa käyttämällä useita eri painetasoja, saadaan sähköenergian osuutta lisättyä. (Huhtinen ym. 2013, 209.)

2.2 Kattilatyypit

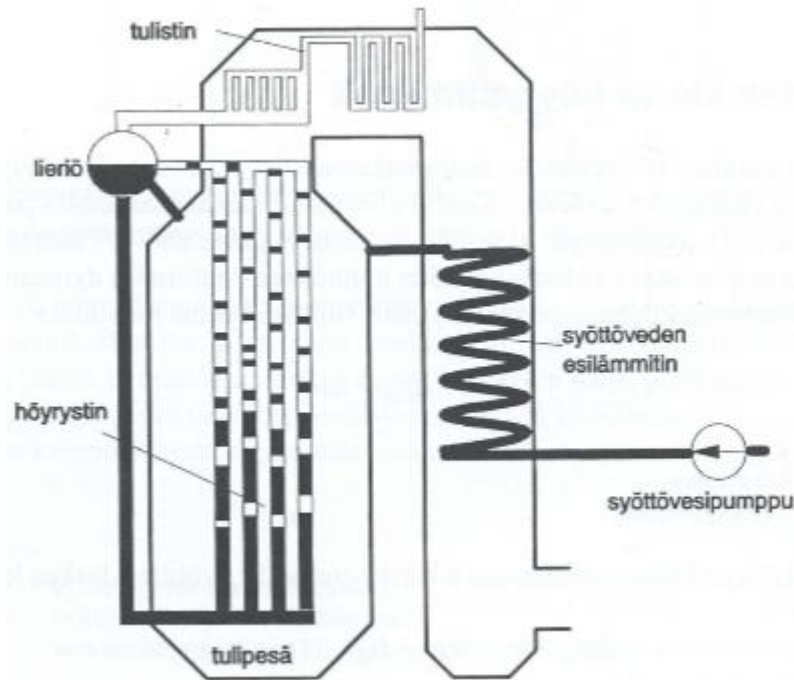
Käyttösovellutuksen mukaan käyttöpaine höyrykattiloissa vaihtelee nykyisin 1 baarin ja 240 baarin välillä ja paineen mukaan käytetään erityyppisiä vesihöyrypiirin ratkaisuja. Rakenteen mukaan kattilat jaetaan suurvesitilakattiloihin ja vesiputkikattiloihin. Kattiloiden ero on siinä, että suurvesitilakattiloissa vesi höyrystyy putkien ulkopuolella, kun taas vesiputkikattiloissa vesi höyrystyy putkien sisällä. Korkeille paineille sopii paremmin vesiputkikattila-rakenne ja siksi voimalaitoskattilat ovat niitä. Suurvesitilakattiloita käytetään teollisuudessa silloin, kun höyryä tarvitaan vain vähän, ettei sähköntuotanto näin ollen kannata. Vesiputkikattilat voidaan edelleen jakaa luonnonkierto-, pakkokierto- ja läpivirtauskattiloihin. Luonnonkiertokattilassa veden ja höyryn tiheyseron vaikutuksesta vesi ja höyry liikkuvat tulipesää ympäröivässä putkistossa. Kahdessa muussa vesiputkikattilamallissa tarvitaan pumppu muodostamaan paine, jonka vaikutuksesta vesi ja höyry kiertävät. (Huhtinen ym. 2000, 111.)

2.2.1 Luonnonkiertokattila

Kattilan keskeisiä osia ovat vedenesilämmitin, lieriö, höyrystin ja tulistin. Syöttövesi tuodaan syöttövesipumpun avulla syöttövesisäiliöstä, jonka jälkeen vesi johdetaan syöttöveden esilämmittimeen eli ekonomaiseriin, jossa vesi lämmitetään lähelle kylläistä lämpötilaa. Ekonomaiserin avulla saadaan kattilan hyötysuhdetta parannetuksi ja savukaasujen lämpötilaa laskettua. Lämmennyt syöttövesi johdetaan seuraavaksi lieriöön. Lieriössä kattilan höyrystinputkissa muodostunut kylläisen veden ja vesihöyrynseos erotetaan toisistaan ja höyry nousee lieriön yläosaan ja virtaa sieltä edelleen tulistimiin. (Huhtinen ym. 2000, 113.)

Höyrystymätön vesi ja uusi syöttövesi lähtevät lieriön laskuputkea pitkin uudelleen kiertoon tulipesää ympäröivien höyrystinputkien alapäähän josta seos palaa takaisin lieriöön. Osa vedestä jälleen höyrystyy ja osa jatkaa kiertokulkua uuden syöttöveden kanssa. Laskuputki ja höyrystinputkisto ovat yhtenäinen putkisto, jossa osa vedestä

höyrystyy tulipesässä vapautuvan lämmön ansiosta. Tiheyseroon perustuen höyrystinputkessa oleva vesi ja höyryn seos nousee ylöspäin lieriöön, kun laskuputkessa oleva kylläinen vesi raskaampana laskee alaspäin – näin saadaan aikaiseksi luonnollinen kierto (kuva 4) ja erillistä pumppua ei tarvita, mikä vähentää laitoksen omaa käyttötehon tarvetta. (Huhtinen ym. 2000, 113-114.)



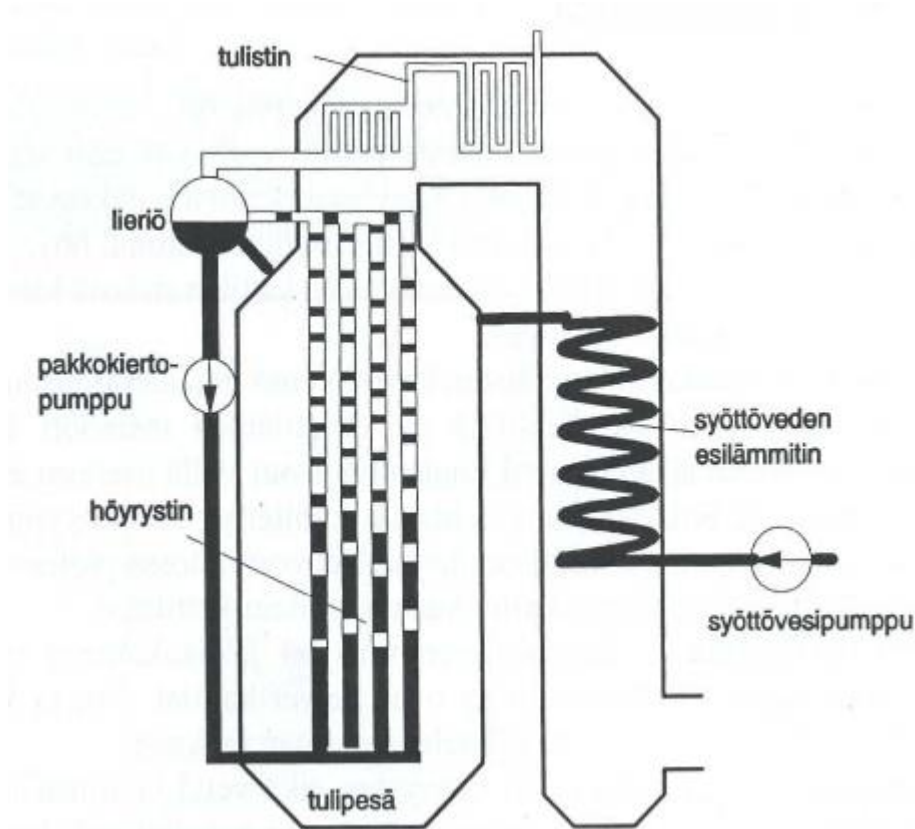
KUVA 4. Luonnonkiertokattilan vesihöyrypiiri (Huhtinen ym. 2000, 113)

Luonnonkiertokattilat eivät kuitenkaan sovellu hyvin korkeille höyrynpaineille, koska veden ja höyryn tiheysero pienenee paineen kasvaessa. Jotta luonnonkierto toimii, tulee tulistimesta ulostulevan tuorehöyryn paine olla käytännössä alle 170 baaria. 221 baarissa veden ja höyryn tiheys on yhtä suuri, joten luonnonkierto ei toimi. Lieriössä on myös ulospuhallus epäpuhtauksien poistamiseksi kattilavedestä, koska ne syövyttävät kattilaa. Lieriön ulospuhalluksen ansiosta epäpuhtauksien poisto on helppoa ja syöttöveden ei tarvitse olla niin täydellisesti käsiteltyä kuin läpivirtauskattiloissa joissa ei ole lieriötä. Luonnonkiertokattilat rakennetaan kapeiksi ja korkeiksi, että saadaan suurempi kiertovoima putkistoon. (Huhtinen ym. 2000, 114.)

2.2.2 Pakkokiertokattila

Pakkokiertokattilassa vesi syötetään syöttövesipumpulla vedenesilämmittimen kautta lieriöön samaan tapaan kuin luonnonkiertokattilassakin, mutta lieriöstä vesi johdetaan

pakkokierto-*pumppujen avulla höyrystimeen. Pumpun aikaansaaman paineen avulla veden ja höyrystyneen vesihöyryn seos virtaa takaisin lieriöön. Höyry johdetaan edelleen tulistimiin kuten luonnonkiertokattilassa. Fyysisesti pakkokierto-*pumppu on sijoitettava useita metrejä lieriön alapuolelle (kuva 5), koska lieriöstä tuleva kylläinen vesi ei saa höyrystyä pumpussa eli kavitoitua. (Huhtinen ym. 2000, 118.)**



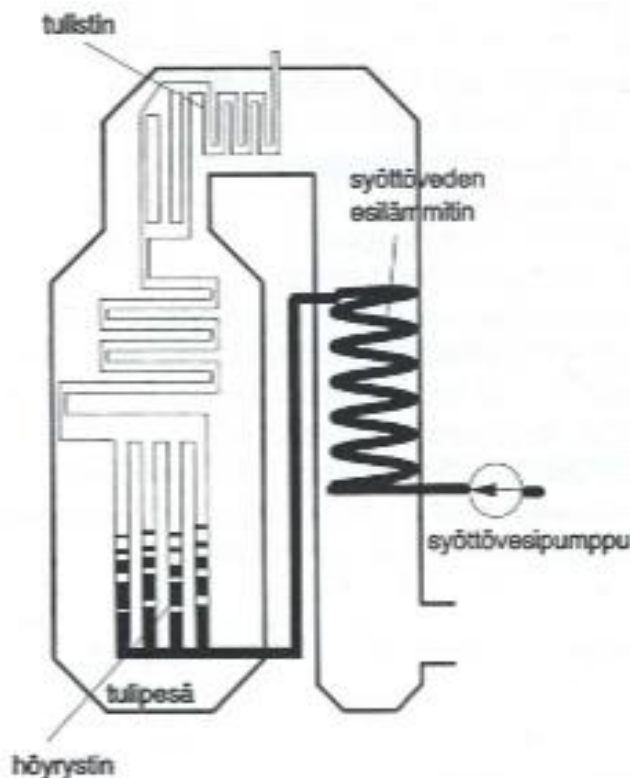
KUVA 5. Pakkokiertokattilan vesihöyrypiiri (Huhtinen ym. 2000, 119)

Luonnonkiertokattilaan verrattuna pakkokiertokattila sopii hieman korkeammille höyrynpaineille, mutta kuten mainittua paineen tulee olla alle kriittistä 221 baarin painetta alempana veden ja höyryn tiheyseron ylläpitämiseksi. Käytännössä tuorehöyryn paine on korkeimmillaan 190 baaria. Tarpeen mukaan pakkokiertokattilan höyrystinputkisto voidaan rakentaa mihin tahansa asentoon toimintaperiaatteen ansiosta ja mitoittaa suurempiin painehäviöihin kuin luonnonkiertokattilan putkisto. Laitoksen oma käyttötehon tarve kasvaa pakkokierto-*pumpun myötä ja se on tyypillisesti noin 0,5 % tuotetusta sähköstä pakkokierron aikaansaamiseksi. Kaasuturbiinien yhteyteen nykyisin rakennettavat lämmöntalteenottokattilat ovat yleensä pakkokiertokattiloita. (Huhtinen ym. 2000, 118-119.)*

2.2.3 Lämpivirtauskattila

Lämpivirtauskattiloita käytetään paineissa, joissa luonnonkierto ei enää toimi (> 160 bar). Vedenkierron kannalta se on kuin pitkä ulkopuolelta lämmitetty putki tai putkiryhmä, jonka toisesta päästä vesi syötetään sisään ja jonka toisesta päästä se tulistuneena höyrynä poistuu. (Huhtinen ym. 2013, 90.)

Lämpivirtauskattiloissa ei ole lieriötä eikä kattilan sisäistä kiertoa, joten kiertoluku on yksi. Lämpivirtauskattilat sopivat käyttöön, kun paineet ovat korkeat ja veden ja höyryn tiheydet ovat hyvin lähellä toisiaan, sillä niissä ei eroteta vettä ja höyryä toisistaan tiheyseron perusteella kuten luonnonkiertokattiloissa. Lämpivirtauskattiloita nimitetään kehittäjiensä mukaan Benson-, Sulzer- tai Ramsin-kattiloiksi. (Huhtinen ym. 2013, 91.)



KUVA 6. Benson-kattilan vesihöyrypiiri (Huhtinen ym. 2000, 124)

Lämpivirtauskattilat jaotellaan lisäksi höyrystymispisteen mukaan ja esimerkiksi Sulzer-kattiloissa höyrystymispiste on kiinteä, kun taas Benson-kattiloissa höyrystymispiste vaihtelee kuorman mukaan. Lämpivirtauskattilat vaativat puhtaampaa syöttövedtä kuin lieriökattilat sillä niissä ei ole ulospuhallusta epäpuhtauksien poistamiseksi ja kaikki vesi höyrystyy putkessa (kuva 6). Paineen suhteen lämpivirtauskattilat soveltuvat myös

ylikriittisiin paineisiin (> 221 baaria), koska vettä ja höyryä ei eroteta. Toisaalta suurten painehäviöiden takia syöttöveden pumppaus vaatii paljon tehoa ja pienen vesitilavuuden takia kattilan säätöautomaatiikan on oltava erittäin toimivaa. (Huhtinen ym. 2000, 120.)

2.3 Höyrykattilan lämmönsiirtimet

Kattilassa savukaasuilla lämpenevien lämmönsiirtimien tehtävä on mahdollisimman tehokkaasti siirtää lämpöenergia kattilan vesi-höyrykiertoon. Lämmönsiirtimien sijoittelulla on suuri merkitys kattilan suunnittelussa varsinkin materiaalien kestävyuden ja likaantuvuuden suhteen. Se vaikuttaa tietenkin myös tuorehöyryn ja savukaasujen lämpötilaan. Kattilan lämpötila voi olla tulipesässä noin $800\text{--}1300$ °C. (Huhtinen ym. 2000, 184-185.)

Jotta lämmönsiirrinmateriaalit kestäisivät lämpötilan, sijoitetaan keittoputkisto tulipesän ympärille. Tulipesästä savukaasut johdetaan tulistimiin. Höyryn lämpötila on tavallisesti $450\text{--}550$ °C, kun se lähtee tulistimista. Tulistettu höyry jäädyttää lämpöpintaa huomattavasti huonommin, joten tulistimet on sijoitettu tulipesän jälkeiseen savukaasukanavaan. Savukaasujen lämpötila on noin $600\text{--}800$ °C tulistimien jälkeen. (Huhtinen ym. 2000, 185.)

Hyvän hyötysuhteen saavuttamiseksi savukaasuja jäädytetään tässä vaiheessa kattilaan tuotavilla kylmäainevirroilla eli syöttövedellä ja palamisilmalla. Syöttöveden esilämmittimellä eli EKO:lla saadaan savukaasut jäähtymään noin $250\text{--}450$ °C. (Huhtinen ym. 2000, 195.)

Kattilan viimeiseksi lämmönsiirtimeksi on sijoitettu palamisilman esilämmitin eli LUVO. Siinä alarajan savukaasujen lämpötilalle asettaa ns. happokastepiste. Savukaasujen lämpötila pyritään pitämään polttoaineesta riippuen korkeampana kuin $100\text{--}160$ °C. Mikäli on vaarana, että savukaasujen loppulämpötila pyrkii laskemaan alle happokastepisteen, niin palamisilmaa lämmittämään voidaan käyttää myös höyrylämmitteistä palamisilman esilämmitintä eli höyryluvoa ennen savukaasulämmitteistä lämmönsiirrintä. (Huhtinen ym. 2000, 197.)

2.3.1 Keittoputkisto

Vesi höyrystyy syöttöveden esilämmittimestä tulevasta vedestä keittoputkistossa ja sijoittamalla putkisto eli höyrystin tulipesän ympärille saadaan kuumimpaan paikkaan hyvä jäähdytys. Nykyaikaisissa kattiloissa seinämärakenteet ovat ns. membraaniseiniä, joka rakennetaan hitsaamalla höyrystinputkien väliin teräslevyjä. Kattilat voidaan tukea joko altpäin tai ne voidaan ripustaa ylhäältä päin. Tukemistavan mukaan kattilat jaetaan alta tuettuihin ja ripustettuihin kattiloihin. Alta tuetussa kattilassa lämpölaajeneminen tapahtuu ylöspäin, kun taas ripustetussa kattilassa lämpölaajeneminen tapahtuu alaspäin. Nykyisissä membraaniseinäisiä kattiloissa pääosa lämmöstä siirtyy tulipesästä säteilemällä, siitä nimitys säteilykattila. Aiemmin käytetyillä muuratuilla tulipesillä varustetuissa kattiloissa pääosa lämmöstä siirtyi tulipesän jälkeen ns. konvektiolämmönsiirtimissä. Tulipesässä tapahtuva säteilylämmönsiirtyminen on huomattavasti tehokkaampaa kuin konvektiolämmönsiirtyminen. (Huhtinen ym. 2000, 186-188.)

2.3.2 Tulistimet

Nykyaikaisissa voimalaitoskattiloissa on aina tulistimet. Höyryturbiinista saadaan sitä enemmän liike-energiaa mitä kuumempaa höyry saadaan johdettua turbiiniin. Materiaalien rajoitusten vuoksi tulistuslämpötilat ovat maksimissaan noin 550 °C. Tulistimet sijoitetaan tulipesän yläosaan. Sijoitustavan mukaan ne voidaan jakaa säteily-, verho-, konvektio- ja yhdistelmätulistimiin. (Huhtinen ym. 2000, 188-189.)

Lämpöenergia siirtyy säteilytulistimiin pääosin liekeistä säteilemällä ja se sijoitetaan tulipesän yläosaan. Pahasti likaavien polttoaineiden kuten hiilen, turpeen ja erilaisten lietteiden kanssa käytetään pääsääntöisesti verhotulistimia. Ne toimivat säteilytulistimen periaatteella, mutta niiden lisäominaisuus on suojata jäljempää tulistimia savukaasujen epäpuhtauksilta. Yleisin tulistintyyppi on konvektiotulistin. Sitä ei saa sijoittaa suoraan liekkien säteilyyn vaan se sijaitsee tulipesän jälkeen syvemmillä savukaasukanavassa. Lisäksi on olemassa yhdistelmätulistimia, joissa ulkopuolinen osa putkista joutuu kosketuksiin liekkien säteilyn kanssa ja sisäpuolinen osa on kosketuksissa vain savukaasujen kanssa, koska putkiseinämät ovat niin tiheet. (Huhtinen ym. 2000, 189.)

Isoimmissa voimalaitoksissa voidaan myös tehostaa höyryturbiinin sähköntuottoa käyttämällä välitulistimia, joissa jo turbiinin läpi virrannut höyry johdetaan takaisin kattilaan. Kattiloihin sijoitetaan erityyppisiä tulistimia, koska säteilytulistimeen tuleva tulipesän säteily kasvaa hyvin vähän kattilan tehon noustessa ja tulevan höyryn lämpötila on korkeimmillaan pienillä tehoilla eli ominaiskäyrä on laskeva. Konvektiotulistin toimii päinvastoin eli tulistetun höyryn lämpötila nousee kattilan kuormituksen lisääntyessä ja ominaiskäyrä on nouseva. Yhdistelmätulistin on taas näiden kahden välimalli, jossa ominaiskäyrä on lievästi nouseva. (Huhtinen ym. 2000, 188-191.)

2.3.3 Syöttöveden esilämmitin (EKO, Ekonomaiser)

Savukaasujen lämpötilat ovat varsin korkeat tulistimien jälkeen ja hyötysuhdetta parantamaan on sijoitettu syöttöveden esilämmitin kattilan savukaasukanavaan. Syöttöveden esilämmittimet jaetaan höyrystämättömiin ja höyrystäviin esilämmittimiin toimintatansa mukaan. Veden lämpötilan tulee olla noin 20 °C alhaisempi kiehumispistettä höyrystämättömissä esilämmittimissä. Höyrystävissä esilämmittimissä osa syöttövedestä höyrysty loppuvaiheessa, kun se saavuttaa kiehumislämpötilan. Sähköntuotannon hyötysuhdetta parannetaan lämmittämällä syöttövedtä ja mitä isompi voimalaitos sen kuumemmaksi ja useammassa vaiheessa syöttövesi kannattaa lämmittää. Tulevan veden lämpötila on 100–250 °C esilämmittimeen ja sen avulla savukaasujen lämpötila saadaan laskemaan 250–450 °C. (Huhtinen ym. 2000, 194-195.)

2.3.4 Ilmanesilämmitin (LUVO, Luftvorwärmer)

Palamisilman lämpötila on 100–400 °C riippuen polttoaineesta ja polttotavasta. Palamisilman esilämmityksellä kuivataan polttoaineen kosteutta, tehostetaan polttoaineen syttymistä ja nopeutetaan palamista. Vaikka polttoaine olisi helposti syttyvää niin palamisilmaa esilämmitetään aina voimalaitoskattiloissa palamisen stabiilisuuden varmistamiseksi. Polttoaineen kosteusprosentin kasvaessa ja epähomogeenisuuden lisääntyessä palamisilman esilämmityksen tärkeys korostuu ja todella tärkeää se on kivihillen ja turpeen pölypoltossa ja teollisuuden jätepolttoaineiden arinapoltossa. Ilmanesilämmitin on viimeinen lämmönsiirrin savukaasukanavassa ja sen takia on vaarana, että savukaasujen lämpötila laskee alle happokastepisteen – tätä varten on kehitetty myös höyrylämmitteinen esilämmitin ns. höyryluvo. Savukaasujen lämpötila pyritään pitämään 100-150 asteessa ilmanesilämmittimen jälkeen riippuen polttoaineesta. Kaikkiaan vain

10 % savukaasuista talteen saatavasta energiavirrasta saadaan talteen ilmanesilämmitinissä, vaikka sen lämpöpinta saattaa käsittää yli puolet koko kattilan lämpöpinnasta. (Huhtinen ym. 2000, 196-201.)

2.4 Tulipesäratkaisut

Tulipesässä polttoaine palaa ja kemiallinen energia vapautuu lämpöenergiaksi. Polttoaineen pitää palaa mahdollisimman täydellisesti niin, että ilmaylimäärä jää mahdollisimman vähäiseksi ja palamisen hyötysuhde on hyvä. Palamistehoa on tämän takia pystyttävä säätämään, että polttolaitteessa palaminen tapahtuu tasaisesti ja halutun tehoisesti. Polttoaineiden erilaisista palamisominaisuuksista johtuen on kehitetty myös erilaisia polttolaitteita mm. erityyppiset polttimet nestemäisille, kaasumaisille ja kiinteästä polttoaineesta valmistetulle pölylle sekä kiinteille polttoaineille soveltuvat erityyppiset arinat että leijukerrosratkaisut. Vapautunut lämpöenergia siirtyy osittain tulipesää jäähdyttävään höyrystinputkistoon ja osittain kuumien savukaasujen mukana muihin kattilan osiin eli ensimmäisenä yleensä tulistimiin. Tilavuusrasituksen avulla voidaan kuvata kattilan tulipesän kokoa. Kattilaan tuotu polttoainevirta kerrotaan polttoaineen tehollisella lämpöarvolla mikä jaetaan tulipesän tilavuudella. Voimalaitoskattiloissa Suomessa ne ovat tavallisesti 100-500 kW/m³. Tilavuusrasitus kuvaa savukaasujen viiveaikaa tulipesässä. (Huhtinen ym. 2000, 126.)

2.4.1 Öljy- ja maakaasukattilat

Saman tyyppiset kattilat sopivat hyvin öljyä ja maakaasua poltettaessa. Molemmat polttoaineet eivät juurikaan sisällä kosteutta ja niistä muodostuu saman verran savukaasuja. Niitä voidaan polttaa saman tyyppisissä polttimissa ja täydellinen palaminen saadaan aikaan hyvin pienellä ilmaylimäärällä. Lisäksi molempien polttoaineiden tulipesän tilavuusrasitus on noin 300 kW/m³ eli kummallakin saadaan tiettyssä kattilassa sama höyryteho. Tulipesän puhdistustarve on vähäinen pienen tuhkapitoisuuden vuoksi ja näin ollen myös tulipesän pohja voi olla lähes vaakasuora. Polttimet voidaan sijoittaa kattilassa nurkkiin, vastakkain, pohjaan, kattoon tai etuseinään. Muut paitsi pohjapolto ovat yleisesti käytössä olevia ratkaisuja, ja jokaisessa mallissa on olemassa hyvät ja huonot puolet. Esimerkiksi kattopolto, joka on varsin yleisesti käytetty malli teollisuuden voimalaitoskattiloissa, tulipesästä voidaan tehdä kapea ja korkea mikä edesauttaa veden luonnonkiertoa höyrystinputkistossa, mutta toisaalta polttimet sijaitsevat kuumimmassa

paikassa eli ylhäällä katossa. Pohjapolton ongelma raskasta polttoöljyä poltettaessa on niiden likaantuminen. Vastakkais- ja nurkkapoltolla tulipesä saadaan ehkä parhaiten kuormittumaan tasaisesti ja lisäksi vastakkaiset toisiaan koskettavat liekit parantavat polttoaineen palamista reuna-alueilla. Etuseinäpoltto on edullisin ja helppohoitoisin ratkaisu, mutta se vaatii tarpeeksi syvän tulipesän, ettei vastakkainen seinä ylikuumene. Öljypolttimet jaetaan paine-, pyörivä- ja väliainehajotteisiin polttimiin. Väliainehajotteiset (höyry tai ilma) polttimet ovat yleisimpiä voimalaitoskattiloissa. Pyörivähajotteista poltinta käytetään lähinnä tulitorvi-tuliputkikattiloissa raskaan öljyn polttoon. Pienkattiloissa käytetään sekä kevyen että raskaan öljyn polttoon paineöljyhajotteisia polttimia. (Huhtinen ym. 2000, 127-129.)

Voimalaitosten poltossa yleensä käytetään höyryhajotteista poltinta sen takia, kun niillä saavutetaan hyvä palamistulos myös kaikkein raskaimmilla öljy-laaduilla ja korkeapaineista höyryä on aina saatavilla. Lisäksi poltin soveltuu esim. leijukerroskattilan kuormapolttimeksi, jota käytetään, jos kiinteä polttoaine on esimerkiksi liian kostea tai muun syyn takia, kun tulipesän lämpötila alkaa jostain syystä laskea. Lämpötilan lasku voi tapahtua esim. jossain nurkassa, ja silloin voidaan siinä lähellä oleva poltin ottaa käyttöön ja tasoittaa tulipesän lämpötilaa. Lisäksi höyryhajotteisia polttimia käytetään kiinteää polttoainetta käyttävien leijukerroskattiloiden käynnistyspolttimina, millä tulipesän lämpö nostetaan 400–600 °C, riippuen tietenkin kattilavalmistajan lämmitysohjeista, ennen kuin voidaan syöttää kiinteää polttoainetta kattilaan. Useat kiinteän polttoaineen ns. pölypolttimet, joihin kiinteä polttoaine syötetään hienoksi pölyksi jauhetuna, ovat yhdistelmäpolttimia, joilla voidaan polttaa siis sekä pölyä että öljyä, kun käytetään höyryhajotteista suutinta, ja ne voivat toimia kiinteän polttoaineen varmistavana tukipolttona. (Huhtinen ym. 2000, 134.)

Polttimissa voidaan käyttää myös esilämmitettyä ilmaa, jota saadaan useista voimalaitoksista löytyvän savukaasulämmitteisen ilman esilämmittimen avulla, jolla kattilan hyötysuhdetta voidaan parantaa, joka edistää polttimessa polttoaineen nopeampaa syttymistä ja täydellisempää palamista. Polttimen säätö on osa voimalaitoksen automaatiojärjestelmää. Isoissa höyrykattiloissa polttimia voi siis olla useita eri puolilla tulipesää ja höyryhajotteiset polttimet rakennetaan tehoalueelle 5-50 MW. (Huhtinen ym. 2000, 136.)

Tulevaisuudessa raskaan polttoöljyn käyttö PIPO-säädöksen johdosta lopettaa käytännössä kokonaan raskaan polttoöljyn käytön pienissä alle 50 MW:n laitoksissa 2018 mennessä eli laitokset ovat pyrkineet polttamaan raskasöljyvarastojaan kuluneen vuoden aikana tyhjäksi. Isommissa laitoksissa sähkösuodatin poistaa rikkidioksidia, joten niissä sen takia ei välttämättä tarvitse tehdä muutoksia. Tilalla voidaan onneksi käyttää kevyttä polttoöljyä. PIPO-säädös koskee siis 5-50 MW:n laitoksia. (Krabbe 2015.)

Maakaasupolttimena voimalaitoksissa käytetään yleensä suutinsekoituksella varustettuja ns. diffuusiopolttimia. Kevytöljypolttimet ovat rakenteeltaan samankaltaisia ja kaasu/öljy-yhdistelmäpoltin eli ns. drallipoltin eroaakin lähinnä kaasuputkiston osalta kevyt öljypolttimesta. Hyvän kaasun ja ilman sekoittumisen aikaansaamiseksi polttimessa on useita kaasusuuttimia. (Huhtinen ym. 2000, 139-141.)

2.4.2 Pölypoltto

Kiinteä hienoksi jauhettu polttoaine syötetään polttimien kautta tulipesään, jossa se palaa muutamassa sekunnissa. Suomessa pölypolttoa käytetään kivihiilen ja jyrsinturpeen poltossa. Nopea polttotapa mahdollistaa suurien lämpötehojen tuomisen tulipesään. Pölypoltossa ideana on polttoaineen nopea ja täydellinen palaminen, siksi polttoaine on jauhettava kyllin hienoksi, että se ehtii palaa sinä aikana, jonka se viipyy tulipesässä. Palamisilman esilämmityksellä varmistetaan polttoaineen syttyminen ja palaminen. (Huhtinen ym. 2013, 93.)

Polttimet voivat olla sijoitettu kattilan nurkkiin, etuseinällä tai vastakkaisille seinämille. Pölypoltto yleensä kannattaa vasta, kun kattilateho on tarpeeksi suuri esikäsitteilylaitteiden vuoksi, mutta periaatteessa polttotapa sopii kaikenkokoisille kattiloille. Suomessa pölypolttokattiloita ovat pääsääntöisesti isoimpien kiinteitä polttoaineita polttavien voimalaitosten kattilat. Polttimeen tuodaan kantokaasun, normaalisti ilman avulla, jauhimesta tai kuivaimesta polttoaine. Poltin sekoittaa ilman ja polttoaineen (ns. drallipoltin) ja se syttyy palamaan tulipesän lämmön vaikutuksesta. Polttimessa on lisäksi tukipoltin, jota tarvitaan usein jyrsinturvetta poltettaessa sen laadun vaihtelun vuoksi. Poltinmalleja on erilaisia ja nurkkapolttimissa polttoaine ja ilma tuodaan omia kanavia pitkin tulipesään eli niitä ei sekoiteta polttimessa. Tämä soveltuu turpeen ja ruskohiilen polttoon, ja Suomessa sitä käytetään paljon kaasuhiilen polttoon. (Huhtinen ym. 2000, 141-142.)

Low-nox-polttimissa, kuten nimikin jo kertoo, pyritään vähentämään NO_x-päästöjä. Siihen päästään vaiheistetulla poltolla ja siinä palamisilma tuodaan kolmessa tai jopa neljässä vaiheessa liekkiin (primääri-, sekundääri- ja tertiääri-ilmana). Low-nox-polttimen päästöt ovat n.130 mg/MJ, kun drallipolttimella se on n. 450 mg/MJ ja nurkkapolttimella n. 230 mg/MJ. (Huhtinen ym. 2000, 143.)

Pölypoltossa polttoaineen tuhka jakaantuu lentotuhkaksi ja pohjatuhkaksi. Lentotuhka menee savukaasujen mukana ja suurin osa siitä kulkeutuu edelleen lentotuhkasiilon, joissa meillä on tyypillisesti punnitusmittauksia. Lentotuhkan osuus on noin 80-90 % tuhkasta ja loput putoavat tulipesän pohjalle pohjatuhkana. Tulipesän pohja on tyypillisesti kivihiiltä polttavissa voimalaitoksissa supilon muotoinen, jota pitkin pohjatuhka valuu edelleen tuhkansammutusaltaaseen, josta se siirretään kolakuljettimilla talteen. Tällöistä tulipesää kutsutaan kuivapesäksi joita kaikki Suomen voimalaitokset pääasiassa ovat. Sulapesässä lämpötila pidetään niin korkeana, että tuhka sulaa ja niissä tuhka saadaan lähes kokonaan poistettua jo tulipesässä, kun kuivapesässä suurin osa tuhkasta poistetaan vasta sähkösuotimessa lentotuhkana mikä likaa savukaasukanavia ja mittalaitteita siellä herkemmin. Toisaalta sulapesän NO_x-päästöt ovat suuremmat ja niitä on käytössä pääasiassa Keski-Euroopassa. Jyrsinturvetta polttaviin pölynpolttovoimalaitoksiin on saatettu lisäksi vielä rakentaa jälkipolttoarina kattilan pohjalle, jossa poltetaan turpeen seassa olevat suuret ja pidemmän palamisajan vaativat, huonosti jauhautuvat puukuidut. Pölypolttokattiloiden tilavuusrasitus on noin 100-150 kW/m³ ja se on jonkin verran pienempi kuin öljy- ja maakaasukattiloissa. (Huhtinen ym. 2000, 144-145.)

2.4.3 Arinapoltto

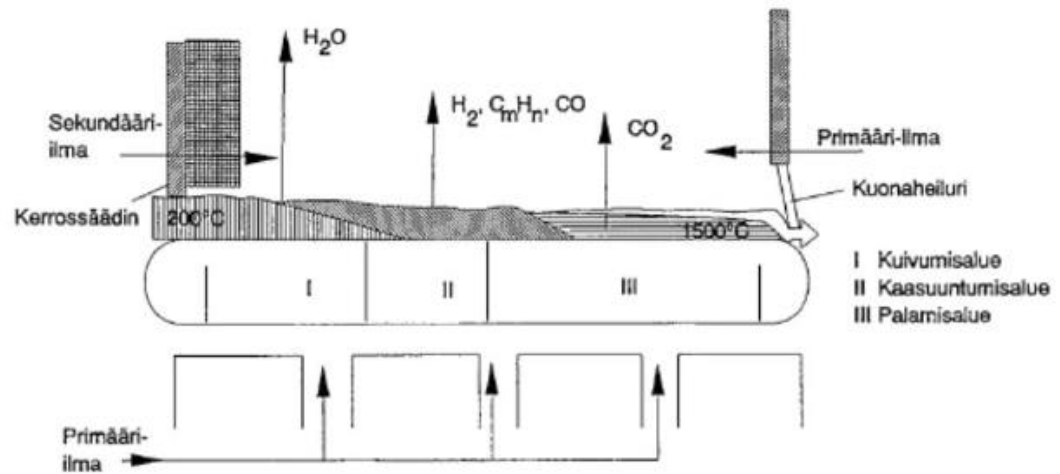
Arinapoltossa polttoaine käsitellään tarvittaessa murskaamalla se polttoon soveltuvaan muotoon. Mahdollisen murskaamisen jälkeen polttoaine levitetään paikallaan olevalle tai liikkuvalla arinalle. Kiinteille polttoaineille kehitetty arinapoltto on vanhin höyrykattiloiden polttotapa ja ajan saatossa siitä onkin kehitetty lukuisia eritehoisia ja erityyppisten polttoaineiden polttoon sopivia ratkaisuja. Ainoastaan teollisuuden jätelietteiden polttoon arinat eivät sovi lietteen suuren tuhkapitoisuuden vuoksi. Arinakattiloita rakennetaan enää alle 10 MW:n laitoksiin, sillä erilaiset leijukerroskattilat ovat vallanneet alaa arina- ja pölypolttokattiloiden välimaastosta. (Huhtinen ym. 2000, 146-147.)

Pientehoiisiin kattiloihin sopii kiinteät taso-, viisto- ja porrassarinat. Mekaanisia arinoita ja automaattista polttoaineen syöttöä sekä tuhkanpoistoa käytetään isommissa kattiloissa. Kiinteä tasoarina on yksinkertaisin arinaratkaisu ja se koostuu arinasauvoista joiden väliin jää rako josta ilma virtaa arinan läpi polttoainekerroksen sekaan – polttoaine syötetään käsin. Painovoiman vaikutuksesta polttoaine saadaan kulkemaan tulipesään viisto- tai porrassarinoissa, joissa arina on tyypillisesti 30-50 asteen kulmassa vaakatasosta riippuen polttoaineesta ja sen juoksevuudesta. Palamisilma virtaa polttoaineseokseen muotoiltujen arinautojen välistä. Tämä arinamalli on yleinen puun ja puujätteen poltossa, ja polttoaine valuu syöttösiiloista siis omavoimaisesti aina sitä mukaa, kuin arina tyhjenee. (Huhtinen ym. 2000, 147-148.)

Hiilen polttoon erityisesti tarkoitettu mekaaninen ketjuarina, jossa kahden ketjun väliin on sijoitettu ketjuissa kiinni olevat arinaraudat tuovat polttoaineen tasaisen paksuisena mattona tulipesään. Ketjun tullessa kääntötelan luo palanut polttoaine, tuhka ja kuona putoavat kuonasuppiloon. Palamisilma eli arinan läpi puhallettava primääri-ilma tuodaan arinan alle useita ilmanjakokanavia pitkin ja säätöpeltien avulla säädetään eri kohtiin johdettavaa palamisilman määrää polttoaineiden tai osakuormien tarpeen mukaan. Suoraan liekkiin arinan yläpuolelle puhalletaan sekundääri-ilmaa tarpeen mukaan. (Huhtinen ym. 2000, 149-150.)

Kosteiden polttoaineiden, kuten turpeen tai puun, polttoon tarkoitettu mekaaninen viistoarina rakennetaan vähemmän kaltevaksi kuin kiinteät mallit. Siinä polttoainepatjaa liikuttaa arinautojen liike tai värinä. Huonolaatuista ja epähomogeenistä polttoainetta, kuten yhdyskuntajätettä, poltettaessa voidaan käyttää ns. valssiarinaa, joka muodostuu sylinterinmuotoisista pyörivistä valsseista. Pyörimisliikkeen avulla valssit sekoittavat polttoaineen tehokkaasti, mikä edesauttaa palamista. (Huhtinen ym. 2000, 150-151.)

Arinapolton periaatetta voidaan kuvata kolmella vyöhykkeellä, jotka ovat polttoaineen lämmitys- ja kuivausvyöhyke, kaasuuntuvan polttoaineen vyöhyke ja kiinteän polttoaineen palamisvyöhyke. Arinapolton periaatekuva (kuva 7) on mekaanisesta ketjuarinasta, jossa polttoaine syötetään vasemmalta puolelta ja oikealta puolelta poistuu tuhka.



KUVA 7. Arinapolton periaate (Huhtinen ym. 2000, 152).

Kuivumisalueella polttoaine kuivuu ja samalla lämpenee syttymislämpötilaan. Mitä kosteampi polttoaine, sitä suurempi energiankulutus, joten tasalaatuinen polttoaine on merkittävä asia arinapoltossa prosessin hallinnan suhteen. Kosteus rajoittaa arinatehoa. Polttoaineen kuivumisen ja lämpenemisen jälkeen se alkaa kaasuuntua. Polttoaineen lämpötilan edelleen noustessa se alkaa kaasuuntua ilman ulkopuolista energiaa eli palaa. Kun kaasuuntuvat komponentit syttyvät palamaan, niiden luovuttama lämpö sytyttää lopulta myös lopun kiinteämmän polttoaineen palamaan palamisalueella. (Huhtinen ym. 2000, 152-153.)

2.4.4 Leijukerros poltto

Leijukerros poltto on yleistynyt laajasti viime vuosikymmeninä, koska se mahdollistaa eri polttoaineiden polton samassa kattilassa hyvällä palamishyötysuhteella. Energiantuotannossa sitä on ruvettu soveltamaan vasta 1970-luvulla. Idea on peräisin Suomesta Ahlströmin Varkauden konepajan höyrykattilaosastolta, jossa alun perin rakennettiin laivojen höyrykattiloita. 1960-luvun alussa alettiin leijupetikattiloiden valmistus päästövaatimusten tiukentuessa jo silloin. Lopulta 1969 perustetun Karhulan laboratorion tutkimusosaston työ johti siihen, että 1970-luvun lopulla syntyi taloudellinen ja ympäristöystävällinen kiertopetiteknikkaan perustuva Pyroflow-kattila (kuva 8). Ensimmäinen Pyroflow-kattila asennettiin Pihlavan kuitulevytehtaan vanhan höyrykattilan yhteyteen 1979. Samana vuonna asennettiin Pyroflow-kattila Kauttuan lämpövoimalaan, jossa on meidän yrityksen toimittamia radiometrisiä mittauksia, mm. polttoaineen mas-

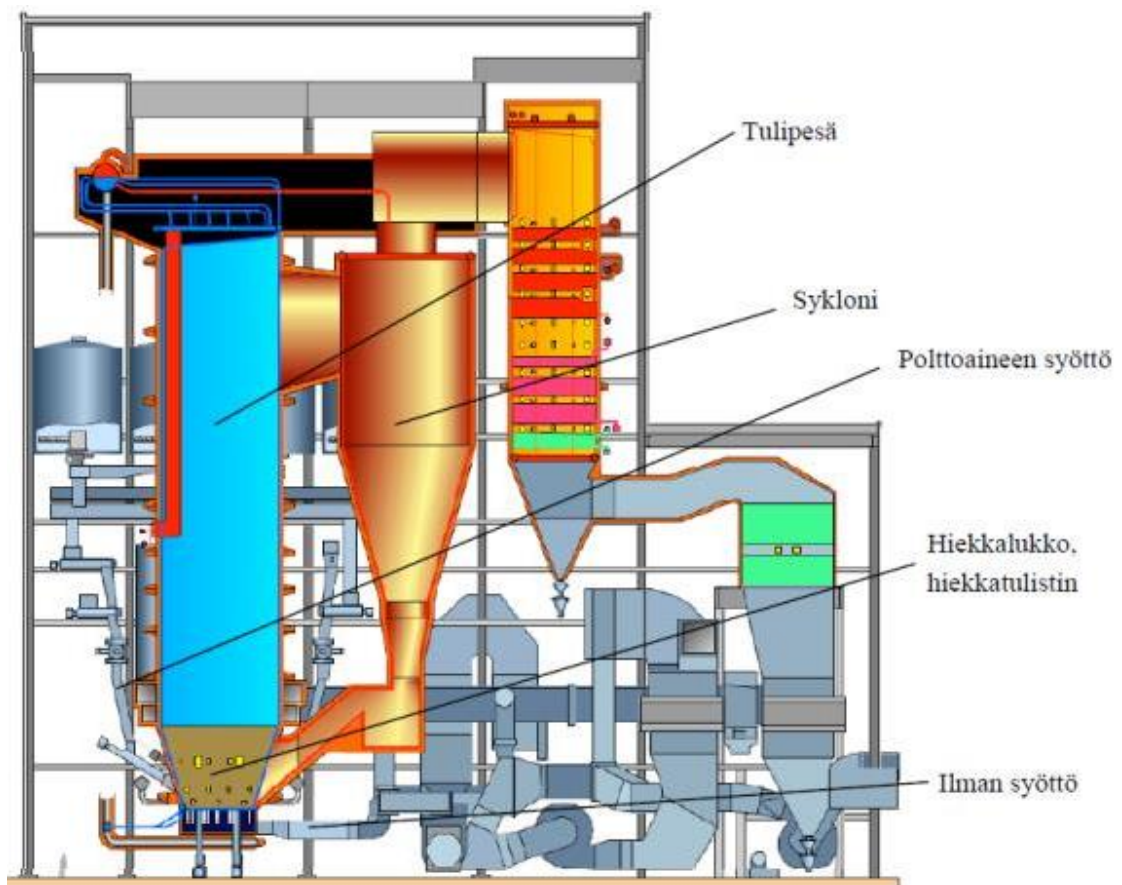
savirtauksen mittaus kolakuljettimesta. Yhdysvaltain markkinoilla ilmestyneen kiinnostuksen johdosta Ahlström perusti yhdessä Gulf- ja Shell-yhtiöiden kanssa Pyropower Inc yrityksen Yhdysvaltoihin 1980. Ahlström sai lukuisia ympäristöpalkintoja mm. Yhdysvalloissa ja laajensi kattiloiden valmistuksesta laitosten kokonaistoimituksiin. Lopulta 1989 erotettiin kasvanut energiateknologia-ala Ahlströmin muusta toiminnasta omaksi liiketoimintadivisioonaksi Ahlström Pyropoweriksi. Vuonna 1989 divisioonan johto ja kehityskeskus olivat Yhdysvalloissa ja toinen kehityskeskus Japanissa. Karhulassa oli tutkimusosasto, joka keskittyi jo kaasutukseen perustuvaan kattilaan. Tuotannon hoitivat Varkauden höyrykattilatehdas ja alihankkijat. Lopulta vuonna 1995 Ahlström myi Pyropower yhtiönsä Yhdysvaltalaiselle energiateknologiyhtiölle Foster Wheelerille, joka on meidän tärkeä asiakas tänä päivänä. (Jääskeläinen & Lovio, 2003, 23-40.)

Leijukerrospoltoissa käytetään alhaista palamislämpötilaa (n. 800-900-astetta) mikä pienentää typenoksidipäästöjä sekä rikin puhdistus on tässä tekniikassa edullista syöttämällä kalkkia suoraan tulipesään. Tässä tekniikassa kattilan pohjassa on suuttimet, joista puhalletaan ilmaa, mikä saa hiekan leijumaan kattilan pohjalla (kupliva leijukeros eli leijupeti) ja tässä hiekkapedissä polttoaine palaa. Jos hiekkaa puhalletaan niin kovaa, että se vie hiekkaa ja polttoainetta mennessään, puhutaan kiertoleijukattilasta eli kiertopetikattilasta. (Huhtinen ym. 2000, 153-155.)

Leijupetikattiloissa käytetty hiekka ei ole niin hienojakoista kuin kiertoleijukattilassa ja lisäksi leijutusnopeus on siis pienempi, koska tarkoitus on pitää pohjalla kupliva peti, jossa polttoaine palaa. Petin korkeus on noin 0,4 – 0,8 metriä ja hiekan laatu on tärkeä tekijä polton tasalaatuisuuden vuoksi. Polttoaineen sulkusyöttimen kautta polttoaine pudotetaan leijupetiin pudotusputken kautta. Näissä voidaan käyttää radiometrisiä mittalaitteita tukosvahteina. Yleensä pudotusputkia on useita kattilan vastakkaisilla seinämällä, jotta polttoaine saadaan jakaantumaan tasaisesti koko petin alueelle - tyypillisesti 2-4 kappaletta yhdellä seinämällä.

Pudotusputkiin polttoaine syötetään yleensä ruuvikuljettimilla, mistä voidaan radiometrisellä vaa'alla mitata massavirtaus. Tämän avulla lämpötilan säätäminen kattilan eri seinämällä on helpompaa, ja näin ei pääse syntymään vinokuormia kattilaan. Ruuvikuljettimille polttoaine tuodaan tyypillisesti kolakuljettimella, jossa voi myös olla massa-

virtaus mittausta, mistä nähdään, että molempien seinämien massavirtaus on tasapainossa. Yhdellä seinämällä voi olla esim. neljä pudotusputkea eli silloin on myös neljä ruuvikuljetinta ja tällöin viimeiselle ruuvikuljettimelle polttoainetta ei välttämättä riitä varsinkin, kun ajetaan pienellä teholla. Tähän ratkaisuksi on tehty viimeisen ruuvin yläpuolelle tasaustasku, joka varmistaa, että viimeisellekin ruuville riittää polttoainetta. Tasaustaskun mittaamiseen voidaan käyttää radiometristä pintamittausta. Polttoaineen käsittelyn tarve helpottuu mekaanisten syöttöjärjestelmien avulla verrattuna esim. pneumaattisiin joille kokojakauma on kriittinen (Huhtinen ym. 2000, 157).



KUVA 8. Kiertopetikattila (Cymic boilers 2007, 3)

Polttoaine kuivuu ja lämpenee syttymislämpötilaan nopeasti, petin suuren lämpökapasiteetin ansiosta, ja siksi polttomenetelmä sopiikin hyvin kosteiden polttoaineiden polttoon ilman erillistä kuivatusta. Polttoainetta on leijukerros poltossa vain noin 1-3 %: ia itse hiekan määrästä. Olemme mitanneet leijupetikattiloissa jopa 60 kosteusprosentin kiinteän polttoaineen kosteuksia. Kattilaa ylös ajettaessa ei kiinteää ja kostea polttoainetta voida heti syöttää kattilaan, vaan kattila ylös ajetaan ensin öljy- tai kaasulämmitteisillä sytytyspolttimilla, jotka ovat sijoitettu petin korkeudelle tai hieman sen yläpuolelle. Tyypillisesti kattilan lämpötila nostetaan yli 400-asteeseen, ennen kuin kiinteää

polttoainetta voidaan syöttää kattilaan. Kattilan ylös ajossa noudatetaan kattilan valmistajan antamia lämpötilakäyriä, joiden avulla kattilan lämpötila saadaan turvallisesti nostettua siten, ettei esim. muuraukset vahingoitu. Kiinteän polttoaineen syöttö aloitetaan hiljaksiin. (Huhtinen ym. 2000, 157-159.)

Kattilan lämpötila pyritään pitämään noin 800-900-asteisena eli tuhkan pehmenemispisteen alapuolella, ettei polttoaineen tuhka sulaisi eikä edes pehmenisi, koska silloin hiekka voisi sintraantua tuhkan vaikutuksesta. Sintraantuminen tarkoittaa käytännössä, että hiekka muuttuu lasimaiseksi materiaaliksi, joka tukkii kattilan alaosassa olevat arinan aukot. Jos näin tapahtuu, on kattila ajettava alas ja sintraantunut hiekka pitää piikata irti arinasta. Hienojakoinen tuhka poistuu savukaasujen mukana leijupetistä, mutta karkeampi tuhka poistuu hiekan mukana kattilan pohjalla olevan arinan aukoista. Poistettu hiekka seulotaan ja siitä erotaan kuona, mutta puhdistettu hiekka palaa takaisin kattilaan. Aika ajoon on petiin lisättävä hiekkaa, varsinkin jos poltetaan vähätuhkaista polttoainetta, sillä hiekka jauhaantuu leijutuksen vaikutuksesta ja poistuu tuhkan tavoin savukaasujen mukana tulipesästä. (Huhtinen ym. 2000, 157-159.)

Kattilaan tuotava happi saadaan osittain pohjassa olevista leijutukseen käytettävistä ilmasuuttimista, mutta sen lisäksi osa tarvittavasta palamisilmasta tuodaan petin päälle sekundääri-ilmana. Leijupetikattilan miniteho tulee minimileijutusnopeudesta ja petin lämpötilasta, joka tulisi olla vähintään 700-astetta. Maksiteho tulee maksimilämpötilasta ja siitä, ettei petimateriaali karkaa savukaasukanavaan ja palamattomien partikkelien määrä kasva. (Huhtinen ym. 2000, 158.)

Vaikka leijupetikattiloissa pystytään polttamaan useita polttoaineita, varsinkin kotimaisia kosteita polttoaineita, niin hiilen polttoon se ei sovellu niin hyvin. Tämä johtuu siitä, kun hiili ei sisällä paljoa haihtuvia aineita ja jäljelle jäävä osuus palaa liian hitaasti matalissa lämpötiloissa. (Huhtinen ym. 2000, 157-159.)

Kiertopetikattila eroaa leijupetistä varsinkin suuremman leijutusnopeuden (3-10 m/s) ja hienomman hiekan raekoon (0,1-0,5 mm) suhteen. Tämä tarkoittaa, ettei tulipesässä ole erotettavissa selvää kerrosta missä polttoaine palaa, vaan ominaista on voimakas pyörteisyys ja hiukkasten hyvä sekoittuminen ympäri tulipesää. Rakenteeltaan kiertopetikattilat erottuvat leijupetikattiloista niissä vakiona olevan syklonin suhteen. Syklonin teh-

tävä on erottaa savukaasuvirtauksen mukana poistuvat palamattomat hiukkaset ja kiertävän petimateriaalin sekä palauttaa ne takaisin tulipesään. Syklonin jälkeen sijaitsevat vasta pääosa höyrystinlämpöpinnoista, kuten tulistimet ja esilämmittimet. (Huhtinen ym. 2000, 159.)

Useimmissa kiertopetikattiloissa on vesikiertona käytössä luonnonkiertojärjestelmä, koska ne ovat pääosin vastapainevoimalaitoksia joissa halutut tuorehöyryn paineet mahdollistavat sen. Tulipesän mittasuhteisiin vaikuttavat tarvittava kaasun nopeus, polttoaineen palamisaika, höyrystymistarve ja syklonimäärä. Tyypillisesti tulipesä on suorakaiteen muotoinen ja syklonit, joita voi olla useita isossa kattilassa, sijoitetaan leveämmälle seinustalle. Syklonit pyritään rakentamaan halkaisijaltaan alle kahdeksan metrisiksi, koska savukaasun on virrattava sykloniin noin 20 m/s. Syklonin erotuskyky huononee halkaisijan kasvaessa ja näin ollen virtauksen pienentyessä siksi usein rakennetaan useampi sykloni pienemmällä halkaisijalla. Kiertopetikattilaan polttoaine syötetään syklonista palaavan hiekan joukkoon, mutta voidaan myös käyttää etuseinäsyöttöä, jos syklonin kautta tapahtuvalla syötöllä ei saada tarpeeksi tasaista syöttöä aikaiseksi. Kun savukaasujen mukana kulkeutuva tuhka on tarpeeksi hienojakoista, se ei enää mene sykloniin vaan ajautuu normaalisti savukaasujen mukana savukaasun puhdistimen kautta lentotuhkasiiloon. Niissä on tyypillisesti puolijohdeantureilla toteutettu siilon punnitus, joita olemme toimittaneet useisiin voimalaitoksiin. (Huhtinen ym. 2000, 160.)

Primääri-ilma tuodaan tulipesään samalla tavalla kuin leijupetikattilassa. Sekundääri-ilma syötetään pariin eri tasoon muutama metri arinan yläpuolelle. Säätoalueet ilman suhteen ovat laajat kiertopetikattilassa, mutta minimileijutusnopeutta ei saa alittaa, että prosessi toimii ongelmitta. Starttipolttimet ovat samanlaiset kuten leijupetikattilassa. Kiertopetikattilassa on mahdollista myös polttaa hiiltä hyvällä hyötysuhteella, vaikka siinä ei ole siis paljon haihtuvia komponentteja, mutta syklonin kautta tapahtuva kierto auttaa palamattomia hiukkasia pääsemään takaisin tulipesään ja näin saadaan niille tarpeeksi pitkä palamisaika ja sen ansiosta hyvä palamishyötysuhde. Lisäksi kiertopetikattilassa on matalan palamislämpötilan (800-950 °C) ansiosta pienet typpioksidipäästöt sekä mahdollisuus edulliseen savukaasujen rikinpoistoon. Typpidioksidipäästöjä voidaan entisestään vähentää syöttämällä petiin ammoniakkaa ja rikin poisto onnistuu helposti syöttämällä tulipesään kalkkia, joka reagoi polttoaineessa olevan rikin kanssa muodostaen kaliumsulfaattia eli kipsiä. Kipsi poistetaan yhdessä tuhkan mukana ja kipsi voidaan edelleen uusiokäyttää yhdessä lentotuhkan kanssa maanpohjarakentamisessa

tai jopa sementtiteollisuudessa. Kipsi ja lentotuhka sopivat myös saman raekoon suhteen hyvin yhteen. Tänä päivänä kiertopetikattiloita on parannettu pääasiassa kehittämällä sykloneita toimivammiksi. (Huhtinen ym. 2000, 161-162.)

Suurimmat kattilat ovat jopa 12 metriä kertaa 27 metriä leveitä ja 40 metriä korkeita ja ne pystyvät n. 500 MW:n sähkötehoon. Suurin, mitä pystytään tekemään, on noin 800 MW sähköteholta. Andritz on valmistanut jo yli 370 kiertopetikattilaa. Kiertopetikattilassa kiintoaines kiertää kymmeniä jopa satoja kertoja, kunnes se on palanut niin hyvin, että loput menevät savukaasupesuriin. (YLE-puhe, 2012. Radiohaastattelu.)

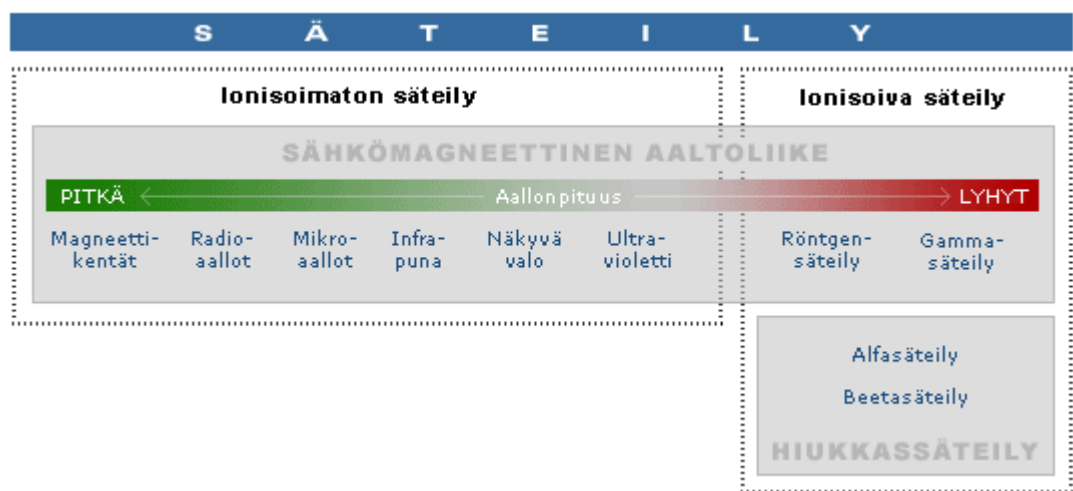
3 RADIOMETRISET MITTALAITTEET

Radiometrisiä mittalaitteita on käytetty mittaussovelluksissa jo useamman kymmenen vuoden ajan. Näitä mittalaitteita Kouvo Automation Oy on edustanut jo yli 30-vuoden ajan. Aluksi päämiehemme oli Ohmart Yhdysvaltainen laitetoimittaja, mutta 2010 Saksalainen VEGA osti puolet Ohmartista, ja yritys oli hetken Ohmart / Vega. Vuonna 2012 Vega osti koko Ohmartin, joten päämiehemme on nykyään Saksalainen Vega. Säteilylähteet tulevat edelleen Yhdysvalloista. Säteilynkäyttö on luvanvaraista toimintaa. Toimintaa valvoo Säteilyturvakeskus. Joukaisella yrityksellä, joka käyttää säteilylähteitä, on oltava Säteilyturvakeskuksen turvallisuuslupa.

Radiometrisiä mittalaitteita käytetään yleensä mittapaikoissa, joissa sähköisiin, mekaanisiin ja optisiin ilmiöihin perustavien mittalaitteiden toiminta ei ole niin luotettavaa vaikeiden mittaolosuhteiden takia (Väisälä, Korpela & Kaituri 2002, 263). Tällaisia kohteita ovat mm. kiinteän polttoaineen voima- ja lämpölaitosten pinnanmittaukset, selutehtaiden haketornit ja lukuisat tiheysmittaukset sekä kaivosten tiheysmittaukset ja massavirtausmittaukset. Lisäksi öljynjalostamoilla lähes ainoa luotettava mittaustapa on radiometriset mittaukset. Jalostamoilla on paljon paineastioita, joihin ei helpolla voi tehdä prosessiyhteitä, näin ollen ainoa vaihtoehto on radiometrinen mittausta.

3.1 Tietoa säteilystä

Sandberg ja Paltemaa (2002, 5) mainitsevat esipuheessaan, että ionisoivaa säteilyä (kuva 9) on aisteilla mahdotonta havaita, myös säteilyn vaikutukset ovat sattumanvaraisia. Ionisoiva säteily voi olla sähkömagneettista säteilyä tai hiukkassäteilyä. Sähkömagneettisia säteilyjä ovat gammasäteily ja röntgensäteily. Hiukkassäteilyä ovat alfasäteily, beetasäteily sekä neutronisäteily. Ionisoivaa säteilyä syntyy radioaktiivisten ydinten hajoessa, ydinreaktioissa ja elektroniverhojen ilmiöiden yhteydessä (Sandberg & Paltemaa 2002, 12).



KUVA 9. Ionisoiva- ja ionisoimaton säteily (Säteilyturvakeskus 2017)

3.1.1 Radiometrisen mittalaitteen rakenne

Säteilyyn perustuva mittalaite koostuu umpilähteestä ja sen suojuksesta, säteilyn ilmaisimesta ja mittauselektronikasta. Säteilylähteen isotooppi valitaan sen mukaan, mikä parhaiten soveltuu kyseiseen mittaussovellukseen. Umpilähteen tarkoituksena on estää radioaktiivisen aineen leviäminen ympäristöön ja suojata laitteen käyttäjää saamasta sisäistä säteilyannosta. Säteilijänsuojuksen tehtävänä on rajoittaa ulkoinen annosnopeus sallitulle tasolle. Säteilyn ilmaisimien valitaan käyttötarkoituksen mukaan. Vaihtoehtoina ovat geigermuller-, ionisaatiokammio-, tai tuikeilmaisimien perustuva ilmaisimien. Mittauselektronikka voi olla erillisenä vahvistimena tai säteilyn ilmaisimen kanssa samana kokonaisuutena (Väisälä ym. 2002, 263).

3.1.2 Umpilähteet

Umpilähde on säteilylähde, jossa radioaktiivinen aine on suljettu tiiviiseen kapseliin, siten ettei radioaktiivinen aine pääse leviämään ympäristöön eikä sitä pääse koskemaan. Umpilähteet valmistetaan ja testataan ISO 2919 standardien mukaisesti. Standardi edellyttää, että umpilähde on puhdas ja tiivis. Umpilähteen puhtaus tarkoittaa, ettei radioaktiivisen kapselin pinta ei ole kontaminoitunut. Jolloin laitteen käyttäjä ei voi kontaminoida toimitilojaan. Jokaisen umpilähteen mukana tulee sertifiointi, jossa on radioaktiivisen kapselin olennaiset tiedot: nuklidi, aktiivisuus, valmistuspäivä ja –numero (Väisälä ym. 2002, 264).

Umpilähteitä käytetään monissa erilaisissa sovelluksissa. Tämän takia radioaktiivinen aine voi olla säteilyominaisuuksiltaan hyvin erilaista: alfa-, beta-, gamma- tai neutron-säteilijä (Taulukko 1). Alfasäteilylähteen kapseli on rakennettava niin, että kapselin säteilyikkuna on oltava hyvin ohut, jotta alfasäteily pääsee ulos kapselistä. Siksi kapseli on mekaanisesti hyvin heikko, siksi sitä onkin käsiteltävä varoen. Myös beetasäteilijän kapselissa on oltava ohut säteilyikkuna, mutta se on voi olla mekaanisesti vähän vahvempi kuin alfasäteilijässä. Gammasäteilijät voidaan tehdä yleensä mekaanisesti vahvoiksi. Tällöin käytetään tuplakapselia, joka valmistetaan teräksestä. Umpilähteet voivat olla pistemäisiä, avautuvalla säteilykeilalla olevia tai sitten sauvasäteilijöitä (Väisälä ym. 2002, 264). Kouvo Automation Oy:n käyttämät Vegan umpilähteet ovat pistemäisiä tai avautuvalla säteilykeilalla olevia. Tämän etu on umpilähteiden helppo käsiteltävyys ja paino.

3.1.3 Gammasäteilylähteet

Yleisesti radiometrisissä gammasäteilijöissä käytetään nuklidina Cs-137, Co-60, Am-241 ja Fe-55 (Väisälä ym. 2002, 265). Näistä yleisimpiä voimalaitoksella käytettäviä nuklideja ovat Cs-137 ja Co-60.

Cs-137 on uraanin halkeamistuote, jota saadaan erottamalla käytetystä ydinpolttoaineesta. Cesium-137 lähteiden aktiivisuudet ovat tyypillisesti 37 MBq – 37 GBq, käytössä on myös muutamia lähteitä, joiden aktiivisuus on $1,85 \times 10^{12}$ Bq. Säteilyn puoliintumisaika on 30 vuotta, tämän takia säteilylähdettä ei todennäköisesti tarvitse vaihtaa koko sen laitteen käyttöiän aikana. Cs-137 puoliintumispaksuus on 16 mm terästä ja 6.5

mm lyijyä, joka mahdollistaa pienemmän säteilynsuojauksen kuin kobolttisäteilijöillä. Cesium lähteitä käytetään pintakytkimissä, pinnankorkeuden mittauksissa, tiheydenmittauksissa ja massavirtausmittauksissa (Väisälä ym. 2002, 266).

Koboltilähteiden aktiivisuudet ovat yleensä 37 MBq – 3,7 GBq välillä. Koboltilähteitä käytetään yleisesti pintakytkimissä, pinnankorkeuden mittauksissa, tiheydenmittauksissa. Co-60 valmistetaan säteilyttämällä stabiilia Co-59-isotooppia ydinreaktorissa neutroneilla. Co-60 puoliintumispaksuus on 21 mm terästä ja 12 mm lyijyä, tämän takia säteilynsuojaus on, varsinkin suurilla aktiivisuuksilla, oltava raskas, jotta annosnopeus ei ylitä yhden metrin päässä laitteesta olevaa rajaa, 7,5 µSv/h. Co-60 puoliintumisaika on 5,27 vuotta. Lähteet onkin uusittava melko lyhyen käytön jälkeen (Väisälä ym. 2002, 265 - 266).

TAULUKKO 1. Teollisuudessa eniten käytettyjä nuklideja (Väisälä ym. 2002, 266)

Nuklidi	Puoliintumisaika	Säteilylaji	Energia MeV	Tyypillinen käyttötarkoitus
⁶⁰ Co	5,27 a	γ	1,17; 1,33	Pinnankorkeusmittari, pintakytkin, kuljetinvaaka
¹³⁷ Cs	30,2 a	γ	0,662	–" –</td
²⁴¹ Am	432,7 a	α, γ	5,5 α 0,060 γ	ioni-ilmaisin, neutronilähde, tiheysmittari, analyysointilaitteisto
¹⁰⁹ Cd	1,27 a	γ	0,022; 0,087	analyysointilaitteisto
⁵⁵ Fe	2,68 a	γ	0,0059	tuhkamittari, analyysointilaitteisto
¹⁹² Ir	74,0 d	γ	0,32; 0,47	gammaradiografialaite
⁸⁵ Kr	10,7 a	β	0,687	pinta-alamassamittari
¹⁴⁷ Pm	2,62 a	β	0,225	pinta-alamassamittari
⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y	29,1 a	β	0,546; 2,284	pinta-alamassamittari

3.1.4 Säteilijänsuojus

Umpilähteissä säteilylähde on aina sijoitettu säteilijänsuojukseen (kuva 10), jonka tehtävänä on päästää säteilijä vain siihen suuntaan, jossa säteilyä tarvitaan eli säteilyn ilmaisinta kohti. Säteilijänsuojuksen tehtävänä on myös suojata ympäristö, laitteen käyt-

täjä ja muu henkilöstö säteilyltä. Säteily määrä ei saa ylittää yhden metrin päässä laitteesta $7,5 \mu\text{Sv/h}$, muualla kuin säteilykeilassa (Standardi ISO 7205, radionuclide gauges – Gauges designed for permanent installation). Säteilysuojuksen on oltava sellainen, että se suojaa säteilylähdettä tulipalolta, eikä sen suojaus saa heiketä oleellisesti tulipalon johdosta. Säteilijänsuojuksessa on yleensä aina suljin, jonka avulla säteilykeila voidaan vaimentaa esimerkiksi huoltotöiden ajaksi. Huoltotöiden ajaksi on säteilijänsuojus lukittava lukolla. Säteilijänsuojuksen on toimittava luotettavasti kaikissa olosuhteissa, eikä se saa avautua vahingossa. Säteilijänsuojus on voitava sulkea ilman työkaluja (Väisälä ym. 2002, 269). Säteilijänsuojusta voi suojata sadesuojalla, joka estää lumen ja jään kertymisen sulkijan läheisyyteen. Sadesuoja suojaa myös erilaisilta kemikaaleilta ja liialta.



KUVA 10. Säteilijänsuojus (Vega 2015)

3.2 Säteilyn ilmaisimet

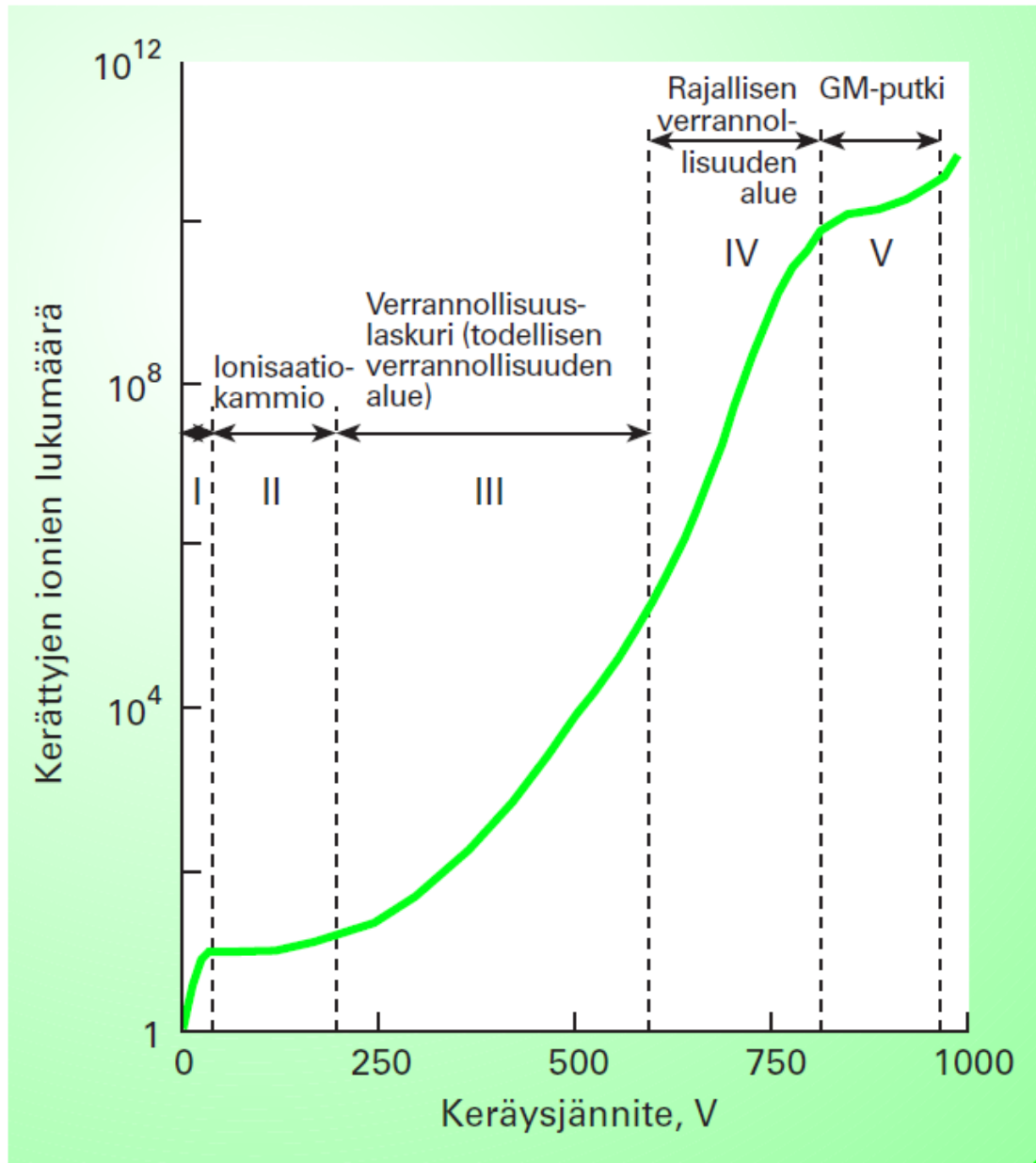
Säteilyn ilmaisiminen perustuu säteilyn ja aineen vuorovaikutukseen, jossa säteily menettää energiaa ionisoimalla ja virittämällä väliaineen atomeja sekä tuottamalla lämpöä. Väliaine voi olla nestettä, kiinteää ainetta tai kaasua. Tärkeintä ilmaisimen kannalta on, että väliaine aiheuttaa säteily määrässä muutosta, jota voidaan havaita. Ilmaisimen

elektroniikka muuttaa säteilyn muutokset haluttuun muotoon. Virran ilmaisimen elektrodien välille saa aikaan säteilyn synnyttämät varauksen kuljettajat ionit, elektronit ja aukot. Ilmaisimet voivat olla kaasutäytteisiä tai kiinteää ainetta. Säteily voidaan havaita valoherkillä ilmaisimilla valomonistinputkilla, joissa säteilyn aiheuttama viritystilän purkautuminen synnyttää valoa. Valomonistinputki muuttaa valon sähkövirraksi (Klemola 2002, 116). Nykyään käytetään eniten valomonistinputkitekniikkaa. Kaasutäytteiset ilmaisimet ovat poistumassa markkinoilta.

3.2.1 Kaasutäytteiset ilmaisimet

Kaasutäytteisissä ilmaisimissa (kuva 11) yleensä kupariputki on kaasun täyttämä, jossa on kahden elektrodin välissä sähkökenttä. Ionisoivan säteilyn osuessa kaasutäytteiseen putkeen, synnyttää se ionipareja, jotka kerätään elektrodeille. Ilmaisinta voidaan kutsua joko ionisaatiokammiksi tai geiger-putkiksi, riippuen sähkökentän voimakkuudesta (Klemola 2002, 116). Ionisaatiokammioita on käytetty pinnanmittauksissa ja kuljetinvaaoissa, kun taas geigermuller-putkia pintakytkinilmaisimina. Nämä ovat niin sanottua vanhaa ilmaisintekniikkaa.

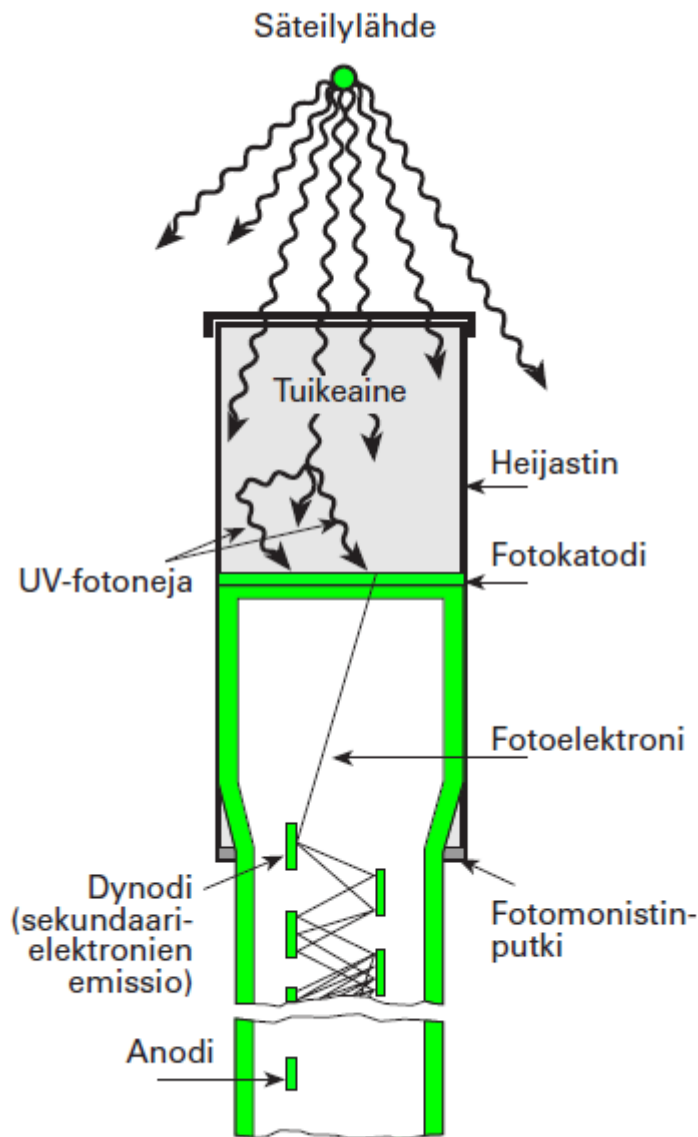
Ionisaatiokammiossa virta on verrannollinen syntyvien ioniparien määrään, voidaan tämän avulla määrittää säteilytys tai absorboitunut annos. Ionisaatiokammiossa mitataan yleensä ionisaatiossa aiheutuvaa keskimääräistä virtaa. Yleisin täytekaasu on ilma, argonia tai argonin ja metaanin seos. Normaalisti kaasu on normaalipaineessa, mutta pieniä annosnopeuksia mitataan kammiolla, jossa paine on noin 25 bar:ia. Ionisaatiokammiot ovat yleensä erittäin stabiileja, eikä niitä välttämättä tarvitse kalibroida vuosiin. Kammiot soveltuu hyvin gamma- ja röntgensäteilyn mittaamiseen (Klemola 2002, 116 - 118).



KUVA 11. Kaasutäytteisten ilmaisimien eri keräysjännitteet (Klemola 2002, 118)

Geiger-Müller-ilmaisimien on yksi vanhimmista ilmaisimista, joita on vielä käytössä. Geigerputken antama pulssi on aina saman suuruinen säteilyn ominaisuuksista huolimatta. Geigerputken seinämä toimii katodina ja putken sisällä on yleensä putken suuntainen anodipiikki. Voimakas sähkökenttä muodostuu katodin ja anodin välille. Säteily vaikuttaa putken sisällä oleviin kaasumolekyyleihin ionisoiden niitä eli molekyylit hajoavat elektroneiksi ja ioniksi, jotka vaikuttavat matkallaan kohti elektroneja kaasumolekyyleihin ionisoiden näitä. Tämän johdosta syntyy anodia kohti liikkuva elektronivyöry, jotka virittyvät molekyylejä, että viritystilan purkautuessa emittoituu fotoneja, jotka muodostavat uusia elektronivyöryjä ja ne aiheuttavat ilmaisimeen havaittavan signaalivirran.

tuikeilmaisinaine. Epäorgaanisten aineiden suuri tiheys sopii hyvin gammasäteilyn ilmaisuuun.



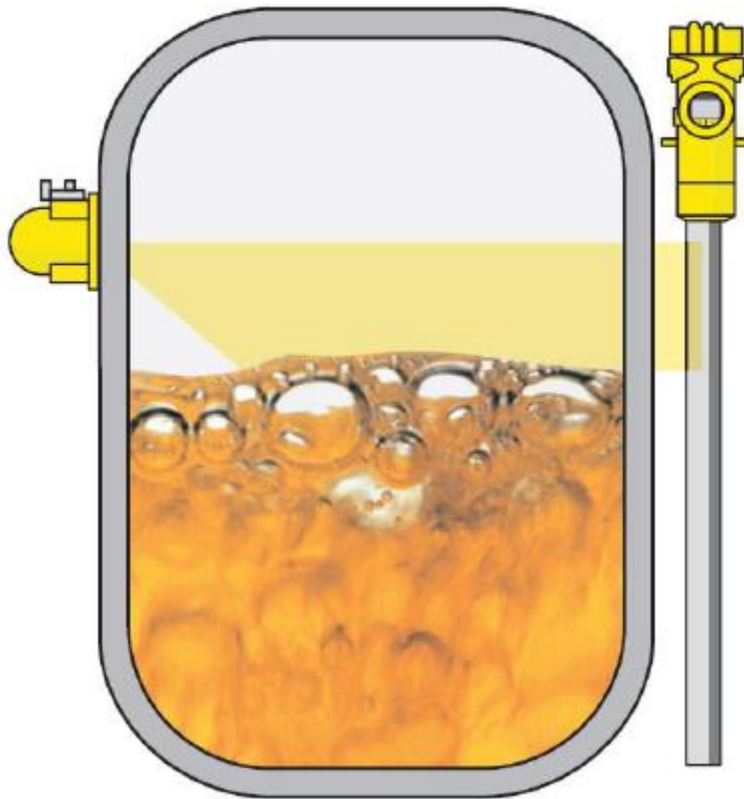
KUVA 13. Tuikeilmaisimen periaatekuva (Klemola 2002, 123)

3.3 Radiometrinen pintamittaus

Pinnankorkeuden mittareita käytetään, jos halutaan tietää siilon tai säiliön tarkka täytösaste tietyllä alueella. Pinnanmittauksen säteilylähteestä lähtee siilon korkeussuunnassa leveä ja sivusuunnassa kapea säteilykeila, kohta vastakkaisella puolella olevaa säteilyn ilmaisinta (Väisälä ym. 2002, 271). Vakan säteilylähteen suojuksen säteilyn avautumiskulma on yleensä 45 astetta pystysuuntaa ja 10 astetta vaakasuuntaan.

3.3.1 Toimintaperiaate

Radiometrisen pintamittarin toimintaperiaate perustuu säteilyn vaimenemiseen väliaineessa (kuva 14). Mittaus koostuu radioaktiivisesta säteilijästä ja sen suojuksessa ja herkstä ilmaisinosasta, joka tunnistaa radioaktiivista säteilyä. Radioaktiivinsäteilijä asetetaan silon tai säiliön toiselle puolelle ja herkkä ilmaisimosa vastakkaiselle puolelle. Mittalaite on kalibroitava. Laitteelle on kerrottava kuinka paljon ilmaisimelle tuleva säteily määrä vastaa pinnankorkeutta. Mitä enemmän säteilyä, sitä alhaisempi pinta on. Laitteen ilmaisinosan toiminta perustuu nykyään tukeilmaisim tekniikkaan. Säteilyn tunnistavaosa on valokuitua, joka tunnistaa säteilyn valoksi. Valo muutetaan elektronikan valomonistin putken avulla haluttuun viestiin, mA tai väylätietoon. Pinnanmittauksissa käytetään tyypillisesti pistemäistä Cs-137 isotooppia olevaa säteilylähdettä tai Co-60 isotooppia olevaa sauvalähteitä.



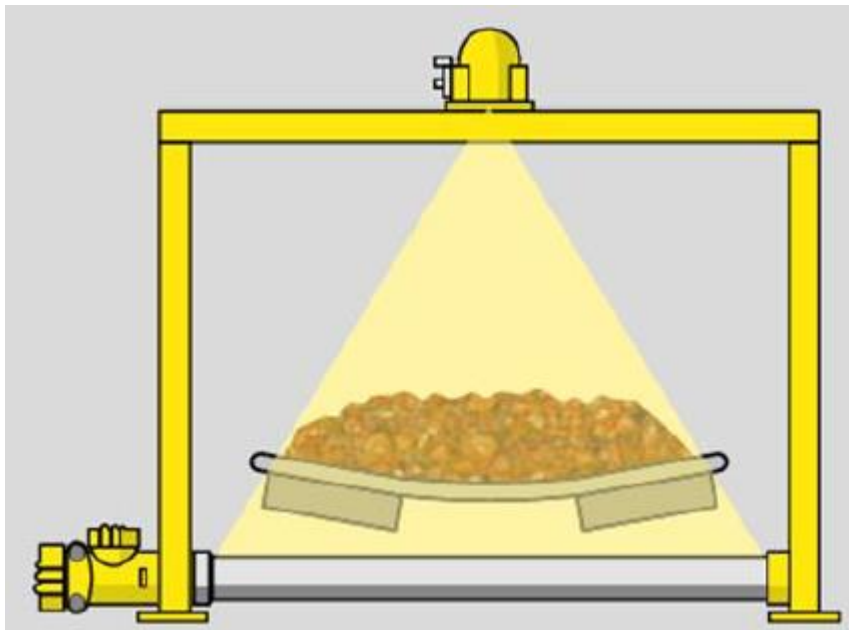
KUVA 14. Radiometrisen pinnanmittauksen periaatekuva (Vega 2015)

3.3.2 Käyttökohteet

Radiometrisiä pintamittareita käytetään vaativissa pinnanmittaussovelluksissa. Näitä ovat mm. voima- ja lämpölaitosten tasaustaskuissa, ennen kattilaan menevää ruuvia ja polttoaine siiloissa. Näiden mittareiden toimintavarmuus takaa polttoaineen luotettavan pinnanmittauksen seurannan. Koska Suomessa poltetaan paljon biopolttoainetta, tulee polttoaineen mukana paljon kosteutta. Kosteus voi aiheuttaa siilon sisäpinnoille vesikalvon, jolloin mikroaaltotekniikkaan perustuvat pinnanmittaukset eivät luotettavasti toimi. Lisäksi pölyävä polttoaine voi aiheuttaa pinnanmittauksen vääristymää mikroaaltotutkissa. Tällöin ainoa luotettava mittaustapa on radiometrinen pintamittari, joka on tunteeton edellä mainituille siilon sisällä tapahtuville muutoksille.

3.4 Radiometrinen massavirtausmittaus

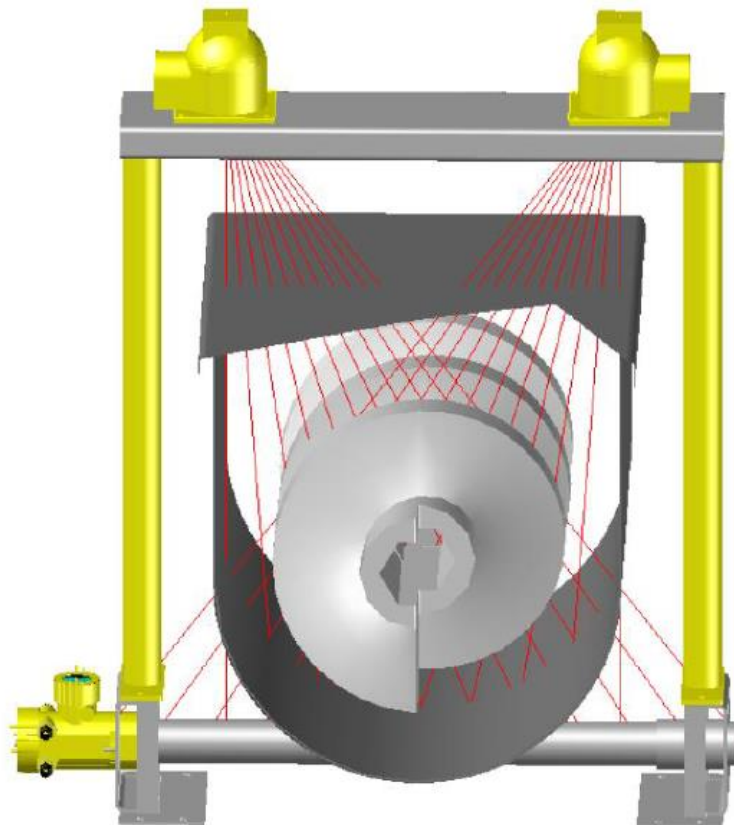
Radiometrisellä massavirtausmittarilla mitataan hihna-, ruuvi-, tai kolakuljettimelta massavirtausta. Laite muodostuu hihnan, ruuvin tai kolan vastakkaisille puolille sijoituista säteilylähteestä tai lähteistä ja säteilynilmaisimesta (Väisälä ym. 2002, 274).



KUVA 15. Radiometrisen hihnavaa'an periaatekuva (Vega 2015)

Säteilylähteen avautumiskulma määräytyy sovelluksen mukaan. Hihnakuljettimella käytetään 60 asteen avautumiskulmaa (kuva 15), ruuvikuljettimella on yleensä kaksi

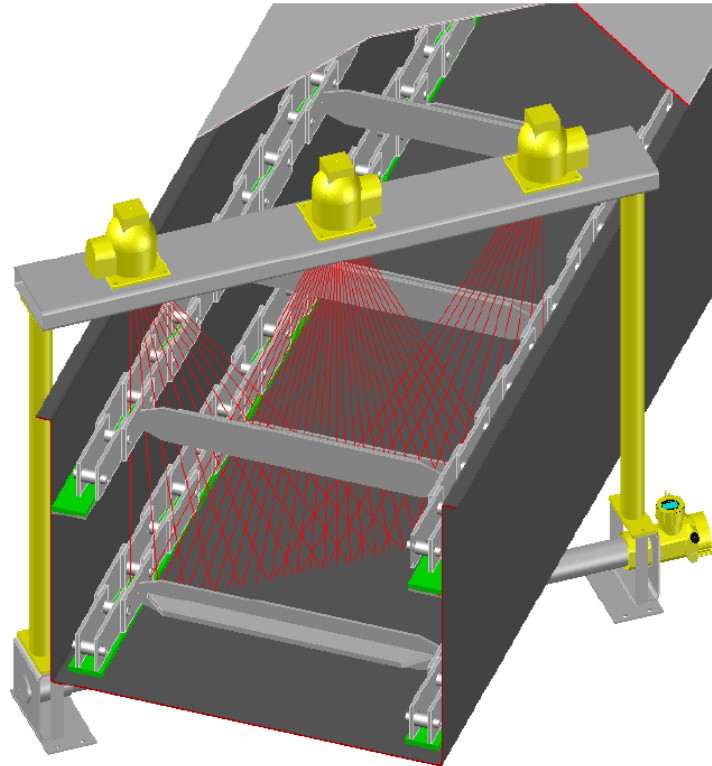
kappaletta 45 asteen kulmalla avautuvaa lähettä (Kuva 16) ja kolakuljettimilla käytetään kolmea lähettä, joista kaksi on 45 asteen avautumiskulmalla ja yksi (keskimmäinen lähde) 60 asteen avautumiskulmalla (kuva 17).



KUVA 16. Radiometrisen ruuvivaa'an periaatekuva

3.4.1 Toimintaperiaate

Säteilylähteestä tai lähteistä lähtee hihnan, ruovin tai kolan suuntainen säteilykeila, yleensä 10 astetta, ilmaisinta kohti, joka nykyään on tuikeilmaisim (Väisälä ym. 2002, 274). Ennen vaakailmaisimet olivat ionisaatiokammioita. Ionisaatiokammioita on vieläkin käytössä, mutta niitä uusitaan tuikeilmaisim tekniikalla. Väisälän ym. (2002, 274 - 275) mukaan kuljettimella säteilylähteen ja ilmaisimen välissä oleva materiaali vai-mentaa osan säteilystä.



KUVA 17. Radiometrisen kolavaa'an periaatekuva

Mitattavan materiaalin lisääntyessä säteily määrä ilmaisimella pienenee. Säteilyn väheneminen riippuu mitattavan materiaalin tiheydestä, materiaalin paksuudesta ja kuljettimen leveydestä eli kuljettimella olevan materiaalin massasta kuljettimen pituusyksikköä kohden (kg/m). Kun tiedetään kuljettimen nopeus, saadaan materiaalin massavirta (t/h). Säteilylähteissä käytetään yleensä Cs-137 ja Co-60-nuklideja.

3.4.2 Käyttökohteet

Radiometrisiä massavirtausmittauksia käytetään mittamaan esimerkiksi voimalaitoksen tai lämpölaitoksen kattilaan menevää materiaalin määrää. Nämä mittaukset tehdään ruuvikuljettimesta. Lisäksi massavirtausmittauksia käytetään voimalaitoksen polttoaineseosten suhteiden mittaukseen, jolloin mittaus tapahtuu hihna- tai kolakuljettimelta.

4 ONLINE-KOSTEUSMITTAUS

Yrityksemme on edustanut vuodesta 2012 asti saksalaisen SWR engineering-yhtiön valmistamia kiintoaineiden online-kosteusmittausta. Viime vuosina kiinnostus on lisääntynyt asiakkailtamme tarkastelemaan polttoaineen kosteutta juuri ennen kuin se syötetään kattilaan. Kosteus tällä hetkellä määritetään näytteistä, jotka otetaan polttoainelasteista, niiden saapuessa polttoainekentälle. Ennen kuin polttoaine syötetään kattilaan aikaa saattaa kulua jopa useita päiviä. Voimalaitoksen optimaalisen polton kannalta olisi tärkeämpää tietää polttoaineen kosteus sillä hetkellä, kun se syötetään kattilaan. Tässä asiassa voi meidän edustamamme kiintoaineiden online-kosteusmittaus auttaa ja parantaa kattilan polttoprosessin onnistumista. Kosteudella on vaikutusta monessa asiassa tuotantoprosessin toimintaan ja lopputuotteen laatuun. Kerromme tässä nimenomaan polttoaineen kosteusmittaukseen liittyvistä seikoista. Mainittakoon, että vastaavanlaisia mittauksia käytetään mm. betoni-, lasi-, keramiikka-, kipsi-, elintarvike-, maaines- ja kemian teollisuudessa. Kapasitiivinen anturi ei ole uusi keksintö vaan se on ollut jo käytössä vuosikymmeniä, mutta viime aikoina tällä osa-alueella on tapahtunut uutta kehitystä. Voimalaitokset sekä sellu- ja kartonkitehtaat ovat kiinnostuneet mittauksista, koska uudella tekniikalla varustetut anturit pystyvät mittaamaan yhä kosteampia materiaaleja luotettavasti reaaliajassa. Kosteuspitoisuuden säädöllä päästään monissa kohteissa merkittäviin kustannussäästöihin jopa hyvinkin lyhyellä takaisinmaksuajalla. Koska kosteutta pystytään tarkastelemaan jatkuvasti, ei tarvita jatkuvia näytteenottoja joihin sisältyy viiveitä ja epätarkkuuksia. (SWR engineering 2015a.)

4.1 Toimintaperiaate

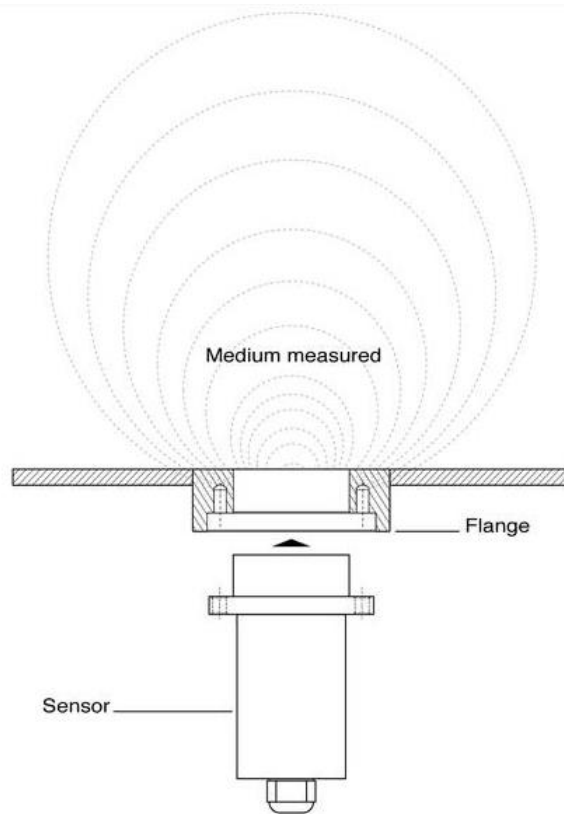
Kosteusantureita on kahta eri mallia, joista toinen perustuu kapasitiiviseen ja toinen noin 1 gigahertsin mikroaaltotaajuudella perustuvaan mittaustekniikkaan. Antureille sopii sama elektroniikka, joka lähettää ohjausjärjestelmään sopivan 4-20 milliampeeri viestin (kuva 18). Mittalaitteen pystyy kalibroimaan ja säätämään joko itse elektroniikan paikallisytyöstä tai huokeammassa vaihtoehdossa ei ole näyttöä vaan liitin johon kytketään pc-tietokone USB-portin kautta. PC-tietokoneeseen on saatavilla yksinkertainen ohjelmisto, jolla pystyy tekemään kaikki säätötoimenpiteet. Jokaisella materiaalilla on sille ominainen dielektrisyysvakio, jota verrataan veden dielektrisyysvakioon (=80), jonka erotuksen ollessa riittävän suuri voidaan siitä laskea suoraan kiintoaineen kosteus. Mitä kosteampaa (> 50 %) mitattava materiaali on, niin sitä todennäköisemmin sille

soveltuu mikroaaltotekniikkaan perustuva anturi. Toisaalta mitä metallipitoisempi materiaali on, niin sitä todennäköisemmin sille soveltuu kapasitiiviseen mittaukseen perustuva anturi. (SWR engineering 2015a.)



KUVA 18. SWR kapasitiivinen anturi elektroniikalla (SWR engineering 2015b)

Mikroaaltojen heikkous on siinä, että ne kuolevat pintaveden vaikutuksesta, kun taas kapasitiivinen mittaus ”tukehtuu”, kun materiaalin kosteuspitoisuus alkaa nousta yli 50 prosentin eli dielektrisyysvakio alkaa lähestyä veden dielektrisyysvakiota. Pystymme testisalkun avulla valitsemaan, kumpi anturi sopii millekin materiaalille muutamassa sekunnissa. Mitattavaa materiaalia tulee olla mielellään noin 50 mm anturin edessä (kuva 19) ja sen tulisi olla mahdollisimman homogeenistä. Jos mitattava materiaali on kovin huokoista (tiheys alle 100 kg/m^3), niin anturin edessä olevan patjan paksuus on oltava lähemmäs 100 mm. Vastaavasti tiheämpää ja hienojakoisempaa materiaalia ei tarvita niin paksult. (SWR engineering 2015a.)



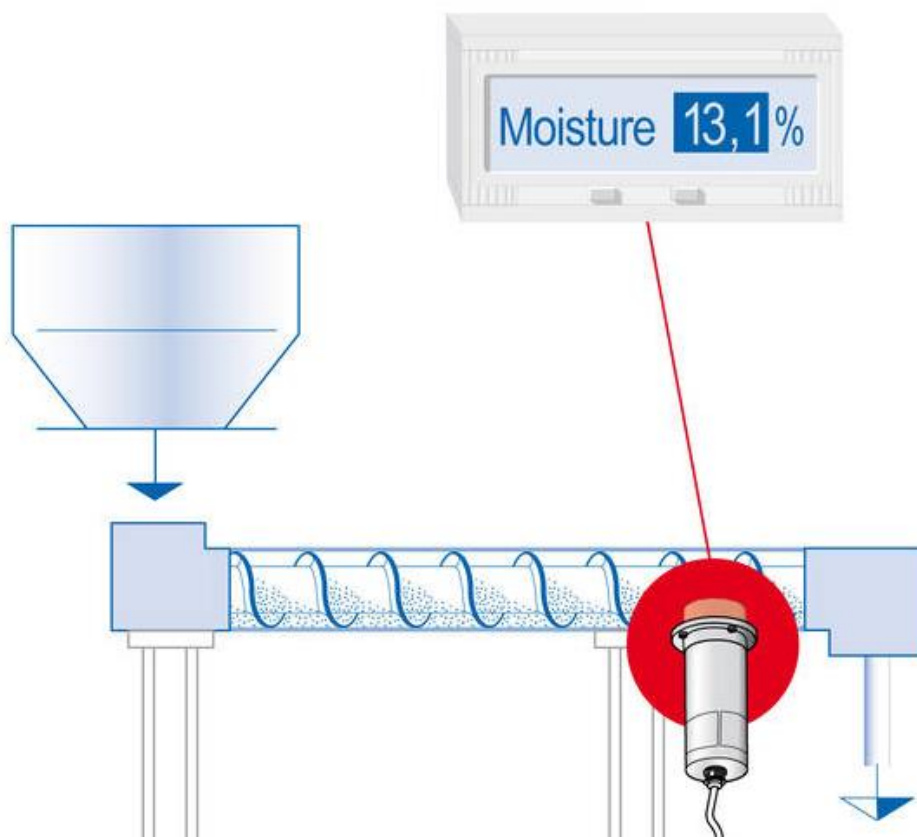
KUVA 19. Kosteusmittarin on oltava kosketuksissa mitattavaan materiaaliin (SWR Engineering 2015b)

Olemme saaneet kuitenkin hyviä tuloksia myös epähomegeenisestä materiaalista, kuten polttoainesekoituksesta, missä saattaa olla sekaisin esimerkiksi lietettä, turvetta, metsähaketta ja kuorta, jossa siis väkisin on ilmarakoja mitattavassa patjassa. Laitteen kalibrointi on kuitenkin haastavaa sekoituksilla ja tasoon vaikuttaa tietenkin materiaalin rae-koon lisäksi eri polttoaineen sekoitussuhteet. Laitteeseen voi syöttää periaatteessa valmiin käyrän, kun tiedetään, mitä mitataan, ja meillä on tiedossa vastaavasta materiaalista oleva mittaustieto. Jokaisessa asennuspaikassa on lisäksi omat fyysiset tekijät, joten laitteeseen tehdään normaalisti joka paikassa oma kalibrointikäyrä ja siihen mahdollinen tasokorjaus ulkopuolisten virheiden minimoimiseksi. Parhaassa tapauksessa riittää pelkästään tasokorjauksen tekeminen, joka onnistuu ottamalla läheltä mittauskohdasta useampi näyte ja laboratoriossa tehtävien kosteuden määritysten jälkeen voidaan näytteiden keskiarvo syöttää laitteeseen.

Polttoaineen kyseessä ollessa kosteuden tarkka tieto ei ole niin tärkeää esimerkiksi kuten lannoitteita valmistettaessa, jossa kuivausprosessin jälkeen mitattava kosteusalue on yhdestä kolmeen prosenttiin, kun polttoainetta mitattaessa kosteus vaihtelee jopa 40 ja 65 prosentin välillä.

4.2 Käyttökohteet

Kosteutta siis mitataan monilla eri teollisuuden aloilla. Tähän työhön liittyen asiakkaamme ovat viime vuosina kiinnostuneet minkä kosteuksista polttoainetta kattilaan syötetään. Meillä on polttoaineen kosteusmittauksia asennettu muutamaaan voimalaitokseen ja niiden lisäämistä itse polttoprosessin optimointiin suunnitellaan tai ollaan juuri parhaillaan toteuttamassa. Anturit on asennettu juuri ennen sulkusyötintä olevaan ruuvikuljettimeen (kuva 20), joten kosteustieto saadaan juuri ennen kattilaan menoa.



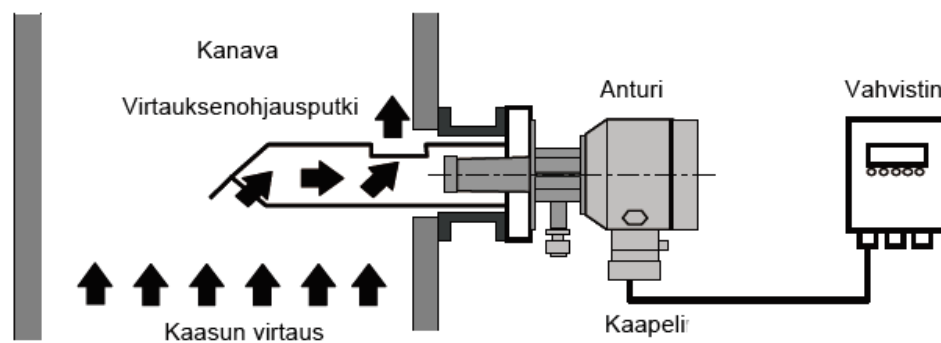
KUVA 20. Kosteusmittari ruuvikuljettimella (SWR Engineering 2015b)

Tämä tieto kuitenkin on uutta, ja sitä ei ole aikaisemmin mitattu tässä vaiheessa prosessia, ja kuten sanottu, säätöön sitä ollaan vasta toteuttamassa. Tulevaisuudessa sen avulla saadaan todennäköisesti päästöjä, happea ja polttoaineen kulutusta vähennettyä. Päästöt vähenevät hiilidioksidin suhteen, koska hapen säätö tulipesään parantuu kosteustiedon myötä. Polttoaineen kulutus vähentyy, kun kosteus tiedetään reaaliajassa, joten polttoprosessia saadaan säädettyä optimaaliseksi. Anturi on kosketuksissa mitattavan materiaalin kanssa, joten anturien mekaaninen rakenne on kestävä ja niissä onkin keraaminen pinta anturin mittapään edessä. Itse mittapään edessä oleva keraaminen suojaus kestää

kulutusta metallirunkoa paremmin ja anturit kestävät hyvin tärinää ja iskuja. Mittauspaikan valinta ja oikea asennus ovat erittäin tärkeitä. Mittaus on mahdollista toteuttaa siilosta, syöttösuppilosta, ruuvikuljettimesta tai hihnakuljettimelta. Mitattava materiaali voi liikkua nopeastikin anturin alitse tai ylitse, riippuen asennuspaikasta. Likaantumisen ja pienet tarttumet mittauspinnalla eivät vaikuta merkittävästi mittaustulokseen, koska anturin mittauskenttä ulottuu noin 50–100 mm syvyyteen mitattavan materiaalin tiheydestä ja homogeenisuudesta johtuen. (SWR engineering 2015a.)

5 HAPPIMITTAUS

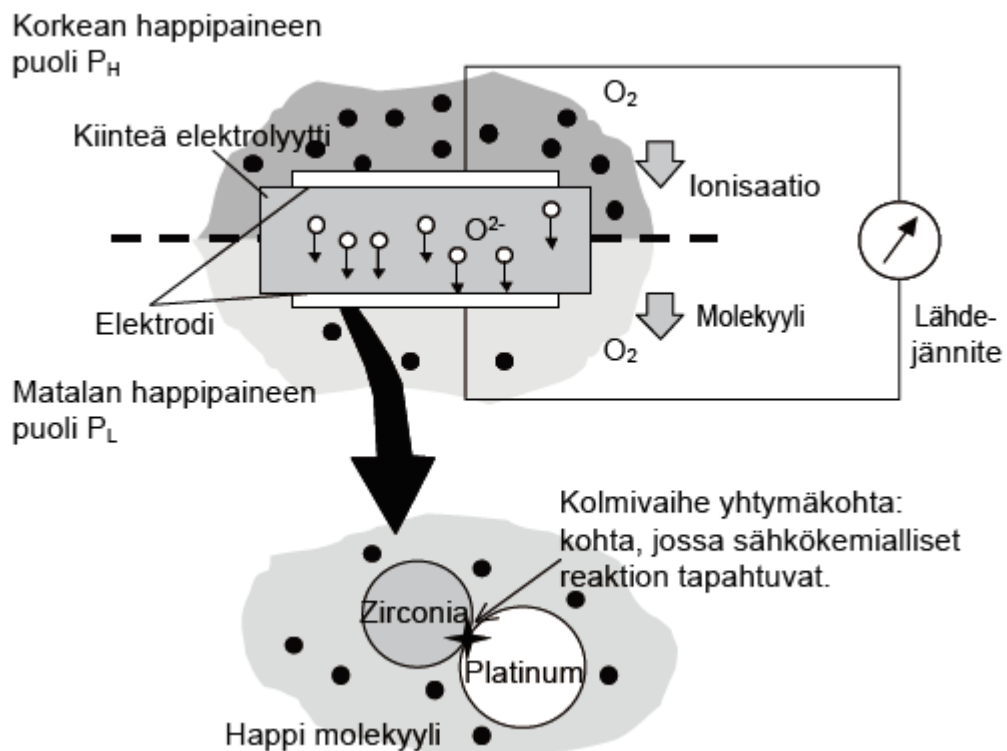
Yrityksemme on vuodesta 2013 asti edustanut japanilaisen Fuji:n valmistamia zirkonium-happianalysaattoreita. Happimittaukset ovat voimalaitokselle todella tärkeitä polttoprosessin hallinnassa pitämiseksi ja päästöjen vähentämiseksi. Analysaattorilla mitataan savukaasujen happipitoisuutta. Se asennetaan suoraan savukaasukanavaan virtauksenohjausputkeen, joka ohjaa savukaasut anturin päähän missä on zirkonium-suodatin, missä tapahtuu sähkökemiallinen reaktio, josta saadaan selville happipitoisuus savukaasuista (kuva 21).



KUVA 21. Laitekoonpano (Fuji 2012, 1)

5.1 Toimintaperiaate

Happimittauksen toimintaperiaate perustuu siis sähkökemialliseen reaktioon mikä tapahtuu anturin päässä olevan zirkonium-elektrolyytin ja sen molemmiin puoliin kiinnitettyjen platina tai vastaavien elektrodien välille. Kun elektrolyytin molempien puolien elektrodiin kohdistuu erilainen happipaine, sähkökemiallinen reaktio aiheuttaa lähdejännitteen niiden välille – tätä kutsutaan konsentraatiopari-ilmiöksi. Alla olevasta kuvasta (kuva 22) käy hyvin selville reaktioketju. (FUJI 2012, 1.)



KUVA 22. Sähkökemiallinen reaktio zirkonium-anturissa (Fuji 2012, 1)

Sähkökemialliset reaktiot tapahtuvat yhtymäkohdassa (ns. kolmivaihe yhtymäkohta) kiinteän elektrolyytin (zirkonium), elektrodin (esim. platina) ja hapen kesken. Reaktio edellyttää kiinteän elektrolyytin johtokykyä korkeissa lämpötiloissa, joten zirkoniumsuotimen lämpötila pysyy jatkuvasti noin 800-asteisena, josta huolehtii vahvistin.

Syntyvä lähdejännite pystytään laskemaan Nernstin yhtälön avulla:

$$E = \frac{RT}{4F} \ln \frac{P_H(O_2)}{P_L(O_2)} \quad (1)$$

jossa: E = Lähdejännite
 $Ph(O_2)$ = Referenssikaasun happipitoisuus ilmakehässä
 $Pl(O_2)$ = Mitattavan kaasun happipitoisuus
 R = Kaasun vakio $8.3144 [J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}]$
 T = Absoluuttinen lämpötila [K]
 F = Faradayn vakio $9.649 \cdot 10^4 [C \cdot mol^{-1}]$ (FUJI ZFK8-käyttöohje, 1).

Happimittaukset ovat kalibroitava ja tarkastettava vähintään kerran vuodessa. Lisäksi riippuen asennuspaikasta ja hiukkaspitoisuudesta, niitä voidaan hankalissa olosuhteissa putsaamaan ja tarkastamaan jopa puolivuositain lähinnä virtauksenohjausputken tukkeutumisen ehkäisemiseksi. Olosuhteet vaikuttavat suuresti niiden toimintaan ja monissa pienemmissä laitoksissa, jossa savukaasukanavat eivät ole kovin pitkiä, niitä joudutaan sijoittamaan hankaliin olosuhteisiin. (Fuji 2012, 17.) Happimittauksia käytetään voimalaitoksissa savukaasujen jäännöshapen mittaamiseen heti tulipesän jälkeen savukaasukanavasta tai savupiipusta.

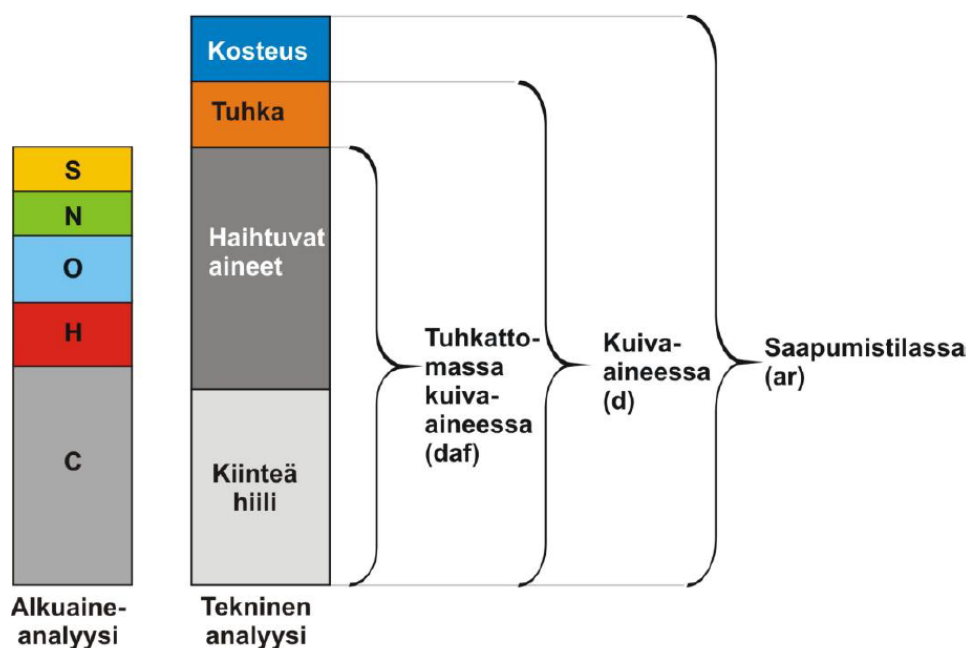
6 VOIMALAITOKSEN POLTTOAINEET

Suomessa voimalaitoksilla käytetään yleisesti puuperäisiä polttoaineita. Hiilen poltto on vähentynyt huomattavasti päästörajoitusten myötä. Puu poikkeaa ominaisuuksiltaan muista käytetyistä polttoaineista uusiutuvuutensa takia. Suomi ja Ruotsi ovat edelläkävijöitä biopolttoaineen käytössä. Lisäksi Suomessa toimivat kattilanvalmistajat ovat maailman kärkeä biopolttoaine kattiloiden valmistuksessa.

Polttoaineiden tärkeimpiä ominaisuuksia ovat:

- lämpöarvo
- polttoaineen kemiallinen koostumus
- kosteus
- tuhkan koostumus ja sen sulamiskäyttäytyminen, tuhkapitoisuus
- viskositeetti, tiheys, jauhautuvuus sekä muut polttoaineen muut käsittelyyn vaikuttavat ominaisuudet (Alakangas, Hurskainen, Laatikainen-Luntama & Korhonen 2016, 22)

Lisäksi esimerkiksi hienojakoisista polttoaineista on hyvä tietää itsesyttymislämpötila ja pölyräjähdysominaisuudet. Kosteus, haihtuvien aineiden, kiinteän hiilen ja tuhkan määrittystä kutsutaan polttoaineiden tekniseksi analyysiksi (kuva 23), jota käytetään polttoaineen laadun arvioinnissa. Tekninen analyysi antaa myös perustan polttoainekaupalle (Alakangas ym. 2016, 23).



KUVA 23. Määrittysperusteet polttoaineille (Alakangas ym. 2016, 24)

6.1 Kiinteän biopolttoaineen kosteuden määrittäminen

Uunikuivatusmenetelmää käytetään kiinteiden polttoaineiden kosteuden määrittämiseen. Menetelmälle on olemassa standardi SFS-EN ISO 18134–2:2015. Myös muita kosteuden mittaussuunnitelmia voidaan käyttää, jos niiden vastaavuus standardimenetelmään voidaan todentaa (Alakangas ym. 2016, 24).

Näytteenotto biopolttoaineille tehdään näytteenotto standardin (SFS-EN ISO 18135) mukaisesti. Peruseriaatteena on, ettei koostumus saa muuttua näytteen käsittelyvaiheiden aikana. Ennen käsittelyä näyte on sekoitettava ja punnittava vaa’alla. Vaa’an tarkkuus on oltava 0,1 g. Myös astia, johon näyte sijoitetaan, on punnittava. Kosteus näytettä on oltava vähintään 300 g. Jos polttoaine on hienojakoista esimerkiksi puru, voidaan käyttää 200 g näytettä tai jos vaa’an tarkkuus on 0,01 g voidaan käyttää 100 g

näytettä (SFS-EN-ISO 18134–2:2015). Näytteen kerrospaksuus on oltava 1 g materiaalia cm² kohti ja palakoko on oltava korkeintaan 31,5 mm. Näyte on myös merkittävä. Jos näytepussin seinämiin on tiivistynyt kosteutta, on se hierottava näytteeseen ennen pussin avaamisesta. Jos tiivistynyttä vettä voidaan hieroa näytteeseen, on se otettava huomioon näytteen kosteutta laskettaessa (Alakangas ym. 2016, 24 – 26).

Lämpökaapissa, jossa näyte kuivataan, on lämpötilan oltava 105 ±2 °C, myös kostean ilman pitää päästä pois lämpökaapista tuuletusventtiilin kautta. Lämpötilaa on tarkkailtava säännöllisesti. Lämpökaappi on oltava puhdas ennen kuivatuksen aloittamista. Näyte on laitettava lämpökaappiin välittömästi punnituksen jälkeen, ettei näyttemateriaalia menetetä. Näytteitä ei saa laittaa lämpökaapin pohjalle, seinämiin kiinni tai liian tiiviisti. Kun näytteen paino ei enää muutu, on kuivatus valmis. Kuivapaino on saavutettu, kun massa ei muutu 60 minuutin aikana enempää kuin 0,2 p- %. Maksimiaika kuivatukselle on 24 h. Jos näytettä on sopivan paksu kerros ja palakoko ovat enintään 31,5 mm, on 16 h kuivatusaika riittävä. Näyte punnitaan välittömästi lämpökaapista ottamisen jälkeen, 10–15 s aikana, ettei laboratorion ilmankosteus imeydy näytteisiin (Alakangas ym. 2016, 26).

Kosteus lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$M_{ar} = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \quad (2)$$

jossa

M_{ar}	Kosteus saapumistilassa, p-%
m_1	Tyhjän kuivatusastian paino, g
m_2	Kuivatusastian ja näytteen yhteispaino ennen kuivatusta, g
m_3	Kuivatusastian ja näytteen yhteispaino kuivatuksen jälkeen, g

Tulos ilmoitetaan 0,1 % tarkkuudella (Alakangas ym. 2016, 26).

6.2 Polttoaineen näytteenotto

Näytteenotolla tarkoitetaan tietyn osan irrottamista suuremmasta kokonaisuudesta analysoitavaksi siten, että näyte ja alkuperäinen materiaali-erä ovat ominaisuuksiltaan samanlaisia. On arvioitu, että 80 % analyysituloksien virheistä tulee näytteenotosta, 15 %

näytteen käsittelystä ja 5 % analyysistä. Jokaisella lämpö- ja voimalaitokselle on hyvä laatia hyvä näytteenottosuunnitelma, jonka molemmat (polttoaineen toimittaja ja polttoaineen ostaja) osapuolet hyväksyvät kauppaa tehdessään. Myös päästökauppa edellyttää näytteenottosuunnitelmaa. Hyvä näytteenotto ja käsittely sisältävät seuraavat asiat:

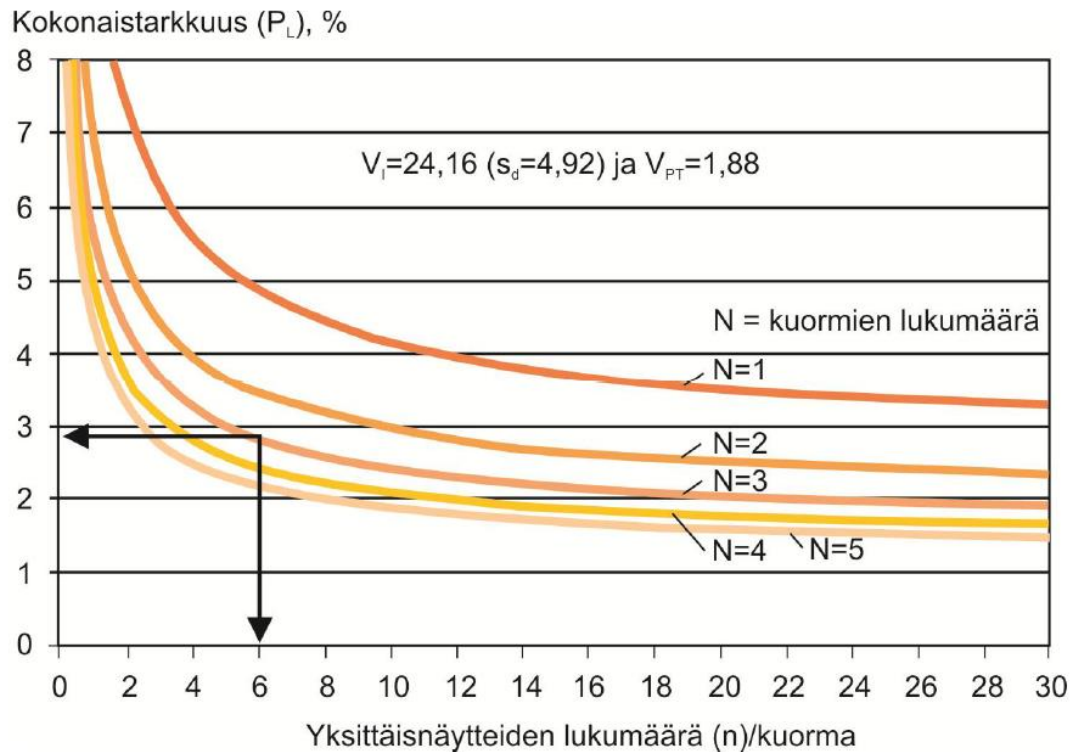
- näytteenoton kohdistuttava koko polttoainevirtaan tai suurimpaan osaan siitä
- näyte otettava mahdollisimman läheltä sen luovutusta
- näytteenotto putoavasta virrasta tai muuten vapaasta liikkeestä
- jatkuvaa osavirrasta tapahtuvaa näytteenottoa vältettävä
- näytteen käsittely ja jakaminen eivät saa muuttaa tutkittavan materiaalin ominaisuuksia (Alakangas ym. 2016, 41)

Ensisijainen näytteenottoaika on polttoaineen luovutuspaikka eli vastaanottoasema, jolloin näyte voidaan ottaa kuorman purkamisen yhteydessä putoavasta polttoainevirrasta. Seuraava paikka näytteenotolle on vastaanottoasemalta lähtevästä kuljettimelta tai kuljettimelta putoavasta polttoainevirrasta. Näytteenottoaika kannattaa valita paikka, jossa polttoaineesta saadaan kohtuullisin kustannuksin ja varmimmin edustava näyte. Näytteenotto on syytä suorittaa huolellisesti, koska juuri tämä vaihe aiheuttaa eniten virhettä lopputulokseen. Biopolttoaineen epähomogeenisuus aiheuttaa haasteita hyvän näytteenoton periaatteeseen (Alakangas ym. 2016, 42).

Useimmilla laitoksilla polttoaineen laadun ja hinnoittelu perustuu manuaalisesti tehtävään näytteenottoon. Manuaalinen näytteenotto on mahdollista toteuttaa kuljetinjärjestelmistä. Oikein tehtynä se on työlästä. Lisäksi kuljetin on mahdollisesti aina pysäytettävä näytteenoton ajaksi. Manuaalisessa näytteenotossa on pyrittävä systemaattisuuteen kuormakohtaisia näytteitä otettaessa. Pääperiaate on, että näytteen on edustettava koko kuormaa. Näytteenottajan on otettava kaikki palakoot huomioon. Niitä ei saa sivuuttaa näytteenotosta, jos niitä mukaan näytteeseen tulee (Alakangas ym. 2016, 43–45).

Näytteiden lukumäärään (taulukko 2) vaikuttavat tietyn ominaisuuden hajonta kyseisessä erässä. Esimerkiksi kosteuden hajonnan kasvaessa tarkkuusvaatimus lisää yksittäisten näytteidenotto määrää (kuva 24). Näytteiden määrä voi nousta jopa kohtuutto-

maksi. Kosteuden hajonta riippuu polttoainelajista ja kuormien täyttötavasta. Rankahakkeella ja kantomurskeella on suurempi kosteushajonta kuin hakkuutähteellä ja kopuuhakkeella (Alakangas ym. 2016, 45).



KUVA 24. Näytteenoton kokonaistarkkuuden riippuvuus yksittäisnäytteiden lukumäärästä (Alakangas ym. 2016, 50)

TAULUKKO 2. Analyysien tyypilliset näytemäärät (Alakangas ym. 2016, 50)

Analyysit	Näytemäärä
Perusanalyysit (lämpöarvo Q, tuhka A, rikki S, hiili C, vety H ja typpi N)	Noin 2 litraa analyysia kohti (voidaan tehdä myös kosteusanalyysinäytteestä)
Kosteus, M	Vähintään 300 g kosteaa näytettä eli noin 2 litraa analyysia kohti
Irtotiheys, BD	Noin 70 litraa analyysia kohti, kun irtotiheys määritetään 50 litran astialla (esim. hake) tai 7 litraa analyysia kohti, kun irtotiheys määritetään 5 litran astialla (esim. pelletit)
Palakoko	Noin 8 litraa analyysia kohti 20 % kosteudessa

6.3 Puu ja biomassa polttoaineena

Biomassan syntyprosessissa kasvin elävät solut muokkaavat ilmakehän hiilidioksidin ja maaperän vedestä auringon energian avulla muodostuneista sokereista edelleen monimutkaisia yhdisteitä. Nämä yhdisteet koostuvat hiilestä (C), hapesta (O) ja vedystä (H) (taulukko 3), joista muodostuu puun rakennusaine ligniini, hemiselluloosa ja selluloosa (Knuuttila 2003, 24). Metsä siis sieppaavat yhteyttämisprosessissa ilmakehästä hiiltä ja samalla sitovat auringosta energiaa kemialliseksi energiaksi (Alakangas ym. 2016, 54).

TAULUKKO 3. Selluloosan ja ligniinin koostumukset (Knuuttila 2003, 24)

	Happi	Hiili	Vety
Selluloosa, p-%	49,4	44,4	6,2
Ligniini, p-%	29,8	64,3	5,9

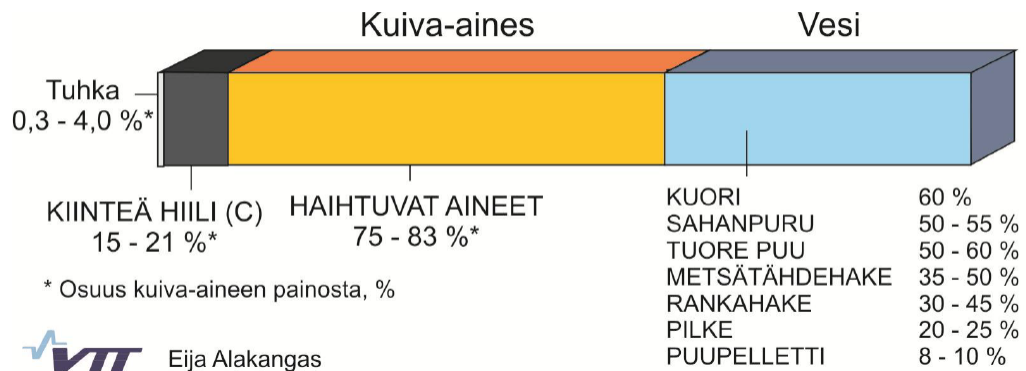
Selluloosa on maapallolla esiintyvistä orgaanisista yhdisteistä yleisin. Sen osuus puuvartisilla kasveilla on 40–50 %. Hemiselluloosan osuus puun biomassasta on 20 – 35 % ja ligniinin osuus 30 % havupuilla ja 20 % lehtipuilla. Selluloosa koostuu pitkistä ketjumolekyyleistä, joka muodostuu glukoosimolekyyleistä ($C_2H_{12}O_5$). Hemiselluloosa muistuttaa selluloosaa, vaikka se muodostuukin useista sokereista. Ligniinin tehtävänä on antaa puulle ja oksille sen tarvitsema jäykkyys. Ligniinin tehtävänä on myös toimia sidosaineena, kun puusta tehdään polttoainepuristeita. Ligniinissä on paljon hiiltä, joten sen lämpöarvo on korkeampi kuin selluloosan (Knuuttila 2003, 24). Puussa on lisäksi sellaisia yhdisteitä, joita voidaan neutraaleilla orgaanisilla liuottimilla uuttaa puusta. Tällaisia yhdisteitä eli uuteaineita ovat terpeenit, rasva-aineet ja fenolit. Havupuilla uuteaineita on enemmän, kuin lehtipuilla (taulukko 4). Esimerkiksi puunpihka on tällainen uuteaine (Alakangas ym. 2016, 54).

TAULUKKO 4. Puulajien kemiallinen koostumus (Alakangas ym. 2016, 55)

Puulaji	Kuiva-aineessa, p-%				
	Selluloosa	Hemiseluloosa	Ligniini	Uuteaineet	Muut aineet
Siperian lehtikuusi	41,4	29,6	26,8	1,8	0,4
Kuusi	41,7	28,3	27,4	1,7	0,9
Runkopuu	42,0(1,2)	27,3(1,6)	27,4(0,7)	2,0(0,6)	ei ilmoitettu
Kuori	26,6 (1,3)	9,2(1,1)	11,8(0,9)	32,1(3,8)	
Oksat	29,0	30,0	22,8(1,7)	16,4(2,6)	
Neulaset	28,2	25,4	8,4(2,1)	43,3(2,3)	
Kanto	42,9	27,9	29,4(1,8)	3,8(0,2)	
Juuret	29,5	19,2	25,5	15,7	
Mänty	40,0	28,5	27,7	3,5	
Runkopuu	40,7 (0,7)	26,9 (0,6)	27,0 (0,0)	5,0 (1,0)	ei ilmoitettu
Kuori	22,2 (3,2)	8,1 (0,4)	13,1 (5,4)	25,2 (5,2)	
Oksat	32,0	32,0	21,5 (5,9)	6,9 (0,8)	
Neulaset	29,1	24,9	6,9 (0,8)	39,6 (1,3)	
Kanto	36,4	28,2	19,5	18,7	
Juuret	28,6	18,9	29,8	13,3	
Rauduskoivu	41,0	32,4	22,0	3,2	
Hieskoivu					
Runkopuu	43,9 (2,7)	28,9 (3,7)	20,2 (0,8)	3,8 (1,3)	ei ilmoitettu
Kuori	10,7 (0,3)	11,2 (0,5)	14,7 (3,9)	25,6 (1,1)	
Oksat	33,3	23,4	20,8 (3,9)	13,5 (3,0)	
Neulaset	ei ilm.	ei ilm.	11,1 (0,0)	33,0 (0,0)	
Kanto	29,5	19,4	13,4	4,7	
Juuret	26,0	17,1	27,1	13,5	

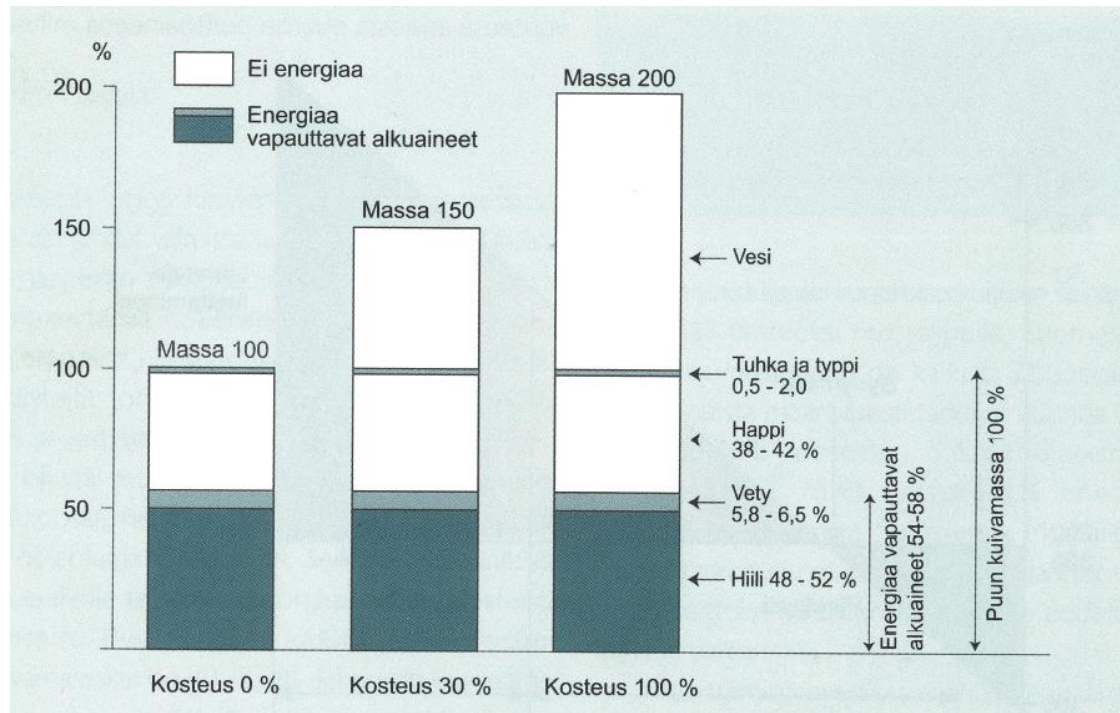
Suluissa hajonta

Biomassan jakaantuminen vaihtelee suuresti puun iän ja puulajin mukaan kuoreen, runkopuuhun, lehtiin (neulasiin) ja oksiin. Pohjoisella havumetsällä juurien ja kantojen osuus runkopuun kuiva-aineosuudesta on noin 30 % ja kokopuusta 20 %, korjattavan kantopuusta 20–24 % runkopuun massasta. Puussa on paljon haihtuvia osia (kuva 25), jonka takia se on pitkäliekkinen polttoaine ja se vaatii suuren palotilan (Alakangas ym. 2016, 54).



KUVA 25. Puun koostumus (Alakangas ym. 2016, 55)

Biomassa hajoaa hapetusreaktiossa, jossa vapautuu energiaa hiilen ja vedyn sidosten murtuessa. Luonnossa hajoaminen tapahtuu metsäpalossa ja puun lahotessa. Jos palamien tehdään suljetussa tilassa, vapautuva energia voidaan ottaa talteen, höyryn, lämmön tai sähkön tuottamista varten. Puu vaatii suuren palotilan, koska se palaa pitkällä liekillä. Palamisessa vapautuu paljon haihtuvia aineita. Mitä suurempi on puun vety- ja hiilipitoisuus, sitä suurempi on sen energiasisältö. Lehtipuilla keskimääräinen hiilipitoisuus on 49 % ja havupuilla 51 %. Vety- ja hiilipitoisuudet ovat lehtipuilla 6,0 % ja havupuilla 6,2 %. Havupuissa on enemmän ligniiniä, mikä aiheuttaa suuremman hiilipitoisuuden (Knuutila 2003, 24 - 25).



KUVA 26. Palavien alkuaineitten osuus kuivassa ja tuoreessa puussa (Puuenergia 2003, 26)

Puu koostuu pääasiassa hiilestä, vedystä ja hapesta, joiden osuus puun kuiva-ainemassasta on noin 99 % (kuva 26). Puun typpipitoisuus on noin 0,5 - 2,3 %. Puun rikki-pitoisuus on taas yleensä alle 0,05 %. Puut poikkeavat alkuainekoostumukseltaan toisistaan hyvin vähän. Polttoaineen energiasisältö riippuu kemiallisesta koostumuksesta eli hiili- ja vety-yhdisteisiin sitoutuneista auringon energiasta (taulukko 5) (Alakangas ym. 2016, 56).

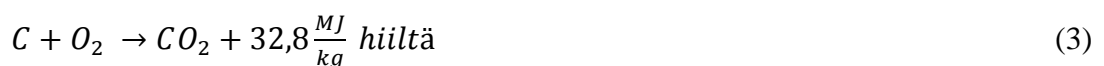
TAULUKKO 5. Puupolttoainelajien alkuainepitoisuuksia (Alakangas ym. 2016, 55)

Puupolttoainelaji	Alkuainekoostumus, p-% kuiva-ainessa					
	C	H	N	O	S	Cl
Puu, yleensä	48–	6,0–	0,5–	38–	0,05	< 0,01
	50	6,5	2,3	42		
Kokopuuhake, mänty	51,8	6,1	0,3	41,2 **	0,01	0,0042
Metsätähdehake	51,3	6,1	0,4	40,8 **	0,02	0,0076

Havupuuhake					0,02– 0,045	0,011-0,031
Lehtipuuhake					0,02–0,09	
Sahanpuru, mänty, kuoreton	51,0	6,0	0,08	42,8 **	0	< 0,0050
Paju, kuorellinen	47,8	5,7	0,2		0,03	0,005-0,022
Paju, kuoreton	47,6	6,2	0,1		0,015	< 0,0005
Ruskopaju, kuorellinen	47,7	6,1	0,2		0,025	0,005-0,022
Ruskopaju, kuoreton	47,6	6,1	0,1		0,013	< 0,0005
Paju, kuorellinen	47,5	6,0	0,1		0,027	
Paju, kuoreton	47,4	6,0	0,2		0,016	
Paju	49,7	6,1	0,4	42,6 **	0,03–0,05	0,0037
Männyn kuori	52,5	5,7	0,4	39,7 **	0,03	0,0085
	54,5	5,9	0,3	37,7		
Kuusen kuori	49,9	5,9	0,4	41,4 **	0,03	0,0279
	50,6	5,9	0,5	40,2		
Koivun kuori	56,6	6,8	0,8	34,2		

*Arvot kahdesta eri lähteestä. **Happi laskettu erotuksena

Knuuttilan (2003, 25) toimittamassa kirjassa Pentti Hakkilan mukaan: ” Täydellisessä palamisessa hiili yhdistyy happeen tuottaen hiilidioksidia, ja vety yhdistyy happeen tuottaen vettä. Energian vapautuminen tapahtuu seuraavien yhtälöiden mukaisesti:”



Puun polttaminen ei juurikaan lisää ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta, koska hiili vaan kiertää ilmakehän ja biomassan välillä. Puu on lähes hiilineutraali polttoaine poikkeuksena puuta käsiteltäessä käytettävät polttoaineet, joita käytetään puuta kerätessä, kuljettamassa ja käsiteltäessä (Knuuttila 2003, 25 – 26).

6.3.1 Puun lämpöarvo

Polttoaineiden lämpöarvona käytetään yleensä MJ/kg tai kWh/kg. Palamisessa vapautuvan kokonaislämpömäärän osoittaa kalorimetrinen lämpöarvo, joka on riippumaton polttoaineen kosteudesta. Tehollinen lämpöarvo on pienempi kuin kalorimetrinen lämpöarvo, koska siinä otetaan huomioon höyrystymiseen käytetty energia. Se lasketaan kuitenkin siten, että poistuvan höyryn lämpötila oletetaan samaksi kuin alkuperäinen polttoaineen lämpötila. Mitä enemmän puussa on vettä, sitä isompi ero on tehollisen ja kalorimetrisessä lämpöarvossa. Koska puupolttoaineessa on aina myös vettä, on kalorimetrisen lämpöarvo kosteudesta riippumatta aina noin 20,5 MJ/kg, kun taas tehollinen lämpöarvo laskee kosteuden kasvaessa (Knuutila 2003, 26 – 27). Muihin kiinteisiin polttoaineisiin nähden puun lämpöarvo (taulukko 6) on suhteellisen pieni. Tämä asettaa omat haasteet puun poltto- ja käsittelylaitteille. Myös varastotilan tarve on suurempi, kuin muilla polttoaineilla (Alakangas ym. 2016, 63).

TAULUKKO 6. Puun eriosien tehollinen lämpöarvo (MJ/kg) kuiva-aineessa (Alakangas ym. 2016, 63)

Puulaji	Rungon puuaine	Kuori	Koko runko	Latvus	Lehdet/ neulas	Kokopuu	Kannot
Mänty pienpuu varttunut puu	19,31	19,53	19,33 19,55	20,23 20,09	21,00 21,04	19,53 19,63	22,36
Kuusi pienpuu varttunut puu	19,05	18,80	19,02 19,16	19,77 19,41	19,22 19,19	19,29 19,24	19,18
Hieskoivu pienpuu varttunut puu	18,62	22,75	19,19 19,06	19,94 19,33	19,77 19,36	19,30 19,09	18,61
Rauduskoivu pienpuu varttunut puu	18,61	22,53	19,15 18,96	19,53 19,61	19,72 19,76	19,21 19,05	18,50
Harmaaleppä pienpuu varttunut puu	18,67	21,57	19,00 19,14	20,03 19,74	20,57 20,54	19,18 19,22	19,27
Tervaleppä pienpuu varttunut puu	18,89	21,44	19,31 18,90	19,37 19,47	20,08 19,78	19,31 19,00	18,91
Haapa pienpuu varttunut puu	18,67	18,57	18,65 18,62	18,61 18,96	19,18 19,02	18,65 18,66	18,32

6.3.2 Kalorimetrinen lämpöarvo

Alakankaan ym. (2016, 28) mukaan kun aine palaa täydellisesti ja aine jäähtyy 25 °C lämpötilaan, sen aikana vapautuva lämpöenergian määrä massayksikköä kohden kutsutaan kalorimetriseksi lämpöarvoksi. Aineen sisältämä vesi eli kosteus ja aineen sisältämän vedyn palamistuotteena syntyvä vesi oletetaan palamisen jälkeen nesteeksi.

Kalorimetrinen lämpöarvoa mitatessa ilmakeivasta näytteestä punnitaan noin 1 g ja se poltetaan nesteeseen upotetussa kalorimetripommissa happiatmosfäärissä. Vapautuva lämpö mitataan. Samalla määritetään kosteus, jonka avulla muutetaan ilmakeivattu näytteen lämpöarvo vastaamaan absoluuttisen kuivan näytteen lämpöarvoa. Lämpöarvo ilmoitetaan 0,01 MJ/kg tarkkuudella (Alakangas ym. 2016, 28).

6.3.3 Tehollinen lämpöarvo

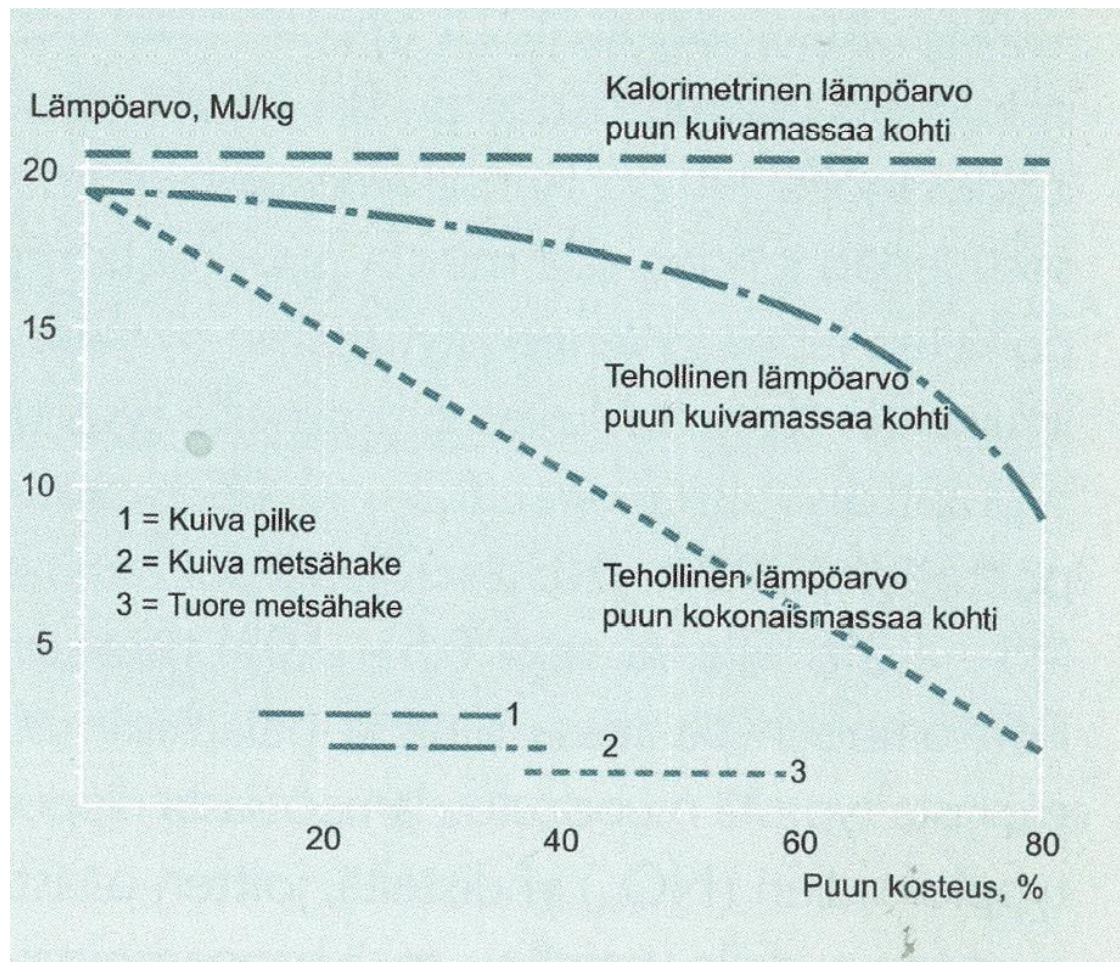
Suomessa lämpöarvo ilmoitetaan yleensä tehollisen lämpöarvon avulla (kuva 27). Tehollinen lämpöarvo saadaan laskettua kalorimetrinen lämpöarvon avulla kaavasta:

$$q_{p,net,d} = q_{V,gr,d} - 212,2 \times w(H)_d - 0,8 \times [w(O)_d + w(N)_d] \quad (5)$$

Jossa

$q_{p,net,d}$	kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo vakiopaineessa, J/g tai kJ/kg
$q_{V,gr,d}$	kuiva-aineen kalorimetrinen lämpöarvo vakiotilavuudessa, J/g tai kJ/kg
$w(H)_d$	vetypitoisuus kuivassa biopolttoaineessa (sisältäen vedyn mineraaliaineksen hydraatioveden sekä polttoaineen sisältämän vedyn), p-%
$w(O)_d$	happipitoisuus kuivassa polttoaineessa, p-%
$w(N)_d$	typpipitoisuus kuivassa polttoaineessa, p-%

Huomaa $[w(O)_d + w(N)_d]$ voidaan laskea vähentämällä 100 %:sta polttoaineen hiili, tuhka, vety ja rikkipitoisuus kuiva-aineessa, p-% (Alakangas ym. 2016, 28).



KUVA 27. Kosteuden vaikutus puun kalorimetrisen ja teholliseen lämpöarvoon (Puuenergia 2003, 27)

Jos polttoaineesta ei ole määritelty typpi-, vety-, hiili-, rikkipitoisuutta, niin voidaan laskennassa käyttää vakioarvoja. Vakioarvo summalle $[w(O)_d + w(N)_d]$ on hakkuutähteelle 41 %, turpeelle 35 %, kuorelle 41 %, kokopuulle 41 % ja kasvibiomassalle 41 %. Yleisesti puupohjaisten polttoaineiden $[w(O)_d + w(N)_d]$ arvot ovat 40,4–44,5 %, kasvibiomassoille 43,5 % ja jyville ja siemenille 46 % (Alakangas ym. 2016, 29).

6.3.4 Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa

Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa kosteasta polttoaineesta voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$q_{p,net,d} = q_{p,net,d} \times \left(\frac{100 - M_{ar}}{100} \right) - 0,02443 \times M_{ar} \quad (6)$$

Jossa

$q_{p,net,ar}$ tehollinen lämpöarvo (vakiopaineessa) saapumistilassa, MJ/kg

$q_{p,net,d}$	tehollinen lämpöarvo (vakiopaineessa) kuiva-aineessa, MJ/kg
M_{ar}	Kosteus saapumistilassa, p-%
0,02443 on	höyrystymisen entalpien korjauskerroin (vakiopaineessa) vedelle (kosteus) 25 °C lämpötilassa, MJ/kg per 1 p-% kosteutta.

Laatuluokitusstandardissa SFS-EN ISO 17225 käytetään symbolia Q kiinteiden biopolttoaineiden teholliselle lämpöarvolle saapumistilassa. Muutos kWh/kg tehdään vasta laskennan jälkeen (Alakangas ym. 2016, 29).

6.3.5 Energiatiheys saapumistilassa

Energiatiheys saapumistilassa kiinteille biopolttoaineille lasketaan seuraavalla kaavalla, tehollisen lämpöarvon (saapumistilassa) ja irtotiheyden avulla:

$$E_{ar} = \frac{1}{3600} \times q_{p,net,ar} \times BD_{ar} \quad (7)$$

Jossa

E_{ar}	biopolttoaineen energiatiheys saapumistilassa, MWh/irto-m ³
$q_{p,net,ar}$	tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg
BD_{ar}	irtotiheys eli puupolttoaineen tilavuuspaino saapumistilassa, kg/irto-m ³
$\frac{1}{3600}$	muuntokerroin energiayksiköille MJ:sta MWh:iin (Alakangas ym. 2016, 31).

6.3.6 Toimitettu energiamäärä

Toimitettu Energiamäärä lasketaan seuraavan kaavan avulla:

$$w = \frac{Q}{3,6} \times m \quad (8)$$

jossa

$\frac{Q}{3,6}$	saapumistilaisen tehollisen lämpöarvon (MJ/kg) muunto yksiköihin MWh/t
m	toimitetun polttoaineen massa tonneina

Satunnaisten ja pienten erien määrittäminen yllä olevilla tavoilla voi olla liian raskasta. Kaikilla laitoksilla ei ole autovaakoja. Näissä tapauksissa energiamäärä voidaan määrittää mittaamalla toimitettavan polttoaineen tilavuus puutavaran mittaustavan mukaan

(laki 141/2013), määrittelemällä polttoaineen irtotiheys (BD) ja määritetään polttoaineen kosteus (M) ja tehollinen lämpöarvo (Q). Toimitetun polttoaineen energiamäärä voidaan määrittellä pienillä lämpölaitoksilla kattilan hyötysuhteen ja tuotetun energian avulla (SFS-EN 12952-15:2003 Water-tube boilers and auxiliary installations. Part 15: Acceptance tests) (Alakangas ym. 2016, 31).

6.4 Päästökertoimen laskeminen

Päästökertoimella tarkoitetaan tietyn polttoainemäärän, raaka-ainemäärän tai energiamäärän sisältämän hiilen hapettuessa syntyvän hiilidioksidin määrää. Päästökerrointa määritettäessä seospolttoaineille hyödynnetään standardia SFS-EN 15440:2011.

Polttoaineen hiilidioksidipäästökerroin lasketaan kaavalla:

$$CO_2 \left[\frac{g}{MJ_{pa}} \right] = F \times \frac{m_c}{m_{pa}} \times \frac{M_{CO_2}}{M_c} \times 10^3 \times (1 - M_{ar}) \times \frac{1}{q_{net,ar}} \quad (9)$$

jossa

m_c/m_{pa}	polttoaineen hiilipitoisuus
M_{CO_2}	44,01 kg/kmol
M_c	12,01 kg/kmol
M_{ar}	kosteus, p-%
$q_{net,ar}$	lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg
F	hapettumiskerroin

6.5 Puun mineraaliaineet

Puu sisältää myös pieniä määriä mineraaliaineita (taulukko 7), nämä eivät vapauta lämpöä palaessa, vaan alentavat lämpöarvoa osuutensa mukaisesti. Polttoaineen palaessa ja palamisen yhteydessä käytetystä ilmasta muodostuu typenoksidien yhdisteitä (NOx), jotka ovat terveydelle vaarallisia. Rikin (S) määrä puupolttoaineessa on hyvin vähäistä. Rikkipäästöt aiheuttavat korroosiota ja happamoitumista, tämän takia voima- ja lämpölaitoksille on asetettu rikkipäästön enimmäisraja. Fossiilisia polttoaineita käyttävät laitokset joutuvat investoimaan kalliita rikinpoistojärjestelmän, jos sellaista ei ole. Puu-

polttoaineita käyttävät laitokset eivät tällaista tarvitse. Turvetta polttavat laitokset säästävät kalliit rikinpoistojärjestelmän, jos ne polttavat turvetta ja puuta sekaisin (Knuuttila 2003, 28).

Kloori (Cl) on olennainen alkuaine lehtivihreässä. Klooria on kuitenkin hyvin vähän varsinaisessa puuaineessa, mutta metsähakkeen neulasissa sitä on jo haitallisen paljon. Kloori on ongelmallinen kattilalle, koska se muodostaa kalsiumin ja kaliumin kanssa alkaliklorideja, jotka kasaantuvat lämmönvaihtimen pinnalle. Tämä aiheuttaa lämmönvaihtimiin hapettumia ja korroosioita. Tämä ongelma voidaan torjua turpeen ja metsähakkeen sekapoltoilla. Polttoaineen alkalit reagoivat runsas rikkisessä polttoaineessa pikemmin rikin, kuin kloorin kanssa. Näin ollen kloori siirtyy suolahapon muodossa savukaasuihin (Knuuttila 2003, 28).

Polttoaineissa esiintyy myös raskasmetalleja, puubiomassassa vähemmän kuin hiilessä ja turpeessa. Uusissa voima- ja lämpölaitoksissa on tehokkaat suodattimet, joilla raskasmetalleja poistetaan savukaasuista. Puun palamisessa syntyvän tuhkan palauttamisesta metsämaahan pidetään suotavana. Jotta tämä on mahdollista, on palavasta polttoaineesta poistettava raskasmetalleja. Puhtaan puun tuhkapitoisuus on alle 0,5 %, suurin osa tästä on kalsiumia. Eri puulajien kuoreissa on tuhkaa 6 – 7 kertaa ja lehdessä 6 – 11 kertaa niin paljon kuin puussa. Käytännössä puuta (harvennuspuu) poltettaessa tuhkaa syntyy noin 1 %, koska sen joukossa on aina hiekkaa ja muita epäpuhtauksia. Turpeen tuhka osuus on tyypillisesti 5 % (Knuuttila 2003, 28).

TAULUKKO 7. Havu- ja lehtipuiden mineraalipitoisuuksia kuiva-aineessa (Alakangas ym. 2016, 57)

Puulaji/osa	Päämineraali, p-%				Hivenainepitoisuus, ppm (mg/kg)				
	P	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Zn	B	Cu
HAVUPUU									
Runkopuu	0,01	0,06	0,12	0,02	147	41	13	3	2
Runkopuun kuori	0,08	0,29	0,85	0,08	507	60	75	12	4
Oksat	0,004	0,18	0,34	0,05	251	101	44	7	4
Neulas	0,16	0,60	0,50	0,09	748	94	75	9	6
KOKO PUU	0,03	0,15	0,28	0,05	296	85	30	6	4

LEHTIPUU									
Runkopuu	0,02	0,08	0,08	0,02	34	20	16	2	2
Runkopuun kuori	0,09	0,37	0,85	0,07	190	191	131	17	13
Oksat	0,06	0,21	0,41	0,05	120	47	52	7	4
Lehdet	0,21	1,17	1,10	0,19	867	135	269	21	10
KOKO PUU	0,05	0,21	0,25	0,04	83	27	39	6	5

Pohjoisen havupuiden tuhkapitoisuus on pieni. Suomen koivun, männyn, haavan ja kuusen tuhkapitoisuus on runkopuulle 0,46 %, lehdille 4,97 %, kuorelle 2,97 % ja kuorellisille oksille 1,52 % (taulukko 8). Koska kloori ja typpi poistuvat poltossa savukaasujen mukana, tuhka ei sisällä näitä aineita. Puun tuhkapitoisuus on pienempi kuin muilla kiinteillä polttoaineilla. Tämän takia tuhkan käsittely on helpompaa ja säästää tuhkan käsittelykustannuksia (Alakangas ym. 2016, 59).

TAULUKKO 8. Puun tuhkapitoisuus kuiva-aineessa (Alakangas ym. 2016, 59)

Puupolttoainelaji	Tuhkapitoisuus, p-%
Halko ja klapi/pilke	0,5 / 1,2
Kokopuuhake, mänty/Kokopuuhake, sekapuu	0,6 / 0,5
Koivuhake	0,4–0,6
Hakkuutähdehake	1,33
Hakkuutähdehake, kuusi	2,0–6,0
Kantohake	0,50
Pajuhake	0,44–1,39
Sahanpuru, kuorineen / sahanpuru, mänty, kuoreton*	1,1 / 0,08
Kutterinlastu	0,40
Männyn kuori	1,70
Kuusen kuori*	2,34 / 2,8
Koivun kuori	1,60

*kaksi eri arvoa kirjallisuudessa

Voima- ja lämpölaitokset harvoin käyttävät vain pelkkää puuta. Puun ja turpeen yhteiskäyttö auttaa polttoainehankinnoissa. Seoskäytöstä on muutakin hyötyä, turpeen avulla

voidaan tasoittaa hakkeen vaihtelevaa kosteutta tai hallita metsähakkeen neulasista tulevia kloori ongelmia. Puuhakkeella voidaan taas vähentää turpeen aiheuttamia rikki-päästöjä (Knuuttila 2003, 29).

6.6 Polttoaineiden ominaisuuksia

Lämpöarvo ja kosteus ovat keskeisiä polttoaineiden ominaisuuksia. Polttoaineen käsittelyyn vaikuttavat palakoko ja tiheys. Lehtipuiden kosteus vaihtelee vuodenajan mukaan. Puun käyttötapa määrittelee, kuinka kosteaa puuta voidaan polttaa tehokkaasti. Hakkeen palakoko ja sen tasalaatuisuus on tärkeää varsinkin pienille lämpölaitoksille. Palakokoon tavoitepituus on 30 – 40 mm. Tikut ja hienoaines vaikeuttaa polttoaineen syöttämistä kattilaan. Puun tiheys voi vaihdella kasvunopeuden ja iän mukaan, jopa samalla lajilla. Tiheys ilmoitetaan yleensä kg/m^3 . Puun lämpöarvo kiintotilavuusyksikköä kohden lasketaan kuiva-tuoretiheyden pohjalta (Knuuttila 2003, 30–31).

6.6.1 Puupolttoaineen kosteus

Tuoreen puun kosteus vaihtelee 40–60 % välillä, johon vaikuttaa puun ikä ja puun laji (taulukko 9). Puun kosteus vaihtelee puun eri osien välillä. Kasvavan lehtipuun kosteus vaihtelee myös vuodenajan mukaan, koivun kosteus talvella on 45 %, keväällä 48 %, kesällä 38 % ja syksyllä 45 %. Keväällä puu on lehdetön ja juuristo aktiivinen siirtämään vettä runkoon, jolloin puun kosteus nousee. Kesällä taas kosteus laskee, kun puun lehtien haihdunta on korkeimmillaan. Syksyllä puun kosteus nousee, kun se luovuttaa lehdet. Havupuiden kosteusvaihtelut ovat pienempiä (Alakangas ym. 2016, 61).

Puun käyttötapa määrää, kuinka kosteana sitä voidaan käyttää. Suuremmat voima- ja lämpölaitokset voivat käyttää kosteaa polttoainetta. Kosteus voi olla jopa 50 %. Tällöin laitoksella on oltava savukaasulauhdutin, jolla savukaasujen sisältämä kosteus lauhdetaan ja lämpöenergia otetaan talteen. Puun varastointi kosteana lisää kuiva-ainetappioita (Alakangas ym. 2016, 61).

TAULUKKO 9. Puupolttoaineiden kosteuspitoisuuksia (Alakangas ym. 2016, 62)

Puupolttoainelaji	Kosteus, p-%
Halot ja pilkkeet, juuri hakatut	45
Halot ja pilkkeet, yhden kesän yli varastoidut	25
Halot ja pilkkeet, kahden kesän yli varastoidut	20
Rankahake, tuore	50
Rankahake, rasikuiva	40
Rankahake, ilmakeuiva, ylivuotinen	25-30
Metsätähdehake, mänty, tuore	60
Metsätähdehake, kuusi, tuore	50-57
Metsätähde, oksahake, tuore	50
Kantohake	35
Pajuhake	35-40
Hakkeen seulontajäte	50-55
Sahaustähde	5-10
Sahanpuru ja hake, kuivaamaton	50-55
Sahanpuru, kuivatusta sahatavarasta	5-15
Tasauspätkien hake	15
Hiomapöly	5-10
Hiomapöly, puusepän kuiva	15-20
Kutterinpuru, puusepän kuiva	5-10
Kutterinpuru, ilmakeuiva	15-20
Puusepänteollisuuden jäte	5-10
Puusepänteollisuuden jäte, ilmakeuiva	15-20
Vaneritähde	35-50
Vanerin tasausreunat	5-10
KUITUPUUN KUORI	
Havupuu, kuiva kuljetus	
• kuiva kuorinta	40-50
• märkä kuorinta, puristamaton	60-70
• märkäkuorinta, puristettu	55-62
Havupuun märkäkuljetus tai varastointi vedessä	
• puristamaton	70-85
• puristettu	55-62
Koivupuu	
• märkä kuorinta, puristamaton	65-70
• märkä kuorinta, puristettu	55-62
• kuiva kuorinta	40-50
TUKKIPUUN KUORI, havupuu, kuivakäsittely	40-50
märkäkäsittely	60-80
TUKKIPUUN KUORI, koivu	35-50

6.6.2 Puupolttoaineen tiheys

Kasvupaikalla, geneettisellä perimällä ja puun iällä on vaikutusta puun kuiva-tuoretiheyteen. Samoilla lajeilla, jotka kasvavat samalla paikalla saattaa olla rungon tiheyksissä eroja (taulukko 10) (Alakangas ym. 2016, 64).

TAULUKKO 10. Kuiva-tuoretiheyksien vaihteluita eri puulajien eri osissa (Alakangas ym. 2016, 64)

Puulaji	Kuiva-tuoretiheys, kg/m ³				
	Koko puu	Runkopuu	Oksat	Kanto	Kuori
Mänty	385	390-410	450	450	300
Kuusi	400	380-400	610	410	340
Koivu	475	490	530	510	550
Leppä	370	360-430	405-440		
Haapa	385	360	450		
Pyökki		575-625	750		

TAULUKKO 11. Polttoaineiden ominaisuuksia (Knuutila 2003, 34)

Polttoaine	Tiiviys m ³ /i-m ³	Tehollinen lämpöarvo. Kuivana (kosteus 0%)		Energiatiheys, kuiva (kosteus n. 40 %)		Energiatiheys, tuore hake (kosteus lehtipuu 47 %, havupuu 55 %)	
		kWh/kg	MJ/kg	Kwh/i-m ³	Mj/i-m ³	Kwh/i-m ³	Mj/i-m ³
KOKOPUUHAKE							
Mänty	0,42	5,4	19	820	3000	760	2700
Kuusi	0,41	5,4	19	810	3000	750	2700
Koivu	0,41	5,4	19	970	3500	940	3400
Leppä	0,43	5,3	19	770	2800	740	2800
HAKKUUTÄHDEHAKE							
Mänty neulasineen	0,42	5,6	20	870	3100	800	2900
Mänty neulasitta	0,42	5,6	20	880	3200	810	2900
Kuusi neulasineen	0,42	5,4	19	880	3200	810	2900
Kuusi neulasitta	0,42	5,5	20	990	3600	910	3300
KUORIMURSKE							
Mänty	0,37	5,4	19	510	1800	470	1700
Kuusi	0,37	5,5	20	670	2400	620	2200

Koivu	0,37	6,3	23	1190	4300	1160	4200
PILKE (pituus 33 mm)	Tiiviys $m^3/i-m^3/$ $m^3/p-m^3$	Tehollinen lämpö- arvo. Käyttökosteu- dessa (20 %)		Energiatiheys, (kosteus n. 20 %)		Energiatiheys, (kosteus n. 20 %)	
		kWh/kg	MJ/kg	Kwh/i- m^3	Mj/i- m^3	Kwh/i- m^3	Mj/i- m^3
Mänty	0,40/0,67	4,15	14,9	810	2900	1360	4900
Kuusi	0,40/0,67	4,10	14,8	790	2800	1320	4800
Koivu	0,40/0,67	4,15	14,9	1010	3600	1700	6100
Leppä	0,40/0,67	4,05	14,6	740	2700	1230	4400
Haapa	0,40/0,67	4,00	14,4	790	2800	1330	4800

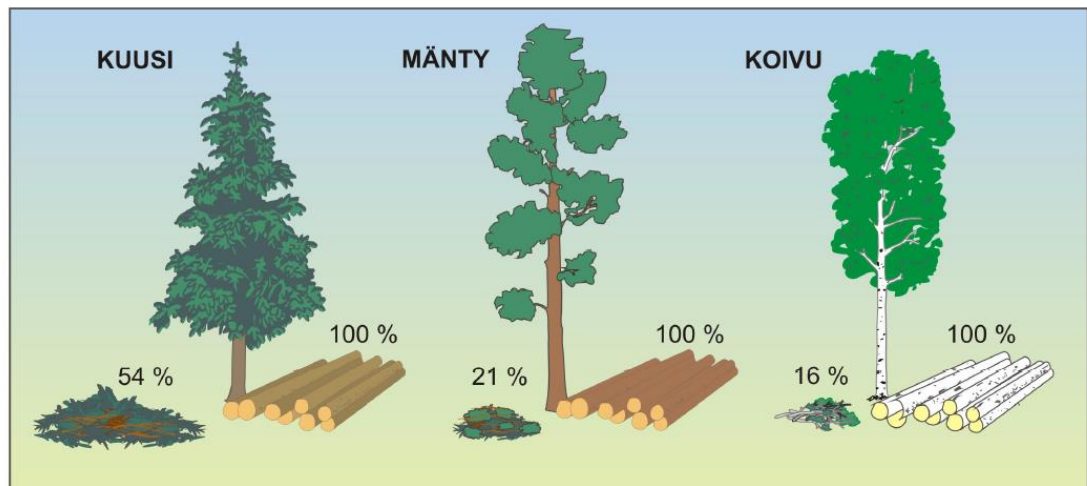
6.7 Hake ja murske

Hakkurilla kokopuusta, metsätähteestä, rangoista tai muusta puuaineesta tehtyä polttoainetta kutsutaan polttihakkeeksi. Voimalaitoksen murskaimella tai siirrettävällä murskaimella tehtyä polttoainetta kutsutaan murskeeksi. Hakkeita on erilaisia, karsituista puista tehdään rankahaketta, kokopuista saadaan kokopuuhaketta. Hakkuutähde hake tehdään latvoista ja oksista. Kannoista tehdään taas kantomursketta tai kantohaketta. Sahojen sivutuotteena saadaan haketta (Alakangas ym. 2016, 66).

Haketta käytetään voima- ja lämpölaitoksilla polttoaineena. Hakkeen kosteus on laatuominaisuuksista kaikkein tärkein. Hakkeen palakoko on normaalisti 30 – 40 mm. Myös mursketta käytetään voima- ja lämpölaitoksilla polttoaineena. Kun polttoaineen kosteus tunnetaan, on merkittävin epävarmuustekijä polttoaineen tiiveys. Tiiveys vaihtelee haketuksen, murskauksen ja kuljetustavan perusteella. Lisäksi tiiveyteen vaikuttaa palan muoto, palakoko, vuodenaika, puulaji, kosteus, oksat, kuormausmenetelmä ja painuminen. Hakkeen tiiveydellä tarkoitetaan, kuinka paljon tulee kiintokuutioita yhdestä irtokuutioista. Jos hakkeeseen sekoitetaan sahanpurua, sen tiiveys kasvaa. Jotkut puulajit, jotka ovat hauraita, sisältävät enemmän hienojaetta joka lisää hakkeen tiiveyttä. Tällainen puulaji on esimerkiksi harmaaleppä. Tuoreet oksat ja norjista lehtipuunoksista syntyy haketuksessa ylipitkiä kappaleita. Tämä alentaa hakkeen tiiveyttä. Raaka-aineen kuivuminen lisää hakkeen tiiveyttä. Jäätynyt raaka-aine tekee raaka-aineesta haurasta, joten se tekee hakkeesta hienojakoisempaa. Tämän takia jäätyneestä puusta tehty hake on tiiviimpää (Alakangas ym. 2016, 67 -68).

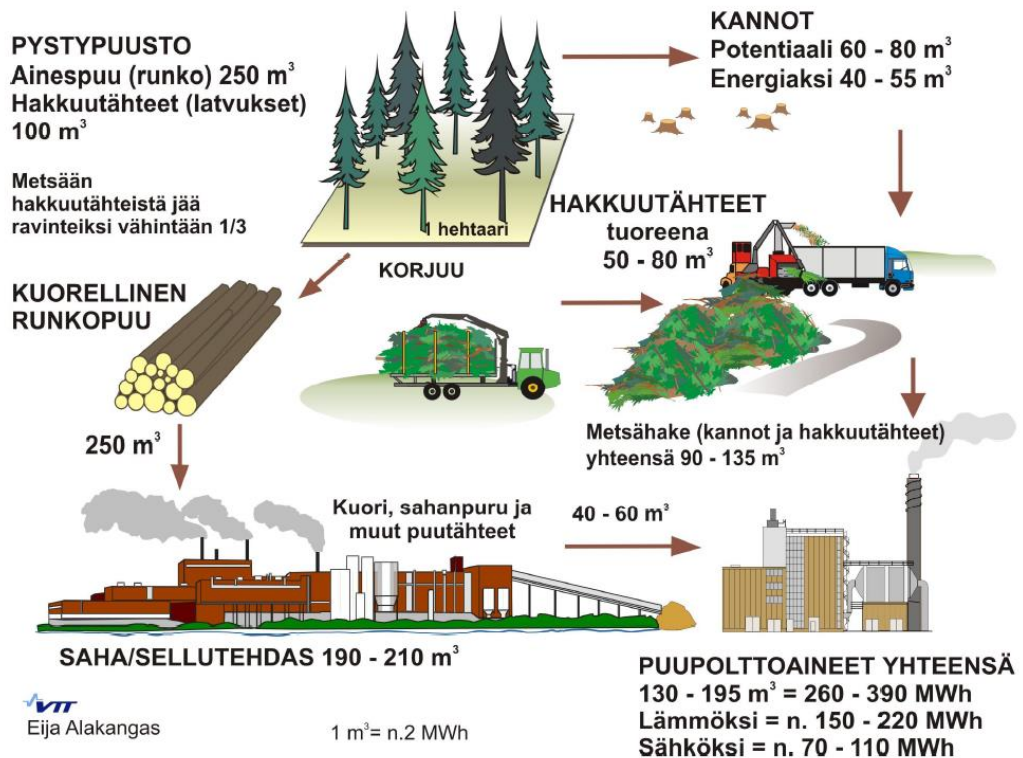
6.7.1 Hakkuutähteet

Polttoaineiden tuotannossa hakkuutähteellä on merkittävä osuus (kuva 28). Yleisin korjuu tapa hakkuutähteelle on tienvarsihaketuksen perustava tuotantomenetelmä (n. 76 %). Toinen tapa on paalata hakkuutähteet ja kuljettaa ne suoraan laitokselle murskaukseen (kuva 29). Hakkuutähdettä kerätään pääasiassa sellaisilta alueilta, jotka ovat kuu-sivaltaisia eli Etelä- ja Keski-suomesta (Alakangas ym. 2016, 68 -69).



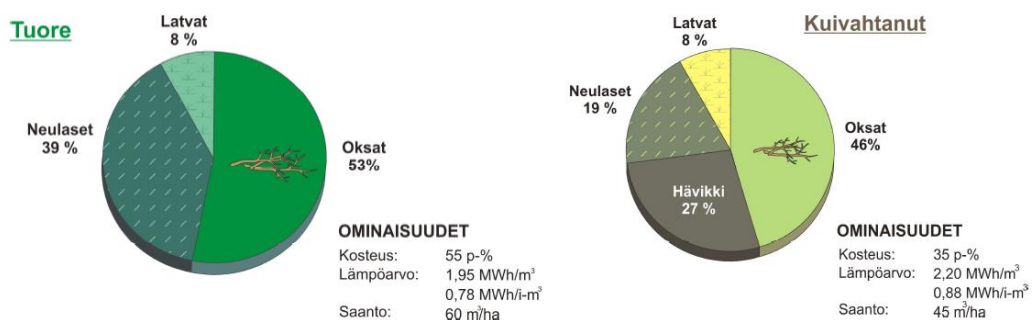
KUVA 28. Tuoreen puun biomassakertymä (Alakangas ym. 2016, 70)

Hakkuutähteen kosteus voi laskea jopa 50- 60 %:sta 20 – 30 %:iin, jos sen annetaan kuivua hakkuupalstalla pari kesäkuukautta. Kuivuminen aiheuttaa sen, että neulaset ja lehdet variset pois, ohuet oksat katkeilevat ja kuorikin voi irrota osittain. Neulasten varisemisen myötä hakkuutähteen määrä pienenee jopa 20 – 30 %, mutta toisaalta kosteuden laskiessa puuainepitoisuus kasvaa. Kuivuneen hakkuutähteen määrä, mitä saadaan talteen, on noin 45 % (kuva 30). Tuoreella hakkuutähteellä määrä on suurempi (Alakangas ym. 2016, 70).



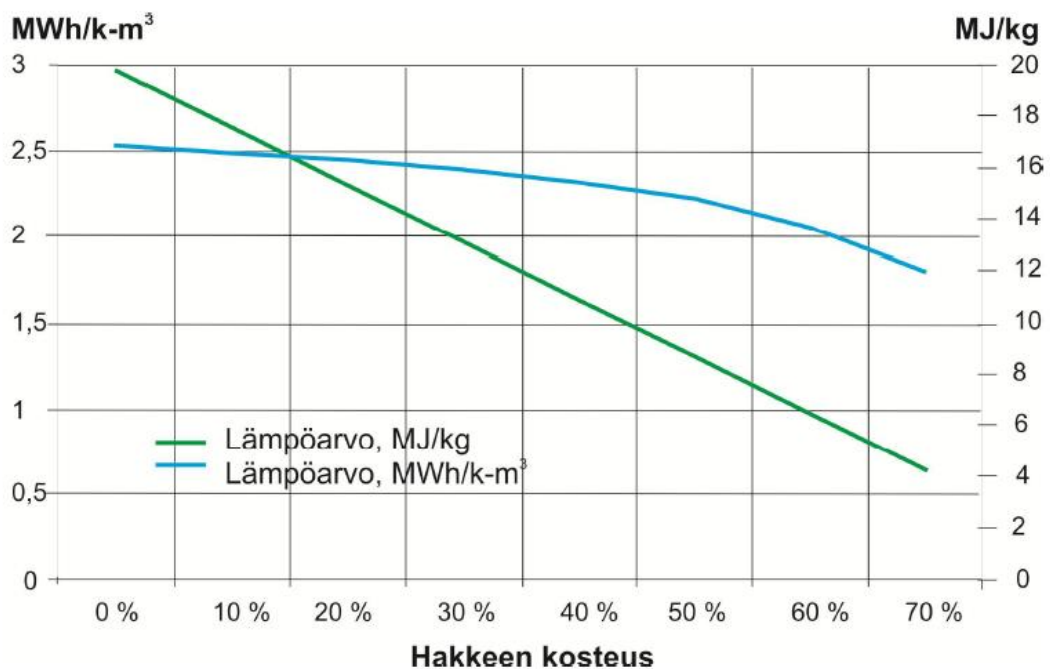
KUVA 29. Kuusen keskimääräinen ainespuun ja energiapuun määrä hehtaarilta (Alakangas ym. 2016, 70)

Tiheys, kosteus, tehollinen lämpöarvo laitoksella ja palakokojakauma ovat tärkeimpiä käytönteknillisiä laatuominaisuuksia hakkuutähdehakkeelle. Koska veden höyrystyminen vaatii energiaa, hakkeen kosteus vaikuttaa polttoaineen teholliseen lämpöarvoon (kuva 31). Hakekuution sisältämän kuivamassan kasvaessa ja kosteuden pienentyessä laitoksen energiahyöty kasvaa (Alakangas ym. 2016, 71).



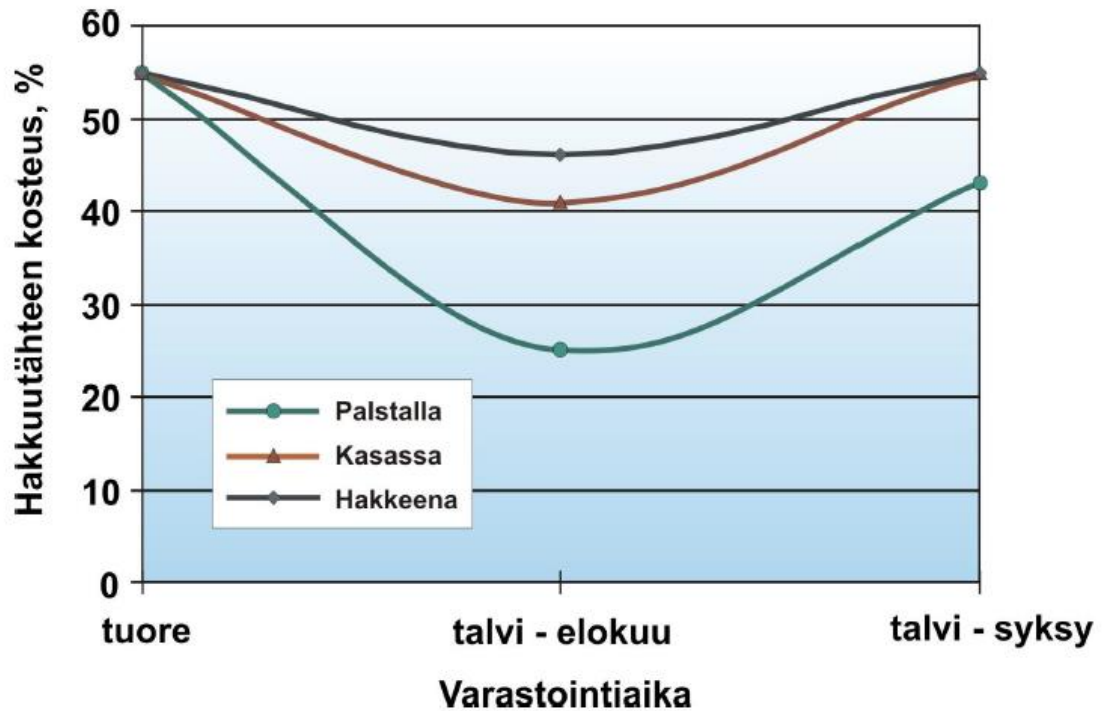
KUVA 30. Kuusihakkeen ominaisuudet tuoreena ja kuivahtaneen (Alakangas ym. 2016, 71)

Latvuksen pääkomponentit ovat lehdet ja neulaset. Etelä-Suomessa neulasten osuus männyissä 26 % ja kuusissa 39 %. Männyn neulasten lämpöarvo (21,04 MJ/kg) on suurempi, kuin muun latvusmassa (20,09 MJ/kg), johon lasketaan oksat. Kuusella taas neulasten (19,19 MJ/kg) ja oksien (19,41 MJ/kg) lämpöarvojen ero on pieni. Neulasten varisemisen myötä männyllä on suurempi vaikutus lämpöarvoon, kuin kuusella. Vaikka hakkuutähteen nettolämpöarvo laskee neulasten varisemisen myötä, pysyy kuiva-aiheen keskimääräinen tehollinen lämpöarvo samana, koska varastoinnin aikana hiilen ja vedyn suhde pysyy lähes samana. Tällöin ainoa merkittävä vaikuttava tekijä teholliseen lämpöarvoon on kosteus. Palakooltaan ja kosteudeltaan hakkuutähdehake on epähomogeenista. Palakokoon vaihteluun vaikuttaa haketustapa, raaka-aine, hakkurin terien kunto ja seulan reikäkoko. Runkopuusta saadaan tasaisempaa palakokoa. Murskaimella tehtävä hake on karkeampaa, kuin hakkurilla tehtävä hake (Alakangas ym. 2016, 71–72).



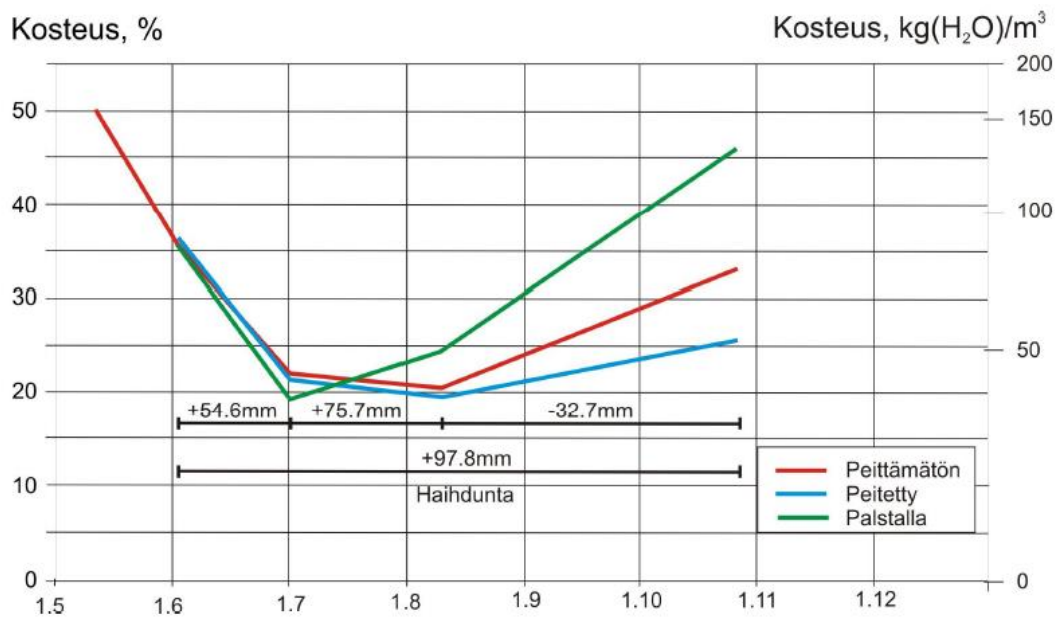
KUVA 31. Hakkeen tehollisen lämpöarvon riippuvuus kosteudesta (Alakangas ym. 2016, 71)

Tuoreen hakkuutähteen kosteus on 50 – 60 % koko hakemäärän massasta, kun taas siitä tuotettavan hakkeen kosteus on 25 – 65 % riippuen vuodenajasta ja varastoinnista (kuva 32). Kesällä hakkeen kosteus voi olla alle 30 %:ia. Talvella kosteus voi olla jopa 65 %, koska hakkeen joukkoon joutuu lunta ja jäätä (Alakangas ym. 2016, 73).



KUVA 32. Hakkuutähteen kosteus palstalla, kasassa ja hakkeena (Alakangas ym. 2016, 74)

Kosteus vaikuttaa hakkeen energiatiheyteen, joka on käytännössä 0,6 – 1,0 MWh/i-m³. Hakkuutähteen varastokasojen peittäminen paperilla on varsin yleistä. Paperi suojaa kassaa kastumiselta, joten haketus voidaan tehdä huonollakin säällä. Paperilla suojatun hakkuutähteen kosteus on 7-10 % alhaisempi, kuin suojaamattoman hakkuutähteen (kuva 33). Haketta ei pitäisi varastoida pienissä varastokasoissa, sillä ne voivat kastua sateen takia läpikotaisin. Pienillä varastokasoilla tarkoitetaan alle 200 i-m³ kasoja. Jos hake voidaan sijoittaa katettuun varastoon, voidaan suhteellisen kuivaa (< 30 %) haketta varastoida koko lämmityskauden (Alakangas ym. 2016, 73).



KUVA 33. Hakkuutähteen kosteus palstalla, peitettyssä ja peittämättömässä aumassa (Alakangas ym. 2016, 74)

Lämpö- ja voimalaitosten polttoaineen vastaanotto, poltto- ja kuljetinlaitteissa on eroja, joka asettaa hakkeelle tietyt laatuvaatimukset. Tärkeimpiä laatuvaatimuksia ovat palakokojakauma ja hakkeen kosteus. Jos hake on kovin tikkumaista, voi se aiheuttaa polttoaineen holvaantumista ja tukoksia kuljetinjärjestelmään. Suuriin monipolttoainelaitoksiin soveltuu kostea hakkuutähdehake läpi vuoden, mikäli laitos on suunniteltu määrälle puupolttoaineelle. Polttoturpeelle mitoitettussa kaukolämpölaitoksessa ei voi talvisaikaan polttaa pelkkää hakkuutähdehaketta, koska hakkeella ei saavuteta tarvittavia tehoja. Talvella märkä hakkuutähde voi jäätyessään aiheuttaa holvautumista kuljettimissa ja siiloissa. Kosteus vaikeuttaa myös polttoaineen sekoittumista. Esimerkiksi kostea hake ja lämmin turve sekoittuvat keskenään huonosti. Kostea hake voidaan käyttää pienemmillä lämpölaitoksilla kesäaikaan, jolloin tarvittava tehon määrä on pienempi ja polttoaineen jäätymisvaaraa ei ole (Alakangas ym. 2016, 73–74).

6.7.2 Kokopuu- ja rankahake

Pienemmissä lämpölaitoksissa käytetään kokopuuhaketta, joka valmistetaan karsimattomista rangoista. Nämä rangat ovat joko hukkarankapuuta tai teollisuudelle kelpaamatonta pienpuuta. Pienpuilla tarkoitetaan vajaatuottoisia metsiä, taimikoita tai ensiharvennuksia. Rankapuu valmistetaan runkopuusta, joka on karsittu ja se on suurin pienpuuhakkeen lähde. Pienemmissä kaukolämpökeskuksissa käytetään tällä hetkellä eniten

kokopuuhaketta, koska laatuvaatimukset ovat tiukemmat kuin suuremmissa laitoksissa (Alakangas ym. 2016, 75–76).

6.7.3 Kuori ja kannot

Puunkuori muodostuu sisäkuoresta eli nilasta ja ulkokuoresta. Kuoren ja puun välissä on jälsi, joka tuottaa sisäpuolelle puuainesta ja sisäpuolelle sisäkuorta, jota pitkin puu kuljettaa yhteyttämistuotteita latvuksesta runkoon ja juuriin. Ulkokuori sisältää kaarnaa ja tuohta. Kuoren osuus runkokuusta on 10 – 20 %. Pienissä oksissa kuoren osuus voi olla jopa 60 %. Kuoren osuus lasketaan runkokuusta kokonaismassasta tai – tilavuudesta (Alakangas ym. 2016, 81).

Kuoren lämpöarvo on korkea, koska se sisältää paljon ligniiniä. Lämpöarvo on lähes sama rungon eri alueilla (taulukko 12). Eri puulajien kuoren lämpöarvo vaihtelee huomattavasti. Lehtipuiden kuoren lämpöarvo on korkeampi, kuin havupuiden. Haavan kuoren lämpöarvo on kuitenkin alhaisempi kuin männyllä. Se on samaa luokkaa, kuin kuusella. Lehtipuiden ulkokuoren lämpöarvot ovat keskimäärin 20 - 32 MJ/kg ja sisäkuoren 19 – 20 MJ/kg. Tehollinen lämpöarvo puun rungon kuoressa on suurempi, kuin oksien kuoressa. Lämpöarvot vaihtelevat puun koon ja puulajien mukaan. Myös kasvupaikalla on merkitystä kuoren lämpöarvoon (Alakangas ym. 2016, 81–82).

TAULUKKO 12. Tehollinen lämpöarvo eri puulajeilla (Alakangas ym. 2016, 77)

Puulaji	Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg	
	Ranka	Kokopuu
Mänty	19,33	19,53
Kuusi	19,02	19,29
Hieskoivu	19,19	19,30
Rauduskoivu	19,15	19,21
Harmaaleppä	19,00	19,18
Tervaleppä	19,31	19,31
Haapa	18,65	18,65

Kosteus- ja tuhkapitoisuudet heikentävät kuoren polttoaineominaisuuksia. Yleisesti puun kuorta käytetään metsäteollisuuslaitosten ja lämpökeskusten polttoaineena. Puunjalostusteollisuuden sivutuotteena kuori on pääosin havupuiden kuorta. Kuoren polttoaineominaisuuksia voidaan parantaa kuivaamalla, puristamalla tai sekoittamalla kuorta muun polttoaineen sekaan. Kuoren kuivaus voidaan tehdä lämmön avulla tai mekaani-

sesti kuoripuristimella. Lämpökuivaus on harvinaisempi tapa ja se vaatii suuria laitoksia, kuivaukseen käytetään halpoja jätelämpöjä tai savukaasuja (Alakangas ym. 2016, 82).

TAULUKKO 13. Ensiharvennusmännyn eri osien tehollinen lämpöarvo ja tuhkapitoisuus (Alakangas ym. 2016, 78)

Puun osa	Tehollinen lämpöarvo			Tuhka	
	Kuiva-aineessa, MJ/kg	40 % kosteudessa, MWh/m ³	50 % kosteudessa, MWh/m ³	% kuiva-aineessa	kg/m ³ puuta
RUNKO					
Kuoretonpuu	19,31	1,95	1,86	0,4	1,6
Kuori	19,53	1,32	1,26	2,55	6,8
Kuorellinen puu	19,33	1,86	1,78	0,62	2,3
OKSAT					
Kuorellinen puu	20,23	1,97	1,89	1,03	3,9
Neulaset	21,00	2,01	1,92	2,35	8,8
Elävä latvus	20,49	1,99	1,90	1,48	5,6
Koko latvus	20,38	2,02	1,93	1,25	4,9
KOKO PUU	19,56	1,89	1,81	0,76	2,9

Kantoja käytetään myös energiantuotannossa. Kannot yleensä murskataan, koska ne ovat sitkeitä ja näin ollen vaikeita hakettaa. Kantohakkeen kosteus on noin 35 % ja tuhkapitoisuus 3,8 – 13 %, jos mukaan on joutunut maa-ainesta. Mäntykannoilla on suurin tehollinen lämpöarvo noin 22,36 MJ/kg (taulukko 14), koska kannoissa uuteaineiden määrä on suuri, 18 - 20 %. mäntykantojen kosteus on noin 20,9 – 33,7 % (taulukko 13). Kantomurskeelle on tyypillistä paksut palat yli 8 mm läpimittaiset kappaleet (Alakangas ym. 2016, 83–84).

TAULUKKO 14. Juuren ja kantojen eri osien tehollisia lämpöarvoja MJ/kg (Alakangas ym. 2016, 84)

Puulaji	Juuren puuaines	Juuren kuori	Koko juuri	Kanto	Kanto ja juuri
Mänty	19,32	20,43	19,51	22,36	21,02
Kuusi	19,33	19,55	19,38	19,18	19,32
Hieskoivu	18,60	19,65	18,84	18,61	
Rauduskoivu	18,50	20,18	18,97	18,50	
Harmaaleppä	18,83	20,38	19,28	19,27	
Tervaleppä	18,93	19,66	19,17	18,91	
Haapa	18,30	19,73	18,78	18,32	

6.7.4 Sahapuru ja kutterinlastu

Sahanpurua saadaan puutavaran sahauksen sivutuotteena. Sahanpuru on yleensä märkää ja ilmavaa tavaraa, jonka kosteus voi vaihdella ilmakeivasta 70 %:iin (taulukko 15). Sahanpurua poltetaan metsäteollisuuden- ja lämpölaitosten muiden polttoaineiden joukossa. Kutterinlastu on konehöyläyksessä syntyvää puutähdettä, joka on niin kuivaa ja kevyttä ettei sitä voi sellaisenaan polttaa, vaan sekin sekoitetaan muihin raskaampiin ja kosteampiin polttoaineisiin. Sahanpurusta ja kutterilastusta voidaan valmistaa myös pellettejä ja brikettejä (Alakangas ym. 2016, 85).

TAULUKKO 15. Sahanpurun ja kutterinlastun keskimääräisiä ominaisuuksia (Alakangas ym. 2016, 86)

Ominaisuus	Sahanpuru	Kutterinlastu
Tyypillinen kosteus, %	50 - 55	5 - 15
Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo, MJ/kg	18,9 - 19,2	18,9
Kuiva-tuoretiheys, kg/m ³	380 - 480	380 - 480
Kostean polttoaineen tiheys, kg/i-m ³	250 - 300	80 - 120
Energiatiheys, MWh/i-m ³	0,4 - 0,7	0,5
Tuhkapitoisuus, p-% kuiva-aineessa	0,4 - 1,1	0,4

6.7.5 Puubriketti

Suomessa puubrikettejä käytetään lämpölaitosten arinakattiloissa. Puubriketit valmistetaan kutterinlastusta, kuivasta purusta ja hiontapölystä puristamalla. Puun ligniini pitää puristeen kasassa, joten sideaineita ei tarvita. Briketit ovat yleensä lieriömäisiä tai neliön muotoisia, joiden koko on minimissään 50 – 75 mm. Brikettien raaka-aineeksi käy kaikki kuivat, palavat aineet, joiden kosteus on alle 15 %. Briketit ovat raskasta ja kuivaa polttoainetta Termisesti käsiteltyjen biomassapolttoaineiden tärkeimpiä ominaisuuksia ovat mekaaninen kestävyys, suuri energiatiheys ja jauhattavuus. Lisäksi ne imevät heikosti nestettä. Pellettien kosteudet ovat 1 – 9 % välillä (Alakangas ym. 2016, 102 - 103).

6.7.6 Kierrätyspuu

Käytöstä poistettu puu eli kierrätyspuuta käytetään noin miljoona kiintokuutiometriä vuodessa. Kun puutuotetta ei voida enää kierrättää, voidaan sitä hyödyntää energian-

tuotannossa. Käytöstä poistettu puu luokitellaan alla olevan taulukon mukaisesti (taulukko 16). Puu, joka ei sisällä puunkyllästysaineita kuuluu kierrätyspolttoaineisiin (Alakangas ym. 2016, 103 - 104).

TAULUKKO 16. Kierrätyspuun luokittelu eri laatuluokkiin (Alakangas ym. 2016, 104)

Luokka	Käytöstä poistetun puun raaka-aineet	Jätteenpoltoasetuksen soveltaminen
A	1.1 Luonnon- ja istutusmetsän puubiomassa sekä muu luonnonpuu 1.2.1 Kemiallisesti käsittelemätön teollisuuden puutähde 1.3.1 Kemiallisesti käsittelemätön käytöstä poistettu puu tai puutuote 1.1.7 Sekalainen puubiomassa maisemanhoidosta, puistoista, puutarhoista, hedelmätarhojen karsimisesta sekä makean veden uppotukit	
B	1.2.2 Kemiallisesti käsitelty puutähde, kuitutähde ja rakenneosat 1.3.2 Kemiallisesti käsitelty käytöstä poistettu puu tai puutuote	Ei sovelleta
C	Sisältää puuta, jonka pinnoitteessa tai puunsuoja-aineessa on orgaanisia halogeeniyhdisteitä (esim. PVC), mutta ei sisällä puunkyllästysaineita (ei ole painekyllästettyä, ei ole kestopuuta) tai jonka alkuperän toteaminen on hankalaa. Myös purkupuuta kuuluu tähän luokkaan, ellei toisin todisteta (esim. analyysin).	Sovelletaan
D	Vaarallinen jäte sisältää puuta, joka on käsitelty puunkyllästysaineilla.	

Käytöstä poistettu puu voidaan luokitella niissä esiintyvien epäpuhtauksien perusteella kemiallisesti ja mekaanisesti epäpuhtaisiin puihin. Mekaaniset epäpuhtaudet on yleensä mahdollista erottaa raaka-aineesta tuotantoprosessin aikana tai lajittelulla. Mekaanisia epäpuhtauksia ovat muovit, metallit, lasit maa-aines, kivet ja betoni. Metallit on mahdollista erotella raaka-aineesta metallinerottimella eli magneetilla tai metallinilmaisimella. Kivet voidaan erotella seulomalla. Kemialliset epäpuhtaudet ovat vaikeasti erotettavissa puuraaka-aineesta, koska ne ovat yleensä osa puumateriaalia. Kemiallisiin epäpuhtauksiin luetaan maalit, liimat, pinnoitteet ja puunsuoja-aineet. Fysikaalisten ja kemiallisten ominaisuuksien (taulukko 17) analysointia ei tarvita, riittää informaatio voida tietää polttoaineen alkuperästä (Alakangas ym. 2016, 105).

Kierrätyspuuta, joka kuuluu luokkaan A, voidaan käyttää kaikissa kattilalaitoksissa. Luokan B kierrätyspuuta voidaan käyttää laitoksissa, joissa on riittävä viipymäaika ja lämpötilataso, savukaasujen puhdistus ja palamisilman hallinta. Lisäksi palamisen hyvyttä on pystyttävä tarkkailemaan. Luokan B kierrätyspuuta suositellaan käytettävän yhdessä muiden polttoaineiden kanssa, seospolttoaineena. Kattilan teho on oltava vähintään 20 MW. Nykyään uusissa yli 5 MW laitoksissa polttotekniikan taso on edellä olevan vaaditun tasoinen (Alakangas ym. 2016, 106).

TAULUKKO 17. Kierrätyspuun ominaisuuksia (Alakangas ym. 2016, 107)

Ominaisuus	Liimapuu	Lastulevy	Vanerinsyrjä			MDF-levy	Kreosoottikyllästetty puu	CCA-kyllästetty kierrätyspuu
			1	2	3			
Kosteus %	13,5		21,9	8,6		4,7		
Tehollinen lämpöarvo MJ/kg k.a.	18,3	18,6	19,1	19,08		18,7	19,8	18,9

TAULUKKO 18. Huonekalupuun ominaisuuksia (Alakangas ym. 2016, 107)

Polttoainenäyte	Lastulevypitoinen puru	Lastulevypuru	Kutterinlastupuruseos
Kosteus %	7,5	5,8	22,2
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg k.a.	18,4	18,6	19,0

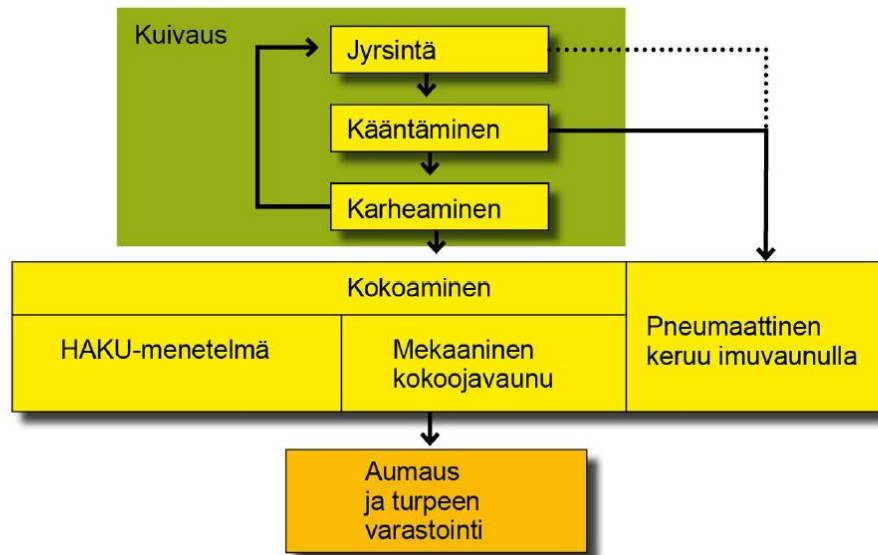
6.8 Turve

Turvetuotantoalasta suurin osa menee energiantuotantoon. Turpeen tuotantoon soveltuvien soiden energia on 6 400 TWh, josta on käytetty mahdollisesti noin 500 – 600 TWh eli jäljellä on noin 5 800 TWh. Suokuutiosta saadaan energiaa 0,54 MWh. Turvetuotantoon soveltuva suopinta-ala on 1,2 miljoonaa hehtaaria. Soiden soveltuvuuteen turvetuotannossa vaikuttaa turpeen paksuus, pohjamaalaji, turvelaji, pinnan ja pohjan korkeus, turpeen tiheys, lämpöarvo, tuhka- ja rikki- ja raskasmetallit. 2010-luvulla turvetta käytettiin 14,4 – 26,3 TWh vuodessa. Turpeen käytön tavoitteeksi on linjattu 20 TWh (Alakangas ym. 2016, 116–117).

6.8.1 Jyrsinturve

Yli 90 % energiaturpeen tuotannosta tulee jyrsinturpeesta. Eri tuotantomenetelmät eroavat toisistaan kokoamisvaiheen aikana (kuva 34). Tuotannon päävaiheet ovat jyrsintä,

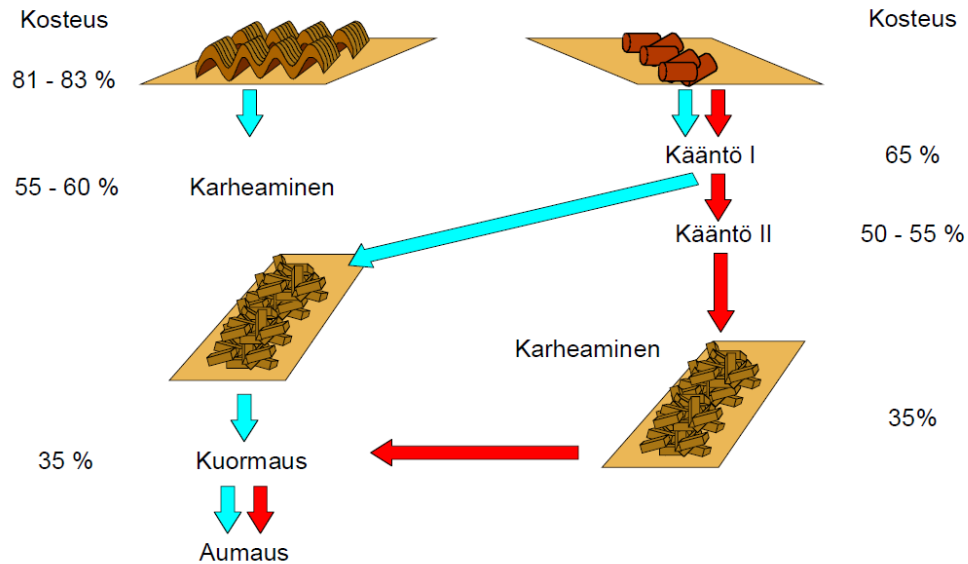
kääntäminen, karheaminen ja kokoaminen. Turvekentän pinnasta irrotetaan ohut kerros kuivaamista varten. Kuivaus hoidetaan auringon säteilyenergialla. Jyrsintä vaiheessa raekoon suurentaminen nopeuttaa kuivumista Jyrsinturvetta käytetään voima- ja lämpölaitoksissa. Viime vuosina turpeen merkitys seospolttoaineena on kasvanut (Alakangas ym. 2016, 117).



KUVA 34. Jyrsinturpeen tuotantomenetelmä (Alakangas ym. 2016, 117)

6.8.2 Palaturve

Palaturpeen tuotantomenetelmä aloitetaan palaturvekoneella, jolla jyrsitään kenttään ura, josta irronnut turvemassa muokataan, puristetaan ja tiivistetään palaturpeeksi kentälle kuivumaan (kuva 35). Yleisimmät palamuodot ovat lainepala tai lieriöpala. Palaturve kuivataan yleensä 35 % kosteuteen, joskus jopa kuivemmaksikin. Karheuskuivausmenetelmä parantaa palaturvetuotannon edellytyksiä huonoissa sääoloissa, joten palaturvetuotanto ei ole niin riippuvainen säistä kuin jyrsinturvetuotanto. Palaturvesatoja saadaan vuodessa 1- 3 kappaletta. Palaturvetta käytetään voima- ja lämpölaitoksissa polttoaineena (Alakangas ym. 2016, 118).



KUVA 35. Palaturpeen tuotantomenetelmä (Alakangas ym. 2016, 119)

6.8.3 Turve polttoaineena

Turve muodostuu kuolleista kasvin osista, jotka ovat maatuneet hyvin kosteissa olosuhteissa. Kasvien jäänteet eivät hajoa kunnolla, koska ne sijaitsevat paikassa jossa on runsaasti vettä ja happimäärä on vähäinen. Näin syntyy turvekerrostuma, joka sisältää maatumattomia ja huonosti maatuneita karkeita kasvinosia. Turpeen fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet on hyvä tietää, jos turvetta käytetään energiatuotannossa (taulukko 19). Tärkeimpiä ominaisuuksia ovat kosteus ja lämpöarvo sekä polttoaineen käsittelyyn vaikuttava palakoko ja tiheys. Turpeen varastointi- ja kuljetusmenetelmillä on suuri vaikutus turpeen laatuun. On pyrittävä välttämään polttoaineen laatua heikentäviä toimia. Laatua heikentää kosteuden imeytyminen palaturpeeseen tai pelletteihin, kivet, multa, metallikappaleet, muovit, jää ja lumi. Polttoaineen määrä mitataan voimalaitoksen autovaa’alla ja kosteus määritellään yleensä polttoainenäytteestä laboratoriossa (Alakangas ym. 2016, 119).

TAULUKKO 19. Jyrsin- ja palaturpeen keskimääräisiä ominaisuuksia (Alakangas ym. 2016, 122)

TURVE	JYRSINTURVE			PALATURVE		
Lähde	VTT	Ekono	Vapo	VTT	Ekono	Vapo
Kosteus, p-%	48,5	47,1	45,9	38,9	39,5	35,3
Tiheys saapumistilassa, kg/m ³		330	313		385	346
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg	9,6	9,9	9,8	11,9	11,9	11,9

TAULUKKO 20. Maatumisasteen vaikutus turpeen koostumukseen sekä hiilen, vedyn, typen ja hapenpitoisuuteen p-% kuiva-aineessa (Alakangas ym. 2016, 120)

Aineosa	Vähän maatonut H1-2	Keskimaatonut H5-6	Maatonut H9-10
Selluloosa	15-20	5-15	-
Hemiselluloosa	15-30	10-25	0-2
Ligniini ja sen kaltaiset aineet	5-40	5-30	5-20
Humusaineet	0-5	20-30	50-60
Bitumi (vahat ja hartsit)	1-10	5-15	5-20
Tyypipitoiset aineet (proteiiniksi laskettuna)	3-14	5-20	5-25
Hiili, C	48-50	53-54	58-60
Vety, H	5,5-6,5	5,0-6,0	5,0-5,5
Typpi, N	0,5-1,0	1,0-2,0	1,0-3,0
Happi, O (laskettuna)	38-42	35-40	30-35

Turve on hyvin reaktiivista, jonka takia turve syttyy helposti palamaan. Turve onkin kuivana ja hienojakoisena räjähdysherkkää, siksi turpeen käyttöön liittyy pölyräjähdys- ja tulipalovaara. Turve aiheuttaa myös korroosioita, koska se on hapanta (pH 5 – 6) (Alakangas ym. 2016, 121).

TAULUKKO 21. Jyrsin- ja palaturpeen alkuainepitoisuudet kuiva-aineessa (Alakangas ym. 2016, 122)

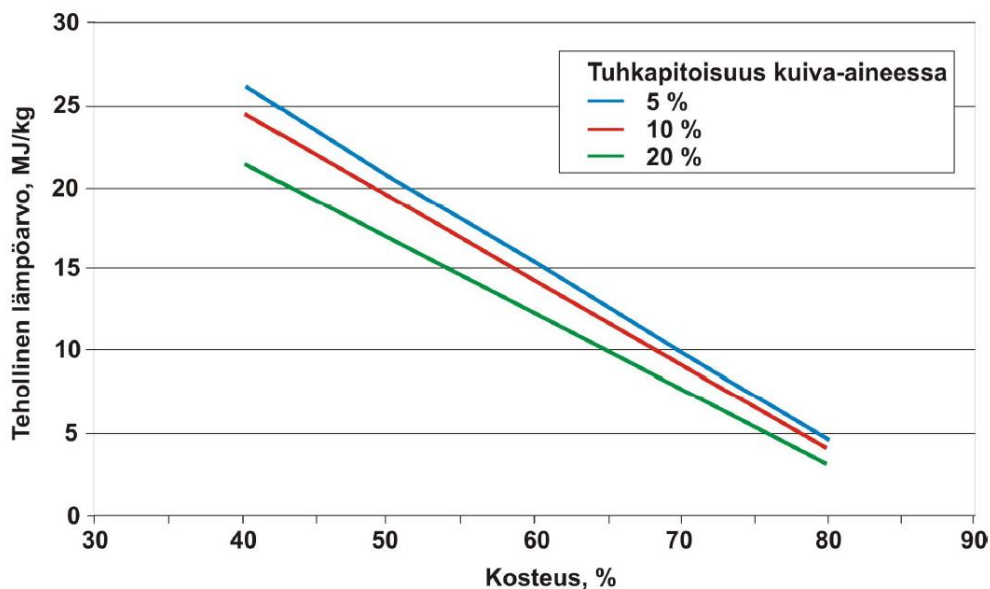
Polttoaine	Hiili, C	Vety, H	Typpi, N	Happi, O	Rikki, S
Jyrsinturve	53,73	5,58	1,69	32,97	0,22
Palaturve	55,70	5,80	2,18	32,53	0,18

6.9 Lietteet

Yhdyskuntien jätevedenpuhdistamoilla, teollisuudessa ja maataloudessa syntyy lietettä. Esimerkiksi vuonna 2014 syntyi metsäteollisuuden lietettä 537 000 tonnia, josta energiakäyttöön hyödynnettiin 332 000 tonnia. Lietteelle suositaan hyötykäyttöä, jolloin sitä voidaan käyttää hyödyksi joko aineena tai hyödyntämällä niiden energiasisältöä. Metsäteollisuudesta syntyvää lietettä voidaan polttaa tai valmistaa siitä lannoitetta. Maatalouden ja jätevedenpuhdistamojen lietettä voidaan tuottaa biokaasua, jota voidaan hyödyntää sähkön ja lämmön tuotossa (Alakangas ym. 2016, 165).

Primääriliete eli kuitu- tai esiselkeytysliete syntyy esiselkeytyksessä laskeutumalla. Primäärilietteet, jotka syntyvät metsäteollisuuden sivutuotteena sisältävät kuitu-, kuori-,

täyte- ja lisäaineita ja pigmenttejä. Lietteen laatu riippuu tuotantoprosessista (taulukko 22). Hienopaperitehtailla lietteen tuhkapitoisuus on 50 – 60 % ja sellutehtailla 5 – 20 %. Lietteen tehollinen lämpöarvo on käyttökosteudessa 4 – 6 MJ/kg ja kosteus 60 – 65 %:ia (kuva 37) (Alakangas ym. 2016, 165).



KUVA 37. Lietteen lämpöarvo käyttökosteudessa (MJ/kg) lietteen kosteuden ja tuhkapitoisuuden funktiona (Alakangas ym. 2016, 166)

Bioliete syntyy biologisessa jäteveden puhdistuksessa. Metsäteollisuuden bioliete on samanlaista, kuin yhdyskuntien puhdistamoliete. Liete sisältää mikrobimassan lisäksi puun eri uuteaineita, ligniiniyhdisteitä ja adsorboituja klooriorgaanisia yhdisteitä. Tuhkapitoisuus on 5 – 50 % ja biomassan osuus biolietteessä on 65 – 75 %. Ongelmallista on biolietteen sisältämät epäpuhtaudet (Alakangas ym. 2016, 165).

Metsäteollisuuden kuorimoissa syntyy monenlaisia lietteitä, joita käsitellään kuoripuristimissa ja selkeyttimien liete vedenerottimissa. Tällaisia lietteitä ovat kuoriliete, hiekanerottimen liete ja selkeyttimen liete. Liete poltetaan kuorikattilassa tai viedään kaatopaikalle. Kuorilietteen määrä vaihtelee välillä 0,5 – 8 kg/puu-m³, jonka määrään vaikuttaa kuorintatapa, puulajista, ajotavasta ja puun varastoinnista (Alakangas ym. 2016, 165).

Keräyspaperin siistausprosessi syntyy siistauslietettä, jossa jät-paperista poistetaan painomuste, päällysteaineet ja täyteaineet. Ylimääräisten aineiden poiston jälkeen jäljelle jää uusiokuitu. Siistausliete on pääosin tuhkaa ja kuitua ja sitä syntyy 50 – 205

kg/tonni. Keräyspaperin laatu vaikuttaa lietteen määrään. Keskimääräinen siistauslietteen kuiva-ainepitoisuus on 40 % ja tuhkapitoisuus 30 – 60 % riippuen siistaustavasta ja raaka-aineena käytettävän paperin laadusta. Suurimmillaan tehollinen lämpöarvo voi olla 15 MJ/kg (Alakangas ym. 2016, 165).

TAULUKKO 22. Erilaisten lietteiden ominaisuuksia (Alakangas ym. 2016, 166)

Ominaisuus	Sellutehtaan sekaliete	Primäärliete	Paperitehtaan sekaliete	Bioliete	Siistausliete	Kuorimonliete
Kosteus %	75-80	70		85	60	70
PITOISUUS KUIVA-AINEESSA, %						
Tuhka	16-21	0,4	12-20	16	30-60	2,5
Hiili, C	40-42	44	44-46	47	25-45	50
Vety, H	4,5-5,0	6	5,5-6,0	5,2	4-5,5	6
Rikki, S	0,4-0,9	0,1	0,05-0,1	1,2	0,1-0,3	0,02
Typpi, N	1,3-1,6	0,4	0,5-0,7	1,6	0,1-0,3	0,8
Happi, O	25-29	25		30	22	34
Kloori, Cl	0,1-0,6		0,0-0,1		0,2-0,6	
Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg	14-16	13,5		17,4	8-13	3,0
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg	9,3	2,3		0,5	2,9	

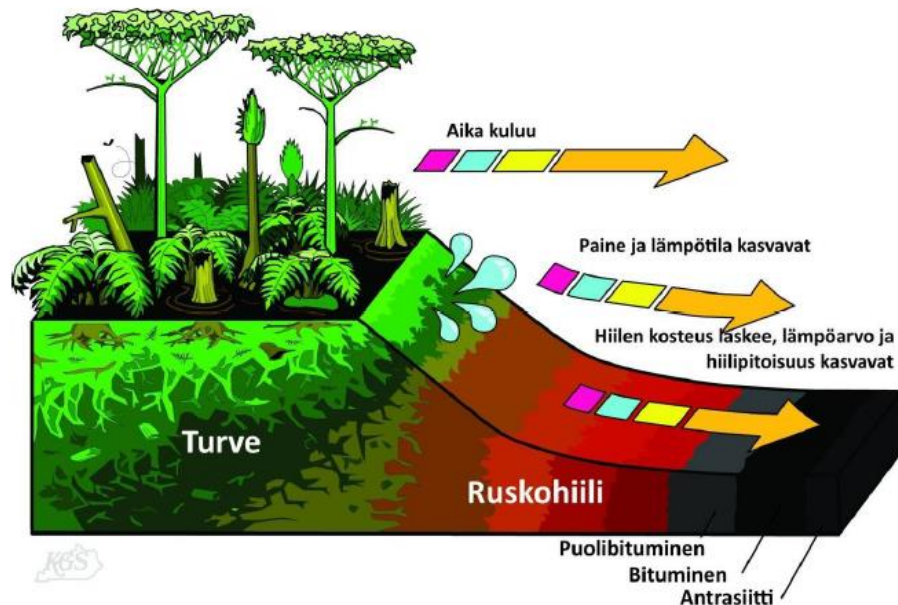
Lietettä voidaan polttaa leijupetikattiloissa, soodakattiloissa, rumpu-uuneissa, masapolttolaitoksissa ja arinakattiloissa. Lietettä voidaan myös kaasuttaa sekoitettuna pääpolttoaineeseen tai sellaisenaan. Lietettä poltetaan yleisimmin leijupetikattiloissa muiden polttoaineen joukossa. Lietteiden osuus on yleensä alle 10 % polttoainetehosta (Alakangas ym. 2016, 166).

Lietteiden kosteus ja tuhkapitoisuus vaikuttavat sen poltettavuuteen. Noin 60 % metsäteollisuuden lietteistä poltetaan. Lietteiden poltossa ei kuitenkaan yleensä saada energiaa talteen. Lietteiden koostumus ja kosteus vaikuttaa lietteiden palamiseen. Jotta palamisprosessi saadaan pidettyä yllä, on polttoaineen tehollinen lämpöarvo oltava vähintään 5 MJ/kg. Tämän johdosta liete vaatii lähes aina jonkun muun polttoaineen tueksi. Eniten käytetty tukipolttoaine on kuori. Jos lietteiden kuiva-ainepitoisuus saadaan 30 – 50 %:iin, voidaan lietettä polttaa pelkästään ilman tukipolttoaineita. Kuiva-ainepitoisuutta voidaan nostaa mekaanisella vedenerotuksella. Vaihtoehtoja ovat suotonauhapuristin, jolla

päästään 10 – 50 %, ruuvipuristin 20 – 40 % ja lingolla 10 – 30 % kuiva-ainepitoisuuteen (Alakangas ym. 2016, 167).

6.10 Kivihiili

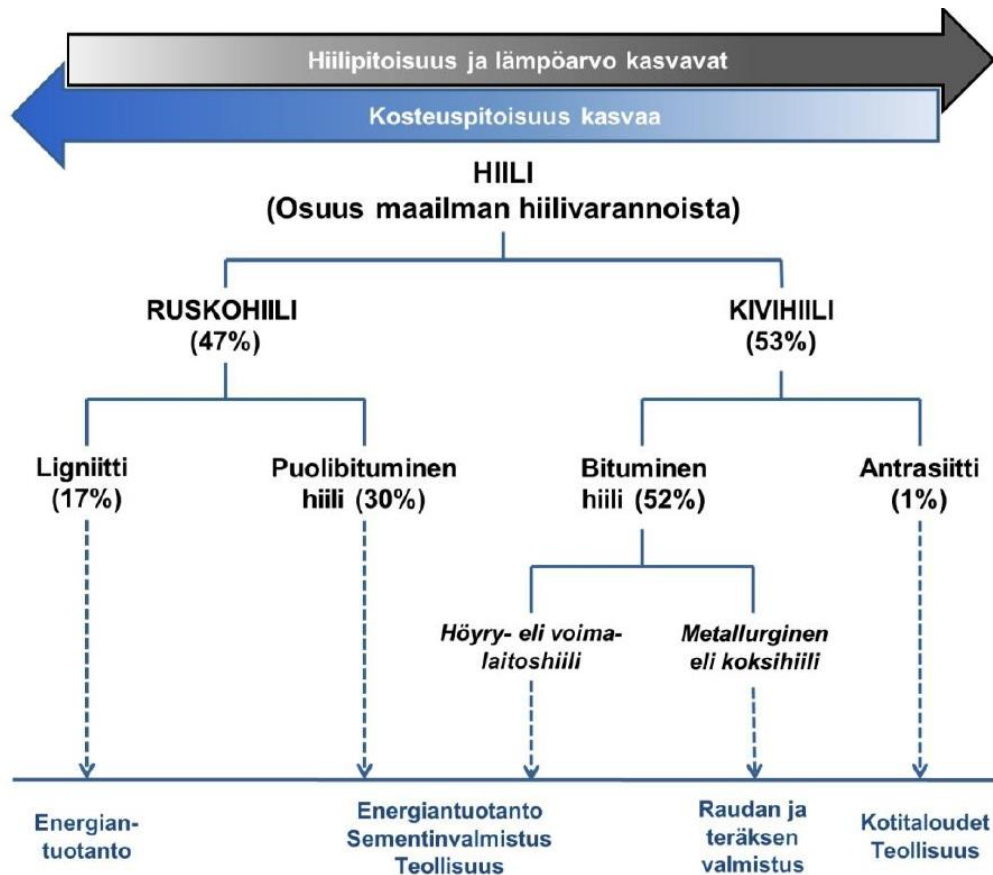
Kivihiili on lukuisista mineraaleista, osittain hajonneista orgaanisista aineksista ja vedestä koostuvaa sedimenttikiveä. Kivihiilen muodostuminen on alkanut miljoonia vuosia sitten soiden hautauduttua maakerrosten alle. Ensin on muodostunut turvetta, joka ajansaatossa maakerrosten alle jäädessä paineen ja lämpötilan vaikutuksesta kemiallisten ja fysikaalisten prosessien kautta on muuttunut hiileksi. Ensin turve muuttuu ruskohiileksi, joka väriltään voi vaihdella mustasta ruskean eri sävyihin. Ruskohiilessä tapahtuu miljoonien vuosien kuluessa muutosta paineen ja lämpötilan vaikutuksesta. Ensin se muuttuu puolibitumiseksi hiileksi, sitten bitumiseksi hiileksi ja lopulta antrasiitiksi. Prosessin aikana happi- ja kosteuspitoisuudet laskevat ja lämpöarvo ja hiilipitoisuus kasvavat, jolloin hiili muuttuu rakenteeltaan tummemmaksi ja kovemmaksi (kuva 38). Tuhkattoman kuiva-aineen hiilipitoisuudet kuiva-aineessa ovat antrasiitilla > 90 %, puolibituminen ja bituminen hiili 70 – 90 % ja ruskohiilellä < 70 %. Suurin osa hiilestä on muodostunut 360 – 290 miljoonaa vuotta sitten (Alakangas ym. 2016, 169).



KUVA 38. Kivihiilen muodostuminen (Alakangas ym. 2016, 169)

Runsaasti hiiltä sisältäviä polttoaineita, jotka ovat kiinteitä, kutsutaan hiileksi. Hiilen ominaisuudet voivat erota toisistaan huomattavasti. Tämän takia hiilet jaetaan kahteen

eri ryhmään kivihiili ja ruskohiili. Antrasiitti ja bituminen hiili luetaan kivihiileksi. Bituminen hiili voidaan jakaa vielä metallurgiseen hiileen ja höyryhiileen. Höyryhiiltä käytetään voima- ja lämpölaitoksilla polttoaineena. Metallurgisesta hiilestä valmistetaan koksia teollisuuden käyttöön. Maailman hiilivarannot jakautuvat pääosin kahtia kivihiileen ja ruskohiileen (kuva 39). Antrasiitin osuus kivihiilestä on vain noin 1 %, suurin osa on bitumista hiiltä (Alakangas ym. 2016, 170).



KUVA 39. Hiililaatujen jaottelu, osuudet maailman hiilivarannosta sekä käyttökohteet (Alakangas ym. 2016, 170)

Voimalaitoshiilestä analysoidaan samoja ominaisuuksia, kuin muillakin polttoaineilla. Tällaisia ominaisuuksia ovat: lämpöarvo, kosteus, kemiallinen koostumus, haihtuvien aineiden määrä, tuhkan kemiallinen koostumus ja sulamiskäyttäytyminen sekä raekokajakauma. Lisäksi hiilenpölypolttolaitoksilla analysoidaan hiilen jauhautuvuus. Suomessa käyttömäärältään merkittävin hiili on voimalaitoshiili. Voimalaitos hiiltä on tuotu suomeen vuosittain noin 2,8 – 5,9 miljoonaa tonnia, jota käytetään pääosin voimalaitosten polttoaineena sähkön- ja lämmöntuotantoon. Hiilivoimalaitokset tullaan korvaamaan monipolttoainelaitoksilla (Lahti, Naantali). Suomen hallituksen tavoitteena on, että Suomi luopuu kivihiilen energiatuotannosta vuoteen 2020-luvulla. Suomessa

käytettävä voimalaitoshiili on bitumista hiiltä, joka tuodaan pääosin Venäjältä. Venäjältä tuodun kivihiilen osuus on vuosina 2011 – 2014 ollut noin 90 %. Puolasta on tuotu 1 – 8 % ja Kazakstanista 2 – 4 % (taulukko 23). Hiiltä on aiemmin tuotu myös Kolumbiasta ja Yhdysvalloista (Alakangas ym. 2016, 171–172).

TAULUKKO 23. Eri maista tuotujen kivihiilien keskimääräisiä ominaisuuksia (Alakangas ym. 2016, 173)

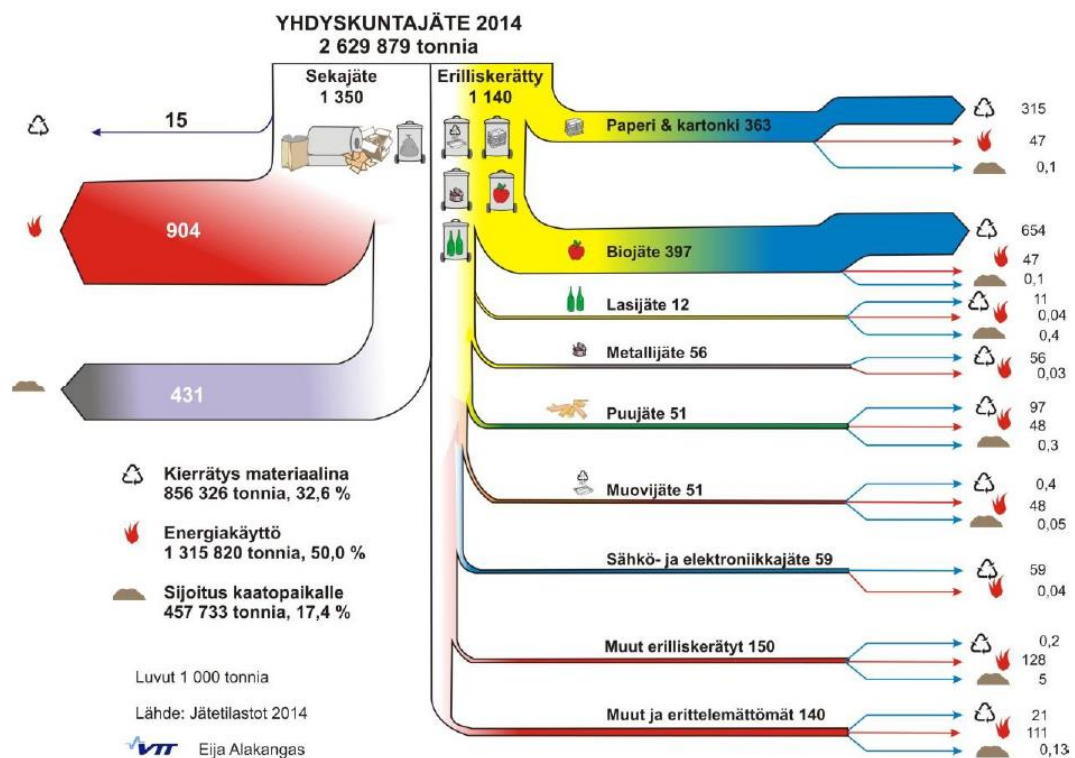
Ominaisuus	Venäläinen 1	Venäläinen 2*	Puolalai- nen	Kazaksta- nilainen
PERUSANALYYSIT				
Kosteus, p-%	10,9	10,0	8,2	14,4
Haihtuvat aineet, p-% k.a.	36,5	12,1	29,0	43,3
Tuhkapitoisuus (815 °C), p-% k.a.	12,5	25,2	17,0	4,4
Kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg k.a.	29,17	25,98	28,61	29,90
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg k.a.	28,15	25,36	27,61	28,82
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg	24,65	22,59	25,19	24,32
ALKUAINEMASSAKOOSTUMUS KUIVA-AINEESSA, p-%				
Hiili, C	66,19	66,96	70,23	73,58
Vety, H	4,73	2,91	4,26	4,89
Typpi, N	2,12	1,76	1,16	1,36
Rikki, S	0,38	0,33	0,68	0,46

6.11 Kierrätyspolttoaineet

Vuosittain syntyy jätettä noin 97 miljoonaa tonnia, johon luetaan kaikki alkutuotannon jättemateriaalit pois lukien metsään jäävä puunkorjuutähteet. Eniten jätettä syntyy teollisesta toiminnasta ja rakennustoiminnasta sekä maataloudesta, noin 90 %. Suomen ja EU:n lainsäädäntö edellyttää, että syntyvät jätteet on ensisijaisesti hyödynnettävä. Hyödyntämisen etusijalla on hyödyntää jäte aineena, mutta jos näin ei voida tehdä, voidaan jätteet hyödyntää polttamalla. Jos jätteitä ei voi hyödyntää, niin ne on sijoitettava kaatopaikoille (Alakangas ym. 2016, 148).

Kierrätyspolttoaineet voivat olla yhdyskuntien, teollisuuden tai yritysten kuivia poltto- kelpoisia materiaaleja tai niistä valmistettuja polttoaineita. Kierrätyspolttoaineella voi-

daan korvata olemassa olevien lämpö- ja voimalaitosten kiinteitä polttoaineita. Energiatuotantoon jäte voidaan jalostaa pelleteiksi tai sitten orgaaniset jätteet biokaasuksi. Vuonna 2014 lähes 50 % kertyneestä yhdyskuntajätteestä poltettiin. Kymmenen vuotta aiemmin jätteistä poltettiin vain 12 %. Kaikki polttoon toimitettu yhdyskuntajäte on pois kaatopaikoilta. Yhdyskuntajätettä kertyi vuonna 2014 2,6 miljoonaa tonnia, joka tarkoittaa noin 500 kg asukasta kohti vuodessa. Yhdyskuntajätteestä vajaat 60 % on peräisin kotitalouksista. Energiahyödynnykseen (Kuva 40) käytetty yhdyskuntajätteen määrä oli vuonna 2014 1,6 miljoonaa tonnia ja kaatopaikalle vietiin 460 000 tonnia. Loppuosa jätteestä kierrätettiin (Alakangas ym. 2016, 148).



KUVA 40. Yhdyskuntajätteiden hyödyntäminen vuonna 2014 (Alakangas ym. 2016, 149)

Suomessa jätteenpolttolaitoksia toimii kuudella paikkakunnalla. Lähivuosina valmistuu kolme uutta jätteenpolttolaitosta uusille paikkakunnille. Suurin osa jätteenpolttolaitoksista on valmistunut vuoden 2012 jälkeen. Seitsemässä teollisuuden yrityksessä ja voimalaitoksessa kierrätyspolttoainetta käytetään rinnakkaispoltossa. Lisäksi 19 laitosta voi käyttää kierrätyspolttoainetta seospoltossa. Kierrätyspolttoaineen osuus seospoltossa on 5 – 30 % polttoaineen käyttömäärästä (Alakangas ym. 2016, 149).

Energiantuottajaa kiinnostavat kaikki polttoaineet, joita on teknisesti mahdollista polttaa ja jotka on virallisesti hyväksytyjä sekä taloudellisesti kannattavaa. Energiakäyttöön soveltuu helpoimmin rakennusjätteet, teollisuuden ja kaupan pakkaus-, muovi- ja paperijätteet. Yhdyskuntajätteistä energiantuotantoon soveltuu kuivat jätteet metallin ja lasin erottelun jälkeen. Kierrätyspolttoaineen haasteena ovat polttoaineen vastaanoton ja käsittelyyn tarvittavat investoinnit sekä polttoaineen laatuvaihtelut. Kierrätyspolttoaineen ominaisuudet on tunnettava, jotta sen polttaminen on turvallista ja ympäristöystävällistä. Kierrätyspolttoaineen turvallinen käyttö edellyttää polttoaineelta hyvää valmistusprosessia, vähän haitta-aineita ja epäpuhtauksia sekä asianmukaista valmistusprosessia. Kierrätyspolttoaineet ovat peräisin monesta eri lähteestä (taulukko 24), joten niiden laatu vaihtelee. Tärkeimmät laatukriteerit ovat kosteus, palakoko, epäpuhtaudet (kuten metalli, lasi) ja tuhkapitoisuus sekä kemiallinen koostumus (mm. klooripitoisuus, metallinen alumiini ja raskasmetallit) (Alakangas ym. 2016, 150).

TAULUKKO 24. Energiajätteen keskimääräinen koostumus (Alakangas ym. 2016, 150)

Jätejake	Osuus, %
Muovi	33
Paperi/kartonki	46
Puu	4
Muu palava	2
Epäpuhtaudet	15

Palamisen, tasalaatuisen syötettävyyden kannalta palakoko on osoittautunut kaikissa murskettua polttavissa laitoksissa kaikkein tärkeimmäksi. Nimellinen palakoko kierrätyspolttoaineelle on 63 mm ja maksimi koko 300 mm. Nämä koot ovat sopivia kierrätyspolttoaineen syöttölaitteille. Alkuperä ja materiaalipohja vaikuttavat kierrätyspolttoaineen laatuun, jos polttoaine sisältää paljon muovia on sen kosteus alhainen ja lämpöarvo korkea. Muovilla on korkea vety- ja hiilipitoisuus, nämä ominaisuudet nostavat muovin lämpöarvoa (taulukko 25). Jos taas polttoaine sisältää paljon puuta, on sen kosteus korkeampi ja lämpöarvo alhaisempi. PVC-muovi kasvattaa polttoaineen klooripitoisuutta. Korkeissa höyrytulistin lämpötiloissa on otettava huomioon polttoaineen klooripitoisuus. Kierrätyspolttoaine voi sisältää myös muita polttoaineita korkeampi kalium-, alumiini- ja natriumpitoisuuksia, jolloin on otettava huomioon näistä aiheutuva

kattilan likaantumisriski. Raskasmetallit vaikeuttavat tuhkan hyötykäyttöä sekä ne voivat aiheuttaa ympäristöpäästöjä. Kierrätyspolttoaineet saattavat myös muuttaa seospolttoaineen tuhkan sulamiskäyttäytymistä (Alakangas ym. 2016, 150 - 151).

Polton kannalta haitallista on metallinen alumiini, jota kierrätyspolttoaineisiin tulee kotitalouksien foliotuotteista ja rakennusjätteistä. Alumiinin sulamispiste on alhainen, 660 °C, ja se hapettuu huonosti. Polttoaineessa oleva alumiini sulaa ja muodostaa ohuen oksidikalvon peittämiä pisaroita, jotka tarttuvat yleensä hila tai tulistimen pintaan, koska ne ovat ensimmäiset kylmemmät pinnat. Alumiini voi jopa tukkia kattilan. Kierrätyspolttoaineet voivat sisältää myös lyijyä, jonka yhdisteet likaavat ja syövyttävät. Kierrätyspolttoaineisiin liittyy terveysriski, jonka suuruutta kuvaa työhygienian laatu, jonka tärkeimpiä kriteerejä ovat kosteus (materiaalikosteus ja suhteellinen ilman kosteus), ravinteet, pH, lämpötila, varastointiaika ja vuodenaika (Alakangas ym. 2016, 151).

TAULUKKO 25. Kierrätyspolttoaineiden ominaisuuksien vaihtelu (Alakangas ym. 2016, 151)

Ominaisuus	Kaikkien vaihteluväli	SRF I Keskiarvo eri analyyseistä	SRF III Keskiarvo eri analyyseistä
Kosteus, %	5–30	9,1 irtotavara 3,2 pelletit	28,5 irtotavara 3,2 pelletit
Irtotiheys saapumistilassa, kg/m ³		180 irtotavara 300 pelletit	210 irtotavara 300 pelletit
Tuhka, % kuiva-aineessa	1–16		
Lämpöarvot, MJ/kg			
Kalorimetrinen	20–40	24,7	22,9
Tehollinen kuiva-aineessa	17-37	23,1	21,5
Tehollinen saapumistilassa		20,8	14,6
Alkuainekoostumus, p-% k.a.			
Hiili, C	48–75	56,0	52,9
Vety, H	5–9	7,4	7,3
Typpi, N	0,2–0,9	0,63	0,71
Rikki, S	0,05–0,20	0,16	0,13
Kloori, Cl	0,03–0,7	0,19	0,71
Tuhkan sulamiskäyttäytymisen	Hapettavat / pelkistävät olosuhteet		
Muodonmuutoslämpötila, DT	1 150–1 220 / 1 100–1 200 °C		
Puolipallolämpötila, HT	1 200–1 260 / 1 200–1 250 °C		
Juoksevuuslämpötila, FT	1 210–1 265 / 1 220–1 270 °C		

SRF I = syntypistelajiteltu pakkauksia ja puujätettä sisältävä seos

SRF III = syntypistelajiteltu kotitalouden jäte

Lassila & Tikanojan tutkimusten (2006–2014) mukaan kierrätyspolttoaineiden keskimääräinen tehollinen lämpöarvo saapumistilassa oli 17,9 MJ/kg, kosteus 20,2 %. Rakennusjätteen joukossa oleva kipsi nostaa polttoaineen rikkipitoisuutta (0,24 %) ja klooripitoisuutta (0,5 %) nostavat tekstiilit, kumi ja kovat muovit. Kierrätyksen ja uudelleenkäytön myötä kierrätyspolttoaineen laatuominaisuudet ja materiaalikoostumus muuttuvat. Teknologian kehittyessä voi olla, että muovi, pahvi ja paperi kierrätetään. Silloin kierrätyspolttoaineen lämpöarvo ja koostumus muuttuvat radikaalisti (Alakan-
gas ym. 2016, 152).

Pelkästään kuitumaisesta raaka-aineesta valmistetut tuotteet (taulukko 26) ja erilaiset yhdistelmämaterialit kuuluvat kuitupohjaisiin pakkausmateriaaleihin. Kuitupohjaisia pakkauksia ovat aaltopahvi, paperisäkit, voimapaperi ja kartonkipakkaukset jne. (Alakan-
gas ym. 2016, 152).

**TAULUKKO 26. Kuitumaisten aineiden palamisteknisiä ominaisuuksia (Alakan-
gas ym. 2016, 152)**

Aine	Kosteus, p-%	Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg		p-% kuiva-aineessa		
		Saapumisti- lassa	Kuiva- aineessa	Haihtuvat aineet	Hiili, C	Tuhka
Sanomalehtipaperi	6,0	18,5	19,7	86,3	12,2	1,5
Käärepaperi	5,8	16,9	17,9	89,1	9,8	1,1
Aikakauslehtipaperi	4,1	12,2	12,7	69,2	7,3	23,4
Aaltopahvilaatikot	5,2	16,4	17,3	81,7	12,9	5,3
Muovipintainen paperi	4,7	17,1	17,9	88,4	8,9	2,8
Vahattu kartonki	3,5	26,3	27,2	94,2	4,6	1,2
Elintarvikekartonki	6,1	16,9	19,0	80,5	12,6	6,9
Nestepakkauskartonki	15,7	15,6	21,3	89,6	49,3	1,73
Nestepakkauskartonki (sis. alumiinia)	6,13	21,8	23,4	82,8	51,9	9,0

Suomen yhdyskuntajätteestä noin 5 % erilliskerätyn jätteen kokonaismäärästä on muovia. Muovin raaka-aineena käytetään öljyä, jonka takia muovin lämpöarvo on hyvin korkea 20 – 46,5 MJ/kg. Yleisimmät pakkausmuovit ovat polyeteeni (PE), joka on myös eniten käytetty pakkausmuovi, polypropeeni (PP), polystyreeni (PS) ja polyeteenitereflaatti (PET). PVC on ongelmallisinta muovi voimalaitoksien kattiloissa sen korkean klooripitoisuuden (57 %) johdosta. Polttokelpoisista jätejakeista valmistetun polt-

toaineen (SRF, RDF) tehollinen lämpöarvo saapumistilassa on 10 – 15 MJ/kg. Teollisuudessa kerätyn pakkauksia sisältävän jätteen lämpöarvo on korkeampi kuin kotitalouksien jätteen, 14 – 18 MJ/kg. Jos kerätään pelkästään eri muoveja, on niiden seoksen lämpöarvo 31,8 MJ/kg. Muovijätteen tuhkapitoisuus on alhainen, 0,6 – 3,2 % (Alakangas ym. 2016, 155).

Irtojätteestä voidaan tehdä pellettejä, jolla voidaan jätteen haittoja poistaa. Pelletti parantaa polttoaineen käsiteltävyyttä (taulukko 27), joka voidaan rinnastaa palaturpeeseen tai hakkeeseen (Alakangas ym. 2016, 156).

TAULUKKO 27. REF-pelletin ominaisuuksia (Alakangas ym. 2016, 156)

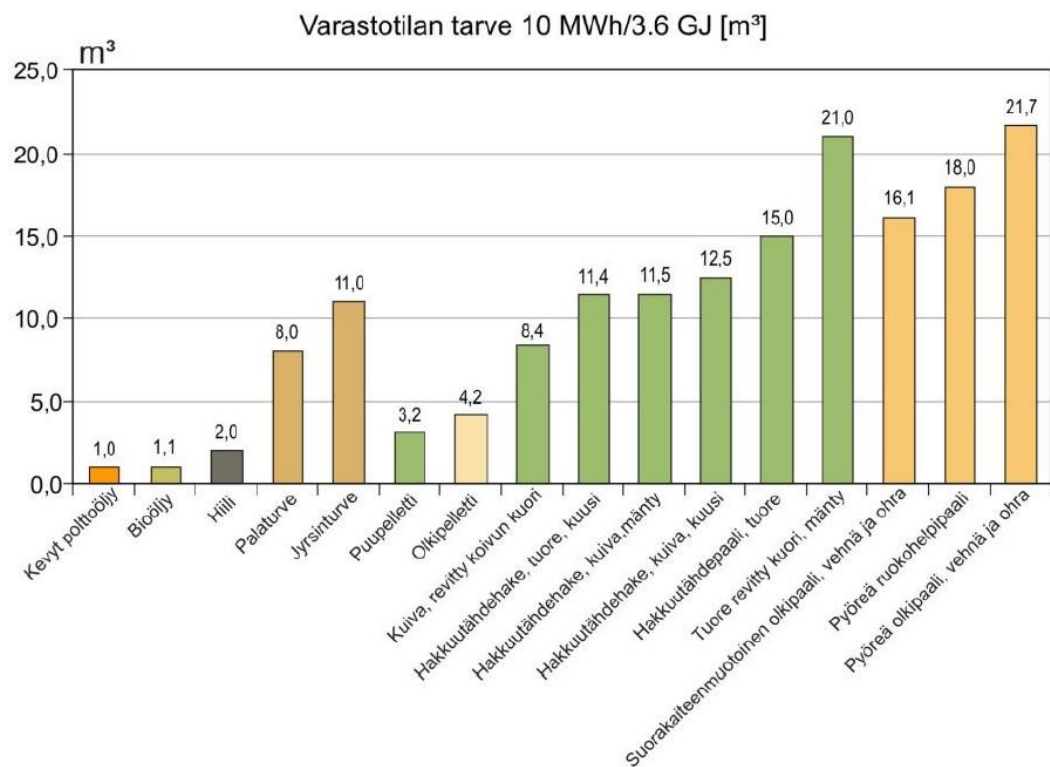
Polttoaine	REF-pelletti
Kosteus, %	2,5–4,5
LÄMPÖÄRVOT, MJ/kg	
Kalorimetrinen kuiva-aineessa	23–26
Tehollinen kuiva-aineessa	22–25
Tehollinen saapumistilassa	21–24
PITOISUUDET KUIVA-AINEESSA, p-%	
Tuhka	4–10
Hiili, C	52–58
Vety, H	6,5–8,5
Typpi, N	0,5–1,5
Rikki, S	0,10–0,20
Kloori, Cl	0,3–0,9

TAULUKKO 28. VTT:n julkaisemattomia kierrätyspolttoaineiden ominaisuuksia (Alakangas ym. 2016, 157)

Polttoaine	Teollisuuden palava jäte (pakkauksia)	Kotitalouden kuivajäte	Keskiarvo polttojakeista
Kosteus, %	19,5	29,3	18,3
LÄMPÖÄRVOT, MJ/kg			
Kalorimetrinen kuiva-aineessa	24,9	23,3	21,7
Tehollinen * kuiva-aineessa	23,2	21,7	20,2
* saapumistilassa	18,2	14,6	15,9
PITOISUUDET KUIVA-AINEESSA, p-%			
Hiili, C	54,7	53	50,4
Vety, H	7,76	7,41	6,89
Typpi, N	0,42	0,80	0,39
Rikki, S	0,07	0,17	0,16
Kloori, Cl	0,24	0,78	0,28
Tuhka	5,53	13,8	7,64

7 POLTTOAINEOMINAISUUKSIEN VAIKUTUS POLTTOON

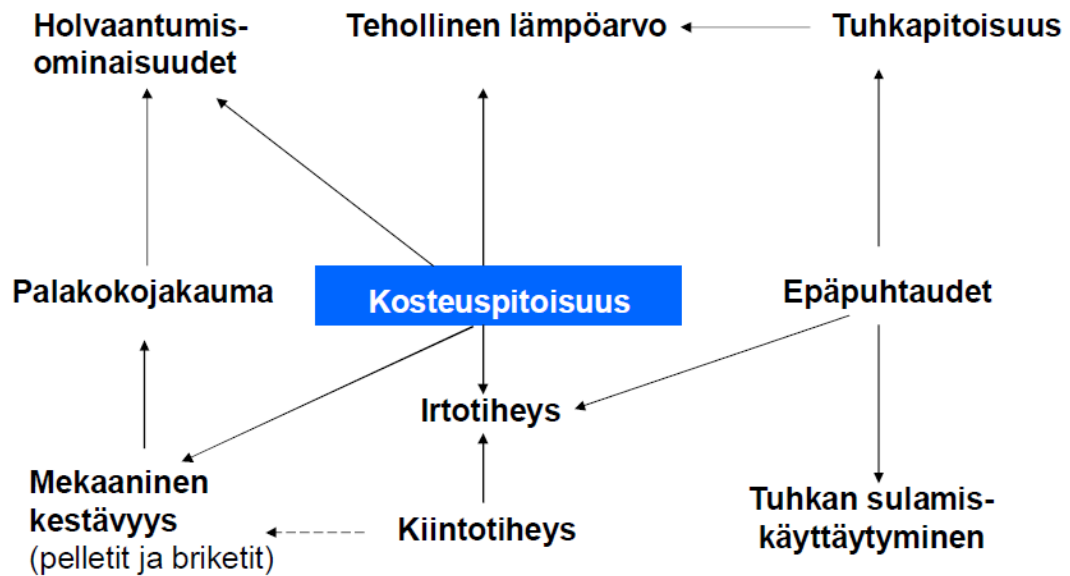
Polttoaineen palamisessa vapautuvaa energiamäärää kuvaa polttoaineen kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo olettaen, että polttoaineen sisältämästä vedystä muodostuvaa vesihöyryn lämpöenergiaa ei saada talteen. Vesihöyryn lämpöenergia voidaan ottaa talteen savukaasuhaihduttimella. Tehollinen lämpöarvo ottaa huomioon polttoaineen sisältämän kosteuden alentavan vaikutuksen. Kosteus lisää myös savukaasuvirtaa ja heikentää kattilan hyötysuhdetta. Lisäksi kosteus voi aiheuttaa polttoaineen jäätymistä ja aiheuttaa ongelmia polttoaineen syöttölaitteissa. Energiasisältö tilavuusyksikköä kohti kuvaa energiatihelyttä, joka vaikuttaa tarvittaviin syöttö-, varastointi-, ja käsittelylaitteistojen kapasiteetteihin sekä kuljetuskustannuksiin (Alakangas ym. 2016, 196).



KUVA 41. Eri polttoaineiden tilantarve, kun energiamäärä on 10 MWh (Alakangas ym. 2016, 196)

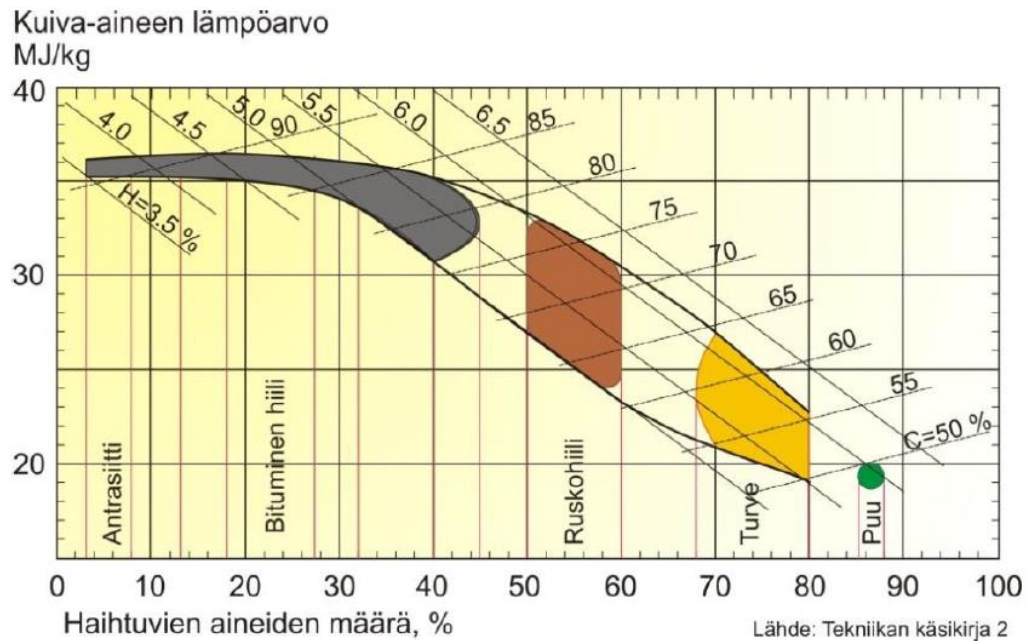
Polttoaineen palakoko vaikuttaa palamisprosessin lisäksi myös käsittely- ja kuljetuslaitteiston valintaan (kuva 41), esimerkiksi holvaantumiskäyttäytymiseen. Palakoko vaihtelee polttotekniikoittain. Hakkeella on paremmat käsittelyominaisuudet, kuin murskeella, koska hakkeen palakoko on homogeenisempaa. Tuhkapitoisuus alentaa poltto-

aineen lämpöarvoa (kuva 42). Tuhkapitoisuus vaikuttaa myös tuhkan käsittelylaitteisiin vaadittaviin kapasiteetteihin. Epäpuhtaudet polttoaineessa nostavat bio- ja jäteperäisen polttoaineen tuhkapitoisuutta (Alakangas ym. 2016, 196 - 197).



KUVA 42. Polttoaineiden ominaisuuksien riippuvuus toisistaan (Alakangas ym. 2016, 197)

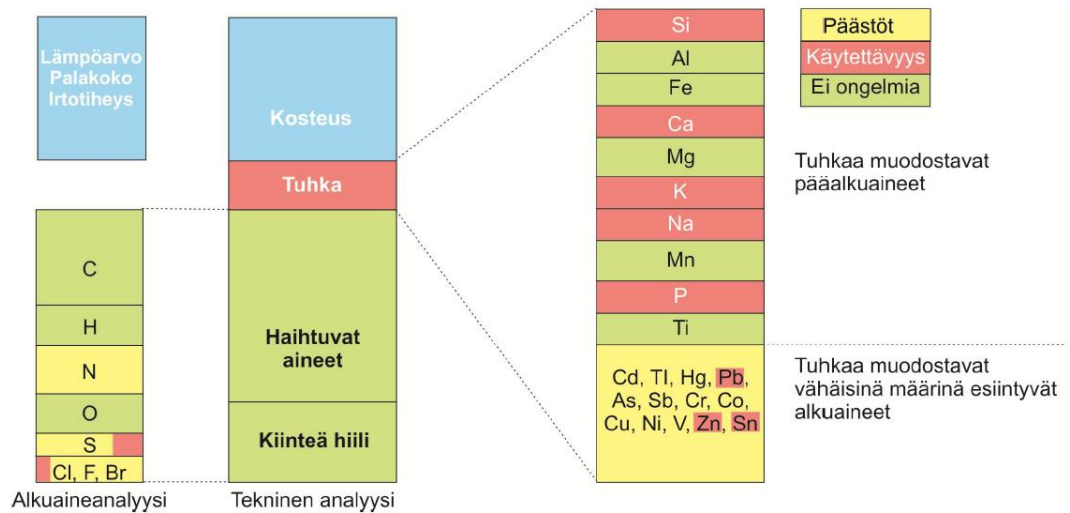
Päästöjen muodostumiseen, reaktiivisuuteen ja palamisprofiiliin vaikuttaa haihtuvien aineiden osuus. Biopolttoaineella haihtuvien aineiden osuus on suuri, kun taas hiilellä se on alhainen (kuva 43). Pölypoltossa haihtuvat aineet stabiloivat liekkiä ja helpottavat syttymistä. Oleellimmat alkuaineet palamisessa vapautuvan energiamäärän kannalta ovat vety ja hiili (Alakangas ym. 2016, 197).



KUVA 43. Eri polttoainetyyppien hiili- ja vetypitoisuudet, haihtuvien aineiden määrät ja kuiva-aineen lämpöarvot (Alakangas ym. 2016, 197)

Polttoaineen sisältämä typpi muuttuu suurelta osin polttoprosessin aikana alkuainetyypeksi, mutta polton aikana muodostuu myös haitallisia typenoksidipäästöjä, joista typimonoksidi (NO) on yleisin. Ilmakehässä typimonoksidi hapettuu typpidioksidiksi. Veden kanssa reagoiessa typpidioksidi muodostaa typpihappoa ja typpihapoketta, jotka happamoittavat sadevesiä (Alakangas ym. 2016, 198).

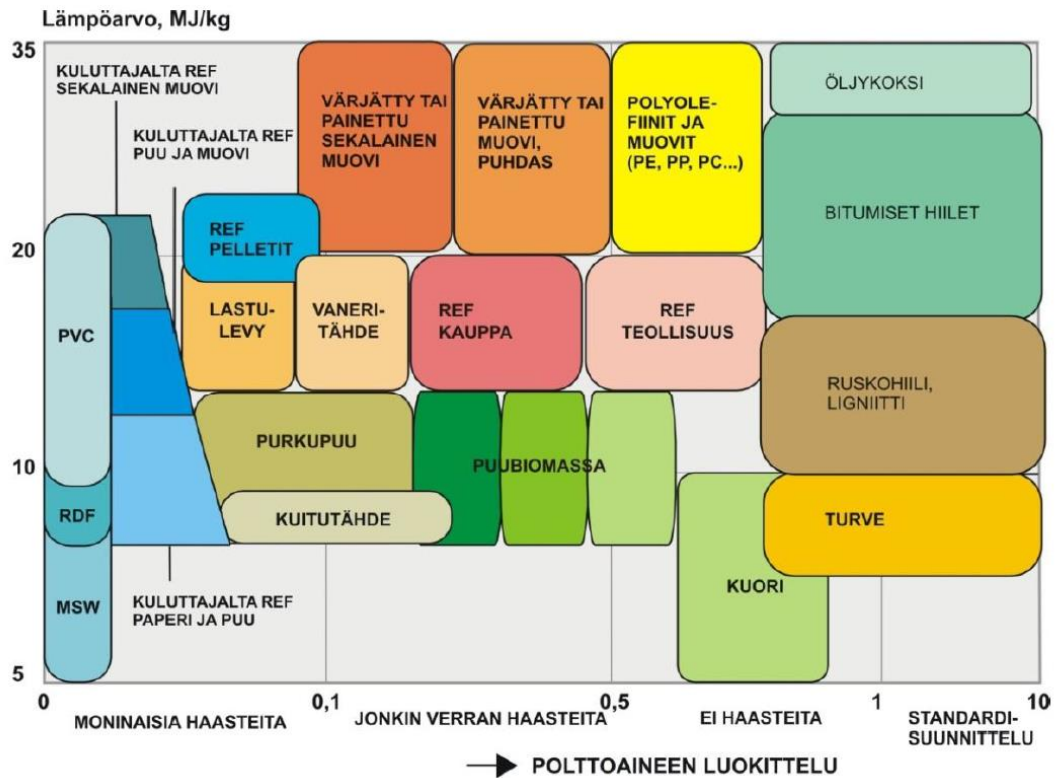
Rikkipitoisuus on oleellista päästöjen (SO_2) estämisessä. Lisäksi osa rikistä voi muodostaa rikkihappoa, joka voi aiheuttaa kastepistekorroosiota savukaasukanavassa, mikäli lämmönsiirtopintojen lämpötilat ovat liian alhaiset. Kloori on suurin tulistimien korroosion aiheuttaja bio- ja jäteperäisten voima- ja lämpölaitoksissa. Polttoaineesta muodostuvan tuhkan koostumus (kuva 44) vaikuttaa kuonaantumiseen, likaantumiseen, korroosioon, ja petihiekanjyvästen yhteenliimautumiseen. Raskasmetallit vaikuttavat ilmaan joutuviin päästöihin (Alakangas ym. 2016, 198).



KUVA 44. Polttoaineanalyysin tulosten yhteys polttoon (Alakangas ym. 2016, 198)

7.1 Polttoaineen aiheuttamat haasteet polttoprosessille

Polttoaineet asettavat haasteita laitoksille, koska niiden poltto-ominaisuudet eroavat toisistaan huomattavasti (kuva 45). Polttoaineet, joilla on korkea lämpöarvo, eivät aiheuta poltossa ongelmia, kun taas polttoaineet joilla on alhainen lämpöarvo voivat aiheuttaa polttoprosessissa ongelmia. Ongelmat voivat liittyä kattilassa tapahtuvaan kuonaamiseen, likaantumiseen, korroosioon tai tuhkan sulamiseen. Myös kattilan ulkopuoliset ongelmat ovat yleisiä, joita ovat päästöt, hygienia tai polttoaineen syövyttävyys (Alakangas ym. 2016, 198).



KUVA 45. Polttoaineiden haastavuus kattilasuunnittelun kannalta (Alakangas ym. 2016, 199)

Jäteperäiset materiaalit ovat kaikkein haasteellisimpia polttoaineita. Niissä on korkea alkali- ja klooripitoisuus ja raskasmetalleja. Eniten jäteperäisten polttoaineiden alkalikloridit aiheuttavat ongelmia tulistinputkiin, erityisesti silloin kun höyryn tulistuslämpötila on yli 450 – 480 °C. Myös jätepolttoaineista muodostuu sinkki- ja lyijy-yhdisteitä, jotka aiheuttavat alemmissa lämpötiloissa (noin 350 – 400 °C) korroosiota. Tällöin myös höyrystinputket ovat alttiina korroosiolle. Tämän takia laitoksissa, jossa poltetaan pelkästään jätettä, ovat alhaisemmat painetasot kuin tavanomaisissa laitoksissa. Jätepolttoaineet sisältävät myös alumiinia, joka aiheuttaa likaantumista tai jopa kattilaan tukkeutumista. Jäteperäisten polttoaineiden käsittelyyn liittyy aina terveysriski. Arinakattiloihin soveltuu sellaisenaan käsittelemätön yhdyskuntajäte (MSW), koska ne sisältävät suuren määrän palamattomia vieraskappaleita mm. lasia, keramiikkaa, metallia. Pala koolta sopivaa ja vähemmän vieraskappaleita sisältävää kierrätyspolttoainetta (REF), voidaan polttaa leijupetikattilassa. On kuitenkin tärkeää varmistaa ylisuurten kappaleiden poisto pedistä. Myös kuluttajalähtöiset pakkausjätteet (PDF) ovat haasteellisia polttaa. Teolliset ja kaupalliset jätteet sisältävät vähiten vieraskappaleita ja ovat tasalaatuisia, joten niistä on vähintään ongelmia polttoprosessissa (Alakangas ym. 2016, 199 - 200).

Purkupuut, vaneritähteet ja lastulevyt ovat myös haasteellisia polttaa. Purkupuuhun sisältyy myrkyllisiä aineita, betonia ja nauvoja. Vanerilevyjen liimat aiheuttavat leijupetikattiloiden hiekkojen yhteen kiinnittymistä (Alakangas ym. 2016, 200).

Mikäli metsähaketta poltetaan pelkästään tai metsähakkeen osuus kokonaispolttoaineesta on suuri, on sen polttaminen voimalaitoskattiloissa haasteellista. Silloin suurin haaste on tulistimien likaantuminen ja kuumakorrosio. Ongelmat tulevat puun sisältämästä kloorista ja alkaleista. Jos polton yhteydessä käytetään kivihiiltä tai turvetta, ongelmat poistuvat. Jos havupuiden neulaset putoavat ennen polttoa, on se polton kannalta tärkeää, koska kloori- ja kaliumpitoisuudet laskevat (Alakangas ym. 2016, 200).

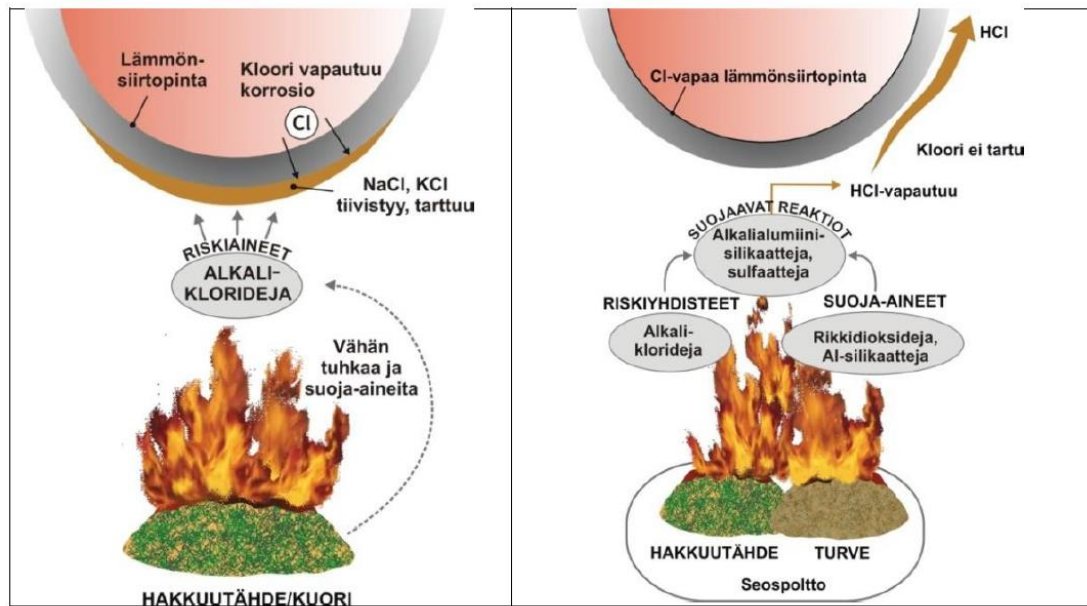
Muovit ovat hyviä polttoaineita niiden korkean lämpöarvon vuoksi, mutta puhtaassa PVC-muovissa on jopa 57 % klooria. Jos muovi ei sisällä PVC:tä, niiden polttamisessa ei ole ongelmia. Turpeen ja kivihiilen poltossa ei ole yleensä ongelmia (Alakangas ym. 2016, 200).

7.2 Turpeen/kivihiilen ja biopolttoaineen seospoltto

Voimalaitoksille eniten haasteita aiheuttaa biopolttoaineiden kloori ja alkalit. Seospoltto on tapa, jolla kloorin ja alkaleiden aiheuttamat ongelmat voidaan poistaa. Seospoltto on useamman polttoaineen polttamista kattilassa. Kiertopetikattila (CFB) ja leijupetikattila (BFB) voivat polttaa joustavasti eri seospolttoaineita. Arina- ja pölypolttolaitoksilla seospoltto on paljon haasteellisempaa. Seospolttoaineet eli suojaolttoaineet sisältävät yhdisteitä, jotka suojaavat kattilaa (kuva 46). Tärkeimpiä suoja-aineita ovat rikki ja alumiinisilikaatti jotka pystyvät muuttamaan alkalikloridit vaarattomaan muotoon. Lisäksi ne sitovat alkaleita. Yleisimmät suojaolttoaineet ovat kivihiili ja turve. Myös jollain lietteillä on suojaava vaikutus. Lähes kaikissa Suomen leijupetikattiloissa on käytössä seospoltto. Yleisin poltoseos on turve ja puupolttoaine (Alakangas ym. 2016, 200).

Biopolttoainetta pelkästään poltettaessa höyryfaasissa olevat alkalikloridit tiivistyvät savukaasuja tulistinputkien viileämmälle puolella aiheuttaen likaantumista ja korrosiota. Turvetta tai kivihiiltä lisäämällä biopolttoaineen joukkoon muuttuvat alkalikloridit suoja-aineiden vaikutuksesta alkalisulfiiteiksi ja alkialumiinisilikaatiksi. Tällöin

kloori vapautuu vetykloridina (HCl, suolahappo) ja poistuu savukaasujen mukana aiheuttamatta korroosiota tulistinputkissa (Alakangas ym. 2016, 201).



KUVA 46. Kuvaus tapahtumista tulipesässä, jos polttoaine ei sisällä tarpeeksi suoja-aineita ja jos polttoaine sisältää tarpeeksi suoja-aineita (Alakangas ym. 2016, 201)

Seospoltoilla on muutakin hyötyä, sillä seospoltto vähentää myös petijyvösten kasvua ja yhteen liimaantumista sekä pienhiukkaspäästöjä. Biopolttoaineen tuhka taas alentaa turpeen ja kivihiilen polton korkeita SO₂-päästöjä. Merkittävin heikkous seospoltoissa on tuhkan hyötykäyttömahdollisuudet. Polttoaineanalyysien avulla (taulukko 30) voidaan arvioida polttoaineen vaikutukset polttoprosessiin (taulukko 29) (Alakangas ym. 2016, 202).

TAULUKKO 29. Kiinteiden polttoaineiden keskeiset laatuvaatimukset eri käyttäjäryhmillä eri tekniikoilla (Alakangas ym. 2016, 204)

Käyttäjärühmä	Polttoaine	Käytetty teknologia	Polttoaineen tärkeimmät laatuvaatimukset
Kotitaloudet (< 50 kW)	Puupelletit	Pellettikattilat ja -takat	Hyvä mekaaninen kestävyys (97,5 p-%) ja alhainen tuhkapitoisuus (< 0,7 p-%)
	Polttopuu, puubrikitit	Tulisijat Halkokattilat	Alhainen tuhkapitoisuus (< 0,7 p-%) briketeille ja alhainen kosteus 15–20 p-% polttopuulle

	Karsittu rankahake	Stokerikattilat	Alhainen kosteus < 35 p-% ja homogeeninen palakoko, 30–45 mm
Maatilat, isot kiinteistöt (< 1 MW)	Kokopuu- tai rankahake, palaturve	Stokerikattilat Arinapoltto	Alhainen kosteus < 35 p-% ja homogeeninen palakoko, 30–45 mm
	Olkipaalit	Arinapoltto, myös kokonaiset paalit	Tasalaatuiset paalit, alhainen kosteus < 18 p-%
	Puupelletit	Pelletti- ja stokerikattilat	Hyvä mekaaninen kestävyys (97,5 p-%) ja alhainen tuhkapitoisuus (< 0,7 p-%)
Kaukolämpölaitokset (< 5 MWth) tai pienet CHP-laitokset	Metsätähde- tai kokopuu- hake, palaturve	Arinapoltto Leijupoltto	Kosteus < 40 p-% arina- ja leijupolttoon
	Erittäin hyvät, puhtaat polttoaineet	Myötävirtakaasutus (< 2 MW)	Kosteus < 25 p-%, palakoko 10–100 mm, tuhkapitoisuus < 1 p-%, korkea tuhkan sulalämpötila, suuri irtotiheys > 200 kg/m ³
Lämpö- ja CHPlaitokset (5–10 MW)	Metsätähde-, kokopuu- tai rankahake	Arinapoltto (Leijukerros poltto)	Kosteus < 50 p-%, (alkalit ja kloori)
	Suhteellisen laaja polttoainepohja	Vastavirtakaasutus (< 10 MW)	Palakoko 10–100 mm, kosteus < 50 %
	Puu- ja olkipelletit	Stokeripoltto, pölypoltto	Kattilakohtaiset laatuvaatimukset
	Olki- tai mm. peltobiomassapaalit	Arinapoltto (Leijukerros poltto)	Isot paalit, kosteus < 20 p-%, Tuhkan sulamisominaisuudet ja korkeat alkali- ja klooripitoisuudet huomioitava kattilasuunnittelussa.
Lämpö- ja CHPlaitokset (10–50 MW)	Metsätähdehake, kantomurske, sahanpuru, kuori, jyrsin turve ja peltobiomassat	Leijupoltto	Kosteus 40–60 p-%. Selvitettävä alkuainepitoisuudet erityisesti alkali- ja kloori. Seospoltossa polttoaineseoksen ominaisuudet ratkaisevat, ei yksittäisten polttoaineiden.

	Kierrätyspuu (C-laatu)	Leijupoltto	Kattilakohtaiset laatuvaatimukset
	Joustava polttoaineiden suhteen: myös vaikeat biomassat ja jätepolttoaineet	Kupliva/kiertoleijukaasutus (20–100 MW)	Palakoko < 30–50 mm, kosteus < 50 p-%. Kaasun puhdistustarve määräytyy polttoaineen epäpuhtauksien ja kattilatyypin mukaisesti.
Voima- ja CHPlaitokset (> 50 MW)	Metsätähde- ja rankahake, kantomurske, sahanpuru, kuori, kierrätyspolttoaineet, jyrshinturve, lietteet	Leijupoltto	Kosteus < 50 p-%. Selvitettävä alkuainepitoisuudet erityisesti kloori, alkalit, raskasmetallit (jätepolttoaineet), tuhka. Seospoltossa polttoaineseoksen ominaisuudet ratkaisevat, ei yksittäisten polttoaineiden.
	Yhdyskuntajäte (MSW)	Arinapoltto	Kattilakohtaiset laatuvaatimukset
	Kivihiili, puupelletit, sahanpuru	Pölypoltto	Kattilakohtaiset laatuvaatimukset
	Kierrätyspuu	Leijupoltto	Kattilakohtaiset laatuvaatimukset
	Joustava polttoaineiden suhteen: myös vaikeat biomassat ja jätepolttoaineet	Kupliva/kiertoleijukaasutus (20–100 MW)	Palakoko < 30–50 mm, kosteus < 50 p-%. Kaasun puhdistustarve määräytyy polttoaineen epäpuhtauksien ja kattilatyypin mukaisesti.
Teollisuuden prosessiuunit (mm. meesauuni)	Metsätähde- ja rankahake, kantomurske, sahanpuru, kuori	Kiertoleijukaasutus (20–100 MW)	Palakoko < 30–50 mm, kuivattava < 15 p-%. Selvitettävä tuhkan alkuainepitoisuudet (kuorma uunille rajoittaa)

TAULUKKO 30. Polttoaineiden tuhkapitoisuuden, lämpöarvon, kosteuden ja irtotiheyden vertailu (Alakangas ym. 2016, 205)

Polttoaine	Kuiva-ai- neen tehollinen lämpöarvo $q_{p,net,d}$, MJ/kg	Kosteus M_{ar} , p-%	Teholli- nen läm- pöarvo saapumis- tilassa $q_{p,net,ar}$, MJ/kg	Irtoti- heys BD, kg/irto- m ³	Energiatiheys E_{ar} , MWh/irto- m ³	Tuhkapi- toisuus kuiva-ai- neessa A_d , p-%
Kivihiili	27,0–28,8	8–14	24,3–25,1			4,4–17,0
Raskas polttoöljy	40,5–41,5	< 0,1	40,5–41,5	985–1 020		0,02– 0,05
Kevyt polttoöljy	35,2–35,9 MJ/litra	0,01– 0,02	35,2–35,9 MJ/litra	820–840		< 0,001
Pyrolyysiöljy	18,4–20,1	20–30	13,0–18,0	1100– 1300		0,01–0,1
Jyrsinturve (kes- kiarvo)	20,6	47	9,8	330	0,91	6,3
Palaturve (kes- kiarvo)	21,3	35	11,9	385	1,30	3,5
Turvelletti	19,7–21,0	14–18	15,1–18,7	680–750	3,0–3,7	20–6,0
Sahanpuru	19,0–19,2	45–60	2,2–10,0	250–350	0,45–0,70	0,4–0,5
Koivunkuori	21,0–23,0	45–55	8,0–11,0	300–400	0,60–0,90	1,0–3,0
Havupuun kuori	18,5–20,0	50–65	5,0–9,0	250–350	0,50–0,70	1,0–3,0
Vanerimurske	19,0–19,2	5–15	16,0–18,0	200–300	0,9–1,1	0,4–0,8
Puupelletit	18,9–19,5	6–9	7,0–18,2	600–650	2,8–3,3	0,1–0,5
Rankahake	18,5–20,0	40–55	7,0–11,0	250–350	0,7–0,9	0,5–2,0
Polttopuu	18,5–19,0	20–25	13,4–14,5	240–320	1,35–1,70 MWh/pino- m ³	0,5–1,2
Hakkuutähdehake	18,5–20,0	50–60	6,0–9,0	250–400	0,7–0,9	1,0–3,0
Kokopuuhake	18,5–20,0	45–55	7,0–10,0	250–350	0,7–0,9	1,0–2,0
Kantomurske	17,2–20,9	12–45	6,8–15,5	250–300	0,7–1,2	0,5–20,0 (keski- määrin 4,0)
Pajuhake	18,6	51–53	8,1–8,5	300–440	0,3–0,4	0,4–1,1
Ruokohelpi (ke- vätkorj.)	17,3–18,7	10–25	12,6–16,6	60–80	0,3	1,0–8,0
Energiajyvä	17,3	11	15,5	600	2,6	2,0
Olki, silputtu	17,4	17–25	12,4–14,0	80	0,3–0,4	5,0
Kierrätyspoltto- aine, SRF	17,0–37,0	15–35	13,0–35,0	150–250	0,7–1,0	3,0–7,0
Kotitalouden kui- vajäte	18,5–23,4	25–36	11,7–16,9	150–200	0,7–1,0	5,3–16,1

8 KATTILAN HYÖTYSUHDE

Energiaprosesseissa hyötysuhteen käsite ei ole aina yksiselitteinen ja selkeä, koska energia sinänsä ei ole mikään yksi tuote vaan mitta, jolla mitataan erilaisia tuotteita. Energian säilymislain mukaan prosessien hyötysuhde on periaatteessa aina yksi. Käytännössä hyötysuhde tarkoittaa sitä, kuinka tehokkaasti esimerkiksi polttoaine saadaan muutettua sähköksi tai höyryksi (Raiko 2010, 26-27).

Polttoaineen muuttamisen hyötysuhdetta sähköksi voidaan ilmoittaa kaavalla:

$$\eta = \frac{E_e}{E_F} = \frac{P_e}{P_F} \quad (10)$$

Jossa,

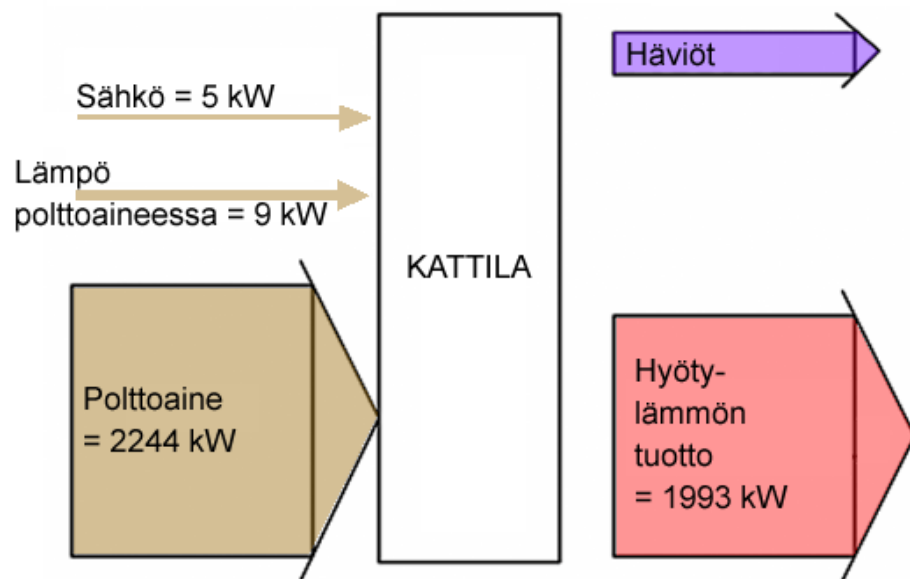
η	Hyötysuhde
E_e	Sähkön energia
E_F	Polttoaineen energia
P_e	Sähkön teho
P_F	Polttoaineen teho

Polttoaineen energiasisältö voi tarkoittaa useita eri asioita. Eurooppalaisen käytännön mukaan se tarkoittaa alemmaa lämpöarvoa, joka on palamisreaktiossa vapautuva entalpia, kun aineet ovat loppu- ja alkutiloissa normaaliolosuhteissa (25 °C, 1 atm). Tai sitten se voi tarkoittaa tehollista lämpöarvoa, josta vähennetään polttoaineen sisältämä kosteus. Asiayhteydessä on mainittava, kumpaa arvoa käytetään ja mikä on polttoaineiden kosteus, jos käytetään tehollista lämpöarvoa (Raiko 2010, 27).

Kattilan hyödyksi saadun lämpövirran suhdetta kattilaan tuotuun energia kutsutaan kattilan hyötysuhteeksi. Kattilan hyötysuhde määritellään yleisesti saksalaisen standardin DIN 1942 mukaan. Hyötysuhdemääritelmiä on käytössä kaksi: suora menetelmä ja epäsuora menetelmä. Kattilasta hyödyksi saatava energiavirta on suora menetelmä. Kattilan häviöiden määrittäminen ja hyötysuhteen määrittämiseen häviöiden kautta on epäsuora menetelmä. Hyötysuhteeseen vaikuttaa mm. polttotapa ja polttoaine (Knowenergy 2012).

8.1 Suora menetelmä

Kattilasta saatu hyötylämpövirtasta sekä kattilaan viedyn energiavirran avulla voidaan määrittellä kattilan hyötysuhde. Tätä menetelmää kutsutaan suoralla menetelmällä määrittelyksi hyötysuhteeksi (kuva 47). Kattilaan tuleva polttoaine jaetaan yleensä polttoainevirrasta riippumattomaan osaan ja polttoainevirtaan verrannolliseen osaan. Verrannollisia osia ovat: polttoaineeseen sitoutunut kemiallinen energia, palamisilmaan esilämmityksen aikana sitoutunut energia ja polttoaineen esilämmityksen aikana sitoutunut energia. (Knowenergy 2012).



KUVA 47. Kattilan tehokkuuden määrittäminen suoralla menetelmällä (KnowEnergy 2012)

Polttoaineeseen sitoutuneen kemiallisen energian mittana käytetään DIN-1942 –standardissa polttoaineen alemmaa tehollista lämpöarvoa. Tällöin ajatellaan, että savukaasuihin muodostuneen vesihöyryn lauhtumislämpöä ei ole mahdollista saada talteen. Amerikkalaisissa standardeissa käytetään ylempää tehollista lämpöarvoa. Kattilaan esilämmityksen mukana tuodut polttoaineen ja palamisilman energiavirrat saadaan lasketua, kun tunnetaan ominaislämmöt, lämpötilat ja ainevirrat (Knowenergy 2012).

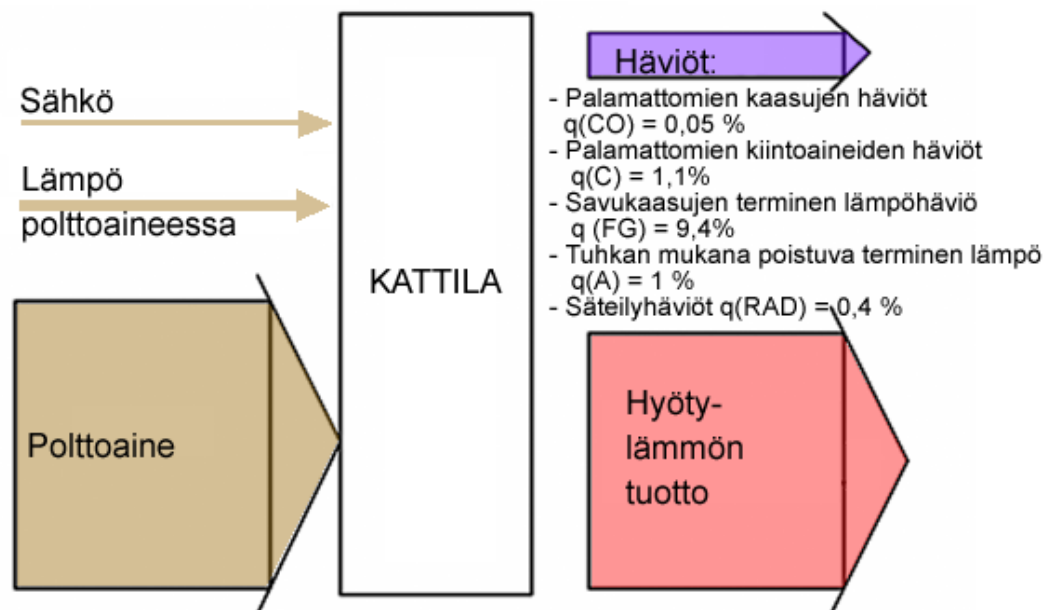
Kattilan (kuva 47) tehokkuus suoralla menetelmällä lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$\text{Tehokkuus} = \frac{\text{Hyötylämmön tuotto}}{\text{Energia sisään}} = \frac{1993 \text{ kW}}{(2244+9+5)\text{ kW}} = 0,88 = 88\% \quad (11)$$

Polttoaineesta riippumattomia energiavirtoja tulee myös kattilaan. Näitä ovat: höyrytöimisen ilman esilämmittimen lämmitys, tulistuksen säätöön käytetty ruiskutusvesi, myllyjen, puhaltimien ja pumppujen sähkömoottoreiden käyttö ja polttoaineen hajoitushöyry (öljyllä). Näiden määrä vaihtelee tapauskohtaisesti, joten ne on otettava huomioon tarkemmissa laskelmissa. Syöttöveden lämmittämiseen, tulistamiseen ja höyrystämiseen käytetään osa kattilaan tuotavasta energiasta (Knowenergy 2012).

8.2 Epäsuora menetelmä

Epäsuorassa menetelmässä kattilan hyötysuhde määritellään häviöiden kautta (kuva 48). Näin ollen saadaan parempi käsitys, mitkä tekijät vaikuttavat kattilan hyötysuhteen alenemiseen. Lisäksi nähdään, mihin toimenpiteisiin tulisi ryhtyä hyötysuhteen parantamiseen. Kattilan häviöt koostuvat: Säteily- ja johtumishäviöistä, tuhkan ja savukaasujen termisestä lämmöstä, palamattomista aineista tuhkassa ja kaasuista. Lisäksi kattilan hyötysuhdetta alentavat käynnistys- ja pysäytyshäviöt ja läpivirtaushäviöt (Knowenergy 2012).



KUVA 48. Kattilan tehokkuuden määrittäminen epäsuoralla menetelmällä (Knowenergy 2012)

Kattilan (kuva 48) tehokkuus epäsuoralla menetelmällä lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$\text{Tehokkuus} = 1 - q(\text{CO}) - q(\text{C}) - q(\text{FG}) - q(\text{A}) - q(\text{RAD}) = 1 - 0,0005 - 0,011 - 0,094 - 0,01 - 0,004 = 0,88 = 88\% \quad (12)$$

8.2.1 Palamattomien kaasujen häviöt

Suurten voimalaitosten palamattomat kaasut ovat lähinnä häkää eli hiilimonoksidia. Palamattomia kaasuja voivat olla myös erilaisia hiilivetyjä. Kattilan hyötysuhde laskee muutaman prosentin, jos savukaasujen CO-pitoisuus on 0,5 %. Normaalisti voimalaituskattiloissa palamattomien hiilimonoksidien päästöt ovat hyvin pieniä, noin 50 ppm. Tämä aiheuttaa noin prosentin häviöt (Knowenergy 2012).

8.2.2 Palamattomien kiintoaineiden häviöt

Kattilasta voi poistua palamattomia kiintoaineita lentotuhkan ja pohjatuhkan mukana. Näiden osuus saadaan määrittämällä tuhkan heikutushäviö polttamalla tuhka laboratoriossa. Palamatta jääneen polttoaineen aiheuttama häviö riippuu polttotekniikasta ja polttoaineesta sekä laitteiden säädöstä ja kunnosta. Polttoaineen voivat kasvaa useisiin prosentteihin, varsinkin alhaisen lämpöarvon omaavilla ja huonolaatuisilla polttoaineilla. Alle yhden prosentin häviöihin päästään neste ja kaasumaisilla polttoaineilla (Knowenergy 2012).

8.2.3 Savukaasujen terminen lämpöhäviö

Suurin osa kattilasta poistuvasta energiasta syntyy savukaasuista. Menetettyä energiaa kutsutaan savukaasuhäviöksi, jonka suuruus riippuu savukaasujen määrästä ja loppulämpötilasta. Savukaasujen tulisi poistua kattilasta mahdollisimman kylminä, jotta savukaasuhäviö olisi mahdollisimman alhainen. Rikkiä sisältävien polttoaineiden savukaasulämpötila tulisi olla 140 – 150 °C yläpuolella, jotta estetään lämpöpintojen syöpyminen. Jos lämpöpinnat likaantuvat, huononee lämmönsiirto kattilassa ja näin ollen savukaasujen loppulämpötila kasvaa ja savukaasuhäviö kasvaa. Savukaasuhäviöiden kannalta käytetyn ilmakertoimen tulisi olla mahdollisimman lähellä teoreettista miniarvoa. Palamiseen osallistumattoman ilman kierrätys kattilan läpi lisää savukaasuvirtaa, joten se lisää myös savukaasuhäviöitä. Ilmakerrointa ei saa kuitenkaan laskea niin, että epätäydellisen palamisen myötä palamattomien häviöt nousevat enemmän kuin savukaasuhäviöt pienenevät (Knowenergy 2012).

8.2.4 Tuhkan mukana poistuva termisen lämpö

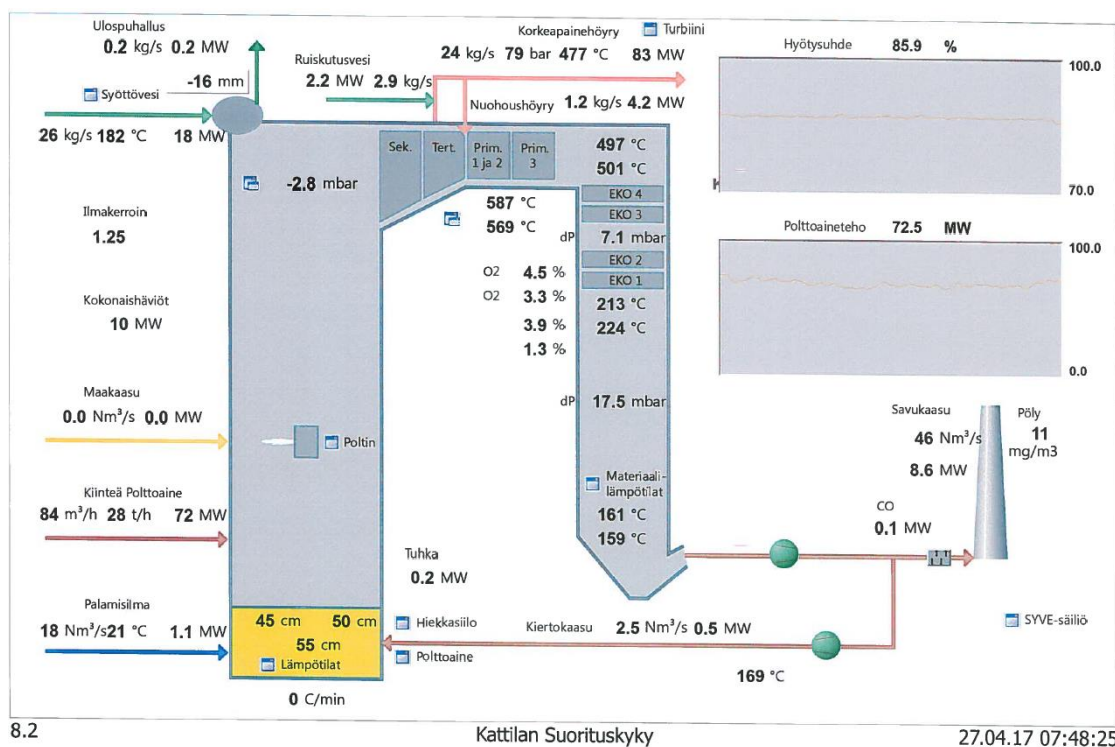
Kattilasta poistuu myös energiaa kuumen tuhkan mukana. Tuhkan termisen lämpöhäviön vaikutus kattilan hyötysuhteeseen jää pieneksi, jos polttoaineen tuhkapitoisuus on alhainen. Suurin vaikutus tuhkan termisestä lämpöhäviöstä on soodakattiloissa, jossa tuhka osuus polttoaineesta on noin 40 % (Knowenergy 2012).

8.2.5 Säteilöhäviöt

Kattilasta siirtyy lämpöä lämpöhäviönä ympäristöön, vaikka kattilat ovatkin hyvin eristettyjä. Jos kattilan ulkoseinämän lämpötila on alle 55 °C, kattilan lämpöhäviöt ovat 200 – 300 W/m²K. Suurempien kattiloiden suhteelliset lämpöhäviöt ovat pienempiä kuin pienten kattiloiden lämpöhäviöt, koska kattilan ulkoseinän pinta-ala ei kasva suorassa suhteessa kattilan tehoon. Kattilasta ympäristöön siirtyvä lämpö lämmittää kattilahuoneen ilmaa ja kattilan tarvitsema palamisilma otetaan talteen kattilahuoneen yläosasta kattilan lämpöhäviöiden muodossa (Knowenergy 2012).

9 POLTON OPTIMOINTI

Useimmat lämpölaitokset eivät käytä massavirtausmittauksia polttoaineen syötössä. Kattilaan menevä määrä lasketaan ruuvin kierroksista. Kattilaa säädetään päähöyryn asetuspainella. Ilman polttoaineen tarkkaa määrää voidaan ajaa kattilaa, koska höyryn paine määrää kattilaan menevän materiaalin syötön. Korjaus tehdään jäännöshapen ja polttoainekertoimen avulla (kuva 49). Jos voima- tai lämpölaitoksella ei ole on-line kosteusmittausta, toteutetaan kosteuden mittausta manuaalisesti. Kaikista laitokselle tulevista kuormista otetaan standardin mukainen kosteusanalyysi ja kerran kuukaudessa kaikilta polttoainetoimittajilta otetaan kokoomanäytteistä lämpöarvomääritys (Tossavainen, 2017).

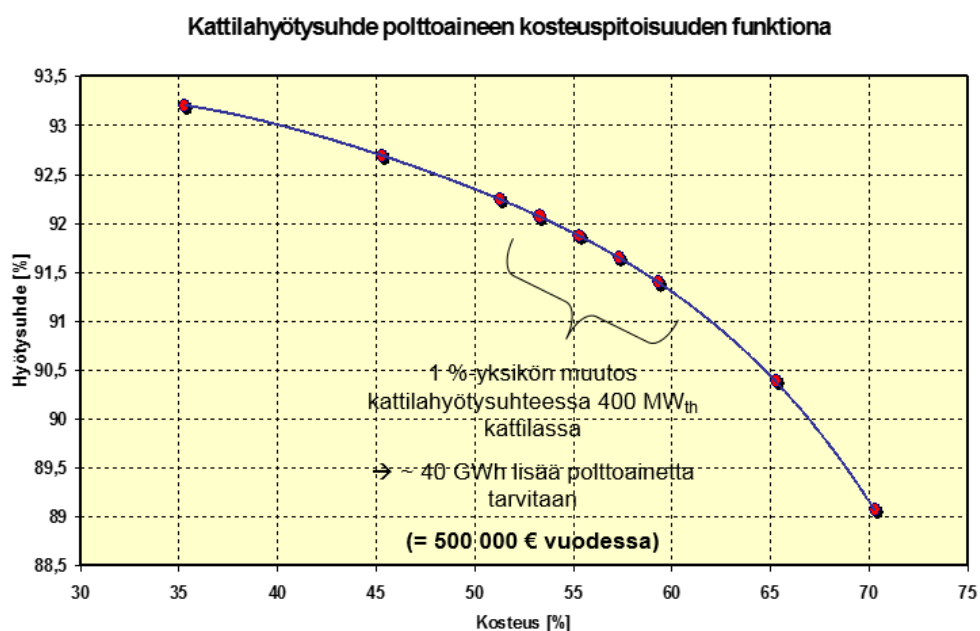


KUVA 49. Kattilan suorituskyky (Tossavainen, 2017)

Isommissa voimalaitoksissa, varsinkin leijupetikattiloilla, tarvitaan tarkempaa massavirtausmittausta polttoaineen syötön säätämiseen. Tämä on erityisen tarpeellinen voimalaitoksen ollessa vajaalla teholla eli kesäaikoina tai sellaisina aikoina, kun laitosta muista tuotannollisista syistä joudutaan ajamaan vajaa tehoisena. Silloin ongelmaksi voi muodostua mm. tulipesän vinokuormat ja polttoprosessin hallinta alkaa olla vaikeaa. Laitokset on suunniteltu toimimaan hyvällä hyötysuhteella, mutta tilanne hankaloituu mitä pienimmillä kuormilla joudutaan ajamaan. Silloin todella tärkeäksi avuksi tulevat massavirtausmittaukset, joiden avulla saadaan polttoaineen syöttö pidettyä optimaalisena kattilaan. (Nuija, 2017.)

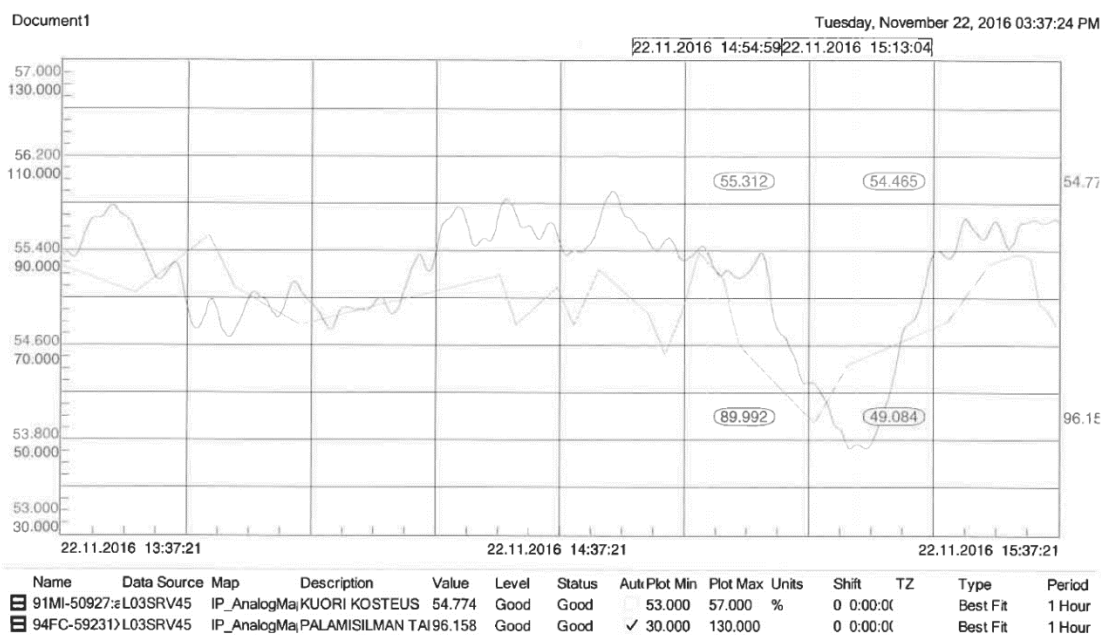
Polttoaineen syötössä kattilaan suureksi avuksi on myös polttoaineen kosteusprosentti. Tällä hetkellä ei tietomme mukaan ole yhtään voimalaitosta, jossa itse voimalaitoksen säätöpiirissä olisi mukana polttoaineen kosteusmittaus, mutta tulevaisuudessa se tulee varmasti näyttelemään suurta roolia. Meidän yrityksellä on muutamassa voimalaitoksessa käytössä on-line kosteusmittaus, ja niistä kerätään parhaillaan käyttökokemuksia. Monissa voimalaitoksissa poltetaan eri sekoitussuhteella eri aikoina eri koostumuksellisia polttoaineita, joten se aiheuttaa on-line kosteusmittaukselle suuria haasteita. Kosteusmittaus on tyypillisesti sijoitettu juuri ennen kattilaa sijaitsevaan syöttöruuviin, jotta nähdään polttoaineen kosteusprosentti juuri ennen tulipesään syöttämistä.

Kosteuden vaikutus kattilan hyötysuhteeseen on todella olennainen. Kuvan 50 perusteella polttoaineen oikealla kosteudella on suuri merkitys kattilan hyötysuhteeseen. Hyötysuhdetta parantamalla saadaan rahallista säästöä.



KUVA 50. Polttoaineseoksen kosteus on hallittava (Kärki 2015)

Polttoaineen laatu on merkittävä kattilan toimintaan vaikuttavista tekijöistä, kuten aikaisemmissa kappaleissa on mainittu. Laboratorioissa ja näytteenottoon perustuvat menetelmät ovat liian hitaita prosessin ohjauksen kannalta. Kattilan ohjauksen kannalta olisi parasta, että tieto polttoaineen laadusta ja määrästä saataisiin ennen materiaalin syöttöä tulipesään. Tärkeintä olisi tuntea syötettävän polttoaineen kosteus ja massavirta. Lisäksi palakoolla on merkitystä palamiseen. Kuvassa 51 nähdään, miten polttoaineen kosteuden muutos vaikuttaa palamisilman tarpeeseen.



KUVA 51. Polttoaineen kosteuskäyrä verrattuna palamisilman tarpeeseen (Voimalaitos X, 22.11.2016)

Kosteusmittaus on tällä hetkellä yksi mielenkiintoisin mittaus liittyen voimalaitoksen polton optimointiin. On olemassa myös yrityksiä, jotka kauppaavat polton optimointiin liittyviä ohjelmistoja, joilla parannetaan kattilan polttoprosessia keräämällä tietoa eri mittauksista. Näissä tärkeimpiä varmasti ovat polttoaineen massavirtaus ja päästömittaukset. Kuitenkin tulevaisuudessa kaikista merkittävin uusi tieto on polttoaineen kosteuden mittaus juuri ennen kattilaan syöttöä. Tämän tiedon mukaan ottaminen voimalaitoksen polttoprosessin parantamisessa on merkittävä. Tällä hetkellä tieto tulee vuorokauden myöhässä ja itse polttoprosessissa sitä ei pysty hyödyntämään. Ja isommissa laitoksissa prosessi on optimoitu jo hyvin, joten suurin lisäarvo, mitä isommat laitokset voivat saada, liittyvät polttoaineen kosteuteen. Yhtä tärkeää kosteustieto itseasiassa on pienilläkin polttolaitoksilla, varsinkin arinakattiloilla, joissa polttoaineen kosteus on vielä tärkeämpi kuin leijutuskattiloilla, mutta arinakattiloilla varustetuista voimalaitoksista puuttuu usein myös massavirtausmittauskin. Isommilla laitoksilla kosteus myös aiheuttaa ongelmia varsinkin, jos kattilaan tulee iso määrä hyvinkin kosteaa polttoainetta. Silloin hapen säätö hankaloituu ja päästöt lisääntyvät hetkellisesti, kunnes tilanne saadaan taas hallintaan. Teimme ryhmätyön energiatekniikan kurssilla, jossa aiheena oli höyrykattilan suunnittelu. Jokaiselle ryhmälle oli annettu eri lähtötiedot koskien polttoaineen ominaisuuksia liittyen niiden suhteeseen ja kosteuteen. Meidän ryhmän polttoaineen sekoitussuhde oli 25 % turvetta ja 75 % haketta. Hakkeen kosteus oli 50 % ja turpeen kosteus 40 % (kts. liite 1). Vertailimme ryhmien kesken saatuja tuloksia

ja huomasimme, miten kosteuden muutos ja polttoaineen seossuhde vaikuttavat lopputuloksiin.

Meidän kosteusmittaus pystyisi auttamaan kattilan ajoprosessia tällaisissa tilanteissa, jos huomataan selkeä tason muutos kosteudessa muutamia minutteja, ennen kuin kosteampi polttoaine syötetään kattilaan. Kosteusmittauksesta voisi tulla järjestelmähälytys, joka valvomossa noteerataan ja voidaan aloittaa tarvittavat toimenpiteet hapen säädön osalta, että polttoprosessi pystyisi mahdollisimman tehokkaana.

Teimme noin vuoden kestäneen tutkimuksen kattilan syöttöruuvissa sijaitsevasta kosteusmittauksesta. Ensin ruuviin oli sijoitettu kilpailijoiltammekin tuttu kapasitiiviseen toimintaperiaatteeseen perustuva anturi, mutta jo alkuvaiheessa tutkimuksia huomasimme, että kapasitiivinen anturi ”tukehtuu” materiaalin kosteuteen, koska tämä ko. laitos on leijupetikattilalla varustettu ja polttoaineen kosteus saattoi esim. syksyisin ja pienillä turpeen määrillä nousta jopa 55 prosenttiin. Kapasitiivinen mittaus on omimmillaan, kun mitataan alle 35 kosteusprosentin homogeenisiä materiaaleja. Testilaitoksesamme poltetaan lietteen, koivun ja havun kuoren, metsähakkeen, erilaisten ostohakkeiden ja turpeen sekoitusta, joten polttoaine on hyvin epähomogeenistä ja näin ollen hyvin hankalaa mitata. Kuitenkin vaihdettuamme anturin mikroaaltotekniikkaan perustuvaan anturiin, jolle edustamamme valmistaja SWR engineering lupaa kosteudenmittaamisen onnistuvan jopa 85 prosentin kosteuksista, alkoi mittauksen virheprosentit laskea alle 2 kosteusprosentti yksikön, kun kapasitiivisella anturilla virheprosentti oli jopa 5 % yksikköä.

Radiometriset mittaukset ovat voimalaitoksissa todella tärkeitä varsinkin massavirtausten mittaamiseksi, mutta myös pinnanmittaamiseksi silloista tai tasaus-/syöttötaskuista, sillä prosessiolosuhteet ovat niin haastavia. Esimerkiksi mikroaaltotekniikkaan perustuvat anturit likaantuvat ja näyttävät pinnan helposti väärin, koska ne ovat säiliöiden sisäpuolella, joten anturit vaativat puhdistusta aika ajoin. Radiometriset mittaukset eivät siis kosketa prosessia, ja näin ollen niihin ei vaikuta prosessiolosuhteista johtuva rasitus. Myös erilaiset ultraäänipinnanmittaukset ovat häiriöherkkiä prosessiolosuhteista ja myös hajakaiuista johtuen.

Monet voimalaitokset eivät pystyisi toimimaan ilman radiometrisiä mittauksia niin hyvin. Tavallisesti polttoaineen syöttö on toteutettu kolakuljettimella kattilan molemmilla

seinillä sijaitseville syöttöruuveille ja jälkimmäiselle ruuville tasainen polttoainevirta turvataan tasaustaskun avulla. Eli kolakuljetin tuo polttoaineen siiloista ja toisen seinän syöttöruuvi sijaitsee esimerkiksi kolakuljettimen puolivälissä, minne suurin osa polttoaineesta menee. Kolakuljettimen päässä on toisen seinän syöttöruuvi ja sille ei polttoainetta riittäisi yhtä paljoa ilman tasaustaskua ja ruuveissa ja kolakuljettimessa olevaa massavirtausmittausta ja tasaustaskun pintamittausta. Ilman näitä mittauksia kattilaan syntyy vinokuorma mikä on vaarallinen ja voi aiheuttaa kattilan alasajon. Polttoainekentällä on tyypillisesti isommat siilot, joilta polttoaine tuodaan voimalaitoksen yhteydessä oleviin ns. päiväsiiloihin tyypillisesti hihna- tai kolakuljettimella.

Massavirtausmittaukset kalibroidaan aina tapauskohtaisesti ja yleensä aina materiaalilla. Massavirtausmittausten tarkkuus riippuu kuljettimen tyypistä. Niiden tarkkuus saadaan noin 2-5 prosentin luokkaan, jos kyseessä on ruuvikuljetin, jonka fyysiset ominaisuudet ja täyttöaste tekevät siitä haastavan kalibroitavan. Jos kalibrointi voidaan suorittaa ajamalla mittauksen läpi tunnettu määrä polttoainetta, saadaan mittauksen tarkkuus jopa prosentin luokkaan hihnakuljettimilla. Kuljettimien täytösasteet ja fyysiset ominaisuudet vaikuttavat mittauksen tarkkuuteen. Massavirtausmittauksista on todella suuri apu isoilla voimalaitoksilla varsinkin lämmityskauden ulkopuolella, kun laitos saattaa tuottaa sähköä ja/tai höyryä ja kaukolämmön tuotanto on minimissään tai muuten kysynnän ollessa alhaalla pystytään kattila pitämään ajossa myös pienellä kuormalla mahdollisimman taloudellisesti.

10 YHTEENVETO

Tulevaisuudessa online kosteusmittaukset näyttelevät isoa roolia voimalaitosten poltto-prosessissa. Ongelmana mittauksessa on se, kun kaikki yli 5 MW:n voimalaitokset polttavat lähestulkoon aina polttoaineseoksia, jotka sekoittuvat jo ennen päiväsiiloa tai ennen kattilaa, joten mittaukselle ideaalinen paikka voi olla hankala löytää. Jos kosteusmittauksella päästään mittaamaan homogeenistä materiaalia, voidaan sanoa, että mitaus on hyvin tarkka kosteuden suhteen. Mutta polttoaineseosten suhteen, kun mitaus on kalibroitu tietynlaisella seoksella esim. turve 15 %, puun kuori 55 %, murskattua puuta 20 % ja lietettä 10 %, niin tämän seoksen suhdeluvun muuttuessa myös kosteusmittaukseen tulee virhettä. Toisaalta virheprosentti ei välttämättä ole kovin suuri. Vaikka virhettä tulee, niin mitaus noteeraa kosteuden muutoksen, ja se edesauttaisi

polttoprosessia tai valvomon henkilökunnan tulevia toimenpiteitä, kun on tiedossa polttoaineessa tapahtuva muutos.

Jos voimalaitoksella on kaksi eri turpeen toimittajaa ja kosteusmittaus on kalibroitu toisen toimittajan turpeella, nähdään valvomossa heti, kun turpeen toimittaja vaihtuu. Tämän avulla pystytään muuttamaan kattilan säätöjä. Turpeessa on silloin eri tuhkapitoisuus ja näin saadaan taas kattilan polttoprosessi muutettua optimaaliseksi tälle turpeelle.

Massavirtausmittaukset ovat myös todella tärkeitä hankintoja meidän mielestämme jo pienistä voimalaitoksista alkaen. Tulevaisuudessa yhä useammat laitokset saattavat toimia jopa miehittämättöminä, joten mittaustarkkuus tulee korostumaan huomattavasti. Lisäksi massavirtausmittauksen avulla voidaan havaita, jos esimerkiksi kattilasiilo tai tasaustasku holvaa eli voi aiheutua tukos syötössä.

Radiometrisiä mittaukset saattavat joissain aiheuttaa jopa pelkoa, mutta niiden ilmaistekniikka on mennyt eteenpäin ja sen johdosta säteilylähteiden voimakkuudet ovat pudonneet huomattavasti. Esimerkiksi säteilylähteet mitoitetaan nykyään siten, että ilmaisimen puolella säteilyvoimakkuus on tyypillisesti luokkaa 2-5 $\mu\text{Sv/h}$. Sama säteilyvoimakkuus on lentokoneessa, noin 10 kilometrissä meren pinnan yläpuolella. Tämä säteily on peräisin avaruudesta.

Voimalaitosten suurimmat käyttökustannukset tulevat polttoainekustannuksista, joten sen säästäminen ja polton maksimaalinen optimointi ovat kannattavia. Tähän pystytään hankkimalla luotettavat mittalaitteet.

LÄHTEET

Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama, J. & Korhonen, J 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia, VTT Technology. [WWW]. Saatavissa <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2016/T258.pdf>

Energiaverkko. Sähköntuotantoprosessi. 2003. [WWW]. Saatavissa http://elearn.ncp.fi/materiaali/kainulainens/energiaverkko/energian_tuotanto/tuotantoprosessit/sahkontuotanto.htm

Huhtinen, Kettunen, Nurminen ja Pakkanen 2000. Höyrykattilatekniikka. Helsinki: Oy Edita Ab.

Huhtinen, Korhonen, Pimiä ja Urpalainen 2013. Voimalaitostekniikka. Tampere: Juvenes Print – Suomen Yliopistopaino Oy.

Klemola Seppo 2002. Säteily- ja ydinturvallisuus. Kirja 1 Säteilyn ilmaisimet. Karisto Oy:n kirjapaino, Hämeenlinna 2004. Kuvat Järvinen Juha

Knowenergy. Energiatekniikan oppimisympäristö. 2012. [WWW]. Saatavissa <http://www.knowenergy.net/>

Knuuttila, Kirsi (toim.) 2003. Puuenergia. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.

Krabbe, Katariina 2015. Polte-lehti 3/2015. [WWW]. Saatavissa http://www.polte-lehti.fi/pdf/polte_7_30-32.pdf. Luettu 16.3.2017

Majanne & Välisuo 2007. Termodynamiikkaa. Energiatekniikan automaatio TKK2007-luentomateriaali. [WWW]. Saatavissa [http://docplayer.fi/18786352-Konventionaalisessa-lampovoimaprosessissa-muunnetaan-polttoaineeseen-sitoutunut-ke-miallinen-energia-lampo-sahkoenergiaksi-hoyryprosessin-avulla.html](http://docplayer.fi/18786352-Konventionaalisessa-lampovoimaprosessissa-muunnetaan-polttoaineeseen-sitoutunut-kemiallinen-energia-lampo-sahkoenergiaksi-hoyryprosessin-avulla.html)

Nuija, Matti 2017. Sähköpostiviesti 27.4.2017. Kymin Voima.

Perttula, Raimo 2000. Energiatekniikka. Porvoo: WSOY.

Raiko, Risto 2010. ENER-8100 Energiatalous. Luentomateriaalit.

Sandberg ja Paltemaa 2002. Säteily- ja ydinturvallisuus. Kirja 1 Säteily ja sen havaitseminen. Karisto Oy:n kirjapaino, Hämeenlinna 2004. Kuvat Järvinen Juha

Tossavainen, Juhani 2017. Sähköpostiviesti 27.4.2017. Sähkö- ja Automaatiotyönjohtaja. Keravan Energia.

Väisälä, Korpela ja Kaituri 2002. Säteily- ja ydinturvallisuus. Kirja 3 Säteilyn käyttö. Karisto Oy:n kirjapaino, Hämeenlinna 2004. Kuvat Järvinen Juha. [WWW]. Saatavissa <http://www.stuk.fi/julkaisut/sateily-ja-ydinturvallisuus-kirjasarja/sateilyn-kaytto>

LIITE 1(1).
Höyrykattilan suunnittelu

Petri Anttila ja Mika Rönkkönen
HÖYRYKATTILAN SUUNNITTELU
HARJOITUSTYÖ, RYHMÄ 2
30.10.2015

SISÄLLYS

SYMBOLILUETTELO

1 JOHDANTO

2 HARJOITUSTYÖ

2.1 Lähtötiedot

2.2 Polttoaineen koostumus ja lämpöarvo

2.3 Palamistaulukko

2.4 Kattilan ainevirrat

2.5 Vesihöyrypiirin suunnittelu

2.6 Savukaasun lämpötilojen tarkastelu

3 TULOSTEN TARKASTELU

LIITTEET

Liite 1. Palamistaulukko

SYMBOLILUETTELO

c_p	ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg°C]
h	entalpia [kJ/kg]
H_u	lämpöarvo [MJ/kg]
m	massa [kg]
q_m	massavirta [kg/s]
r	ominaishöyrystymislämpö [MJ/kg]
T	lämpötila [°C] [K]
w	virtausnopeus [m/s]
λ	ilmakerroin [-]
ϕ	teho [kW]

1 JOHDANTO

Harjoitustyössä tutkimme höyrykattilassa käytettävän polttoaineseoksen ominaisuuksia annettujen alkuarvojen mukaan. Saatujen arvojen perusteella laskimme polttoaineen virtausnopeuksia ja kattilan eri osien tehoja. Kattilassa käytettävän polttoaineen palamisominaisuuksien mukaan määritimme tarvittavan polttoaineen määrän, palamisilmamäärän ja savukaasumäärän.

2 HARJOITUSTYÖ

2.1 Lähtötiedot

Alla olevassa taulukossa on esitetty ryhmäkohtaiset alkuarvot.

Taulukko 1. Alkuarvot.

RYHMÄ	TURPEEN OSUUS POLTTOAINEESSA [%]	TUOREHÖYRYN LÄMPÖTILA [°C]	TUOREHÖYRYN PAINE [bar]	TUOREHÖYRYN MASSAVIRTA [kg/s]
2	25	500	100	40

2.2 Polttoaineen koostumus ja lämpöarvo

Kattilassa käytetään polttoaineena hakkeen ja turpeen seosta. Turpeen massaosuus polttoaineseoksessa saadaan taulukosta 1. Hakkeen kosteus on 50 % ja turpeen kosteus on 40 %.

Taulukko 2. Polttoaineiden kuiva-ainekoostumus (%)

	C	H	S	O	N	tuhka
hake	50,4	6,2	0,0	42,5	0,5	0,4
turve	55,0	5,5	0,2	32,6	1,7	5,0

Polttoaineseokselle määritetään kuiva-ainekoostumus sekä kosteus taulukon 1 ja 2 mukaisista arvoista. Kuivan polttoaineen lämpöarvo lasketaan alkuainekoostumuksen mukaan yhtälöstä 1. Kostean polttoaineen lämpöarvo määritetään kuivan polttoaineen lämpöarvosta (yhtälö 2).

$$H_{u(\text{kuiva})} = 34,8m_C + 93,8m_H + 10,5m_S + 6,3m_N - 10,8m_O \quad (1)$$

$$H_{u(\text{kostea})} = H_{u(\text{kuiva})} \cdot (1 - m_{H_2O}) - r_{25^\circ C} \cdot m_{H_2O} \quad (2)$$

Höyrykattilan suunnittelu

joissa H_u lämpöarvo [MJ/kg]
 m komponentin massa yhdessä kilossa polttoainetta [kg]
 $r_{25^\circ\text{C}}$ veden ominaishöyrystymislämpö (2,443 MJ/kg)

Hakkeen osuus seoksesta 75 % Kuiva hake 50 % Kostea hake 50 %

Turpeen osuu seoksesta 25 % Kuiva turve 60 % Kostea turve 40 %

Seoksen massa $m_s = 1000 \text{ g}$

Hakkeen massa $m_H = 750 \text{ g}$

Turpeen massa $m_T = 250 \text{ g}$

Kuivan hakkeen massa $m_{HK} = 750 \text{ g} \times 0,5 = 375 \text{ g}$

Kuivan turpeen massa $m_{TK} = 250 \text{ g} \times 0,6 = 150 \text{ g}$

Veden massa $m_V = 1000 \text{ g} - 375 \text{ g} - 150 \text{ g} = 475 \text{ g}$

Seoksen kosteus on 47,5 %

Taulukko 3. Polttoaineen kuiva-ainekoostumuksen laskeminen

C, Hake	$50,4 \times 0,75 = 37,8$	H, Hake	$6,2 \times 0,75 = 4,65$
C, Turve	$55 \times 0,25 = 13,75$	H, Turve	$5,5 \times 0,25 = 1,375$
C, Seos	$37,8 + 13,75 = 51,55$	H, Seos	$4,65 + 1,375 = 6,025$
S, Hake	$0,0 \times 0,75 = 0$	O, Hake	$42,5 \times 0,75 = 31,875$
S, Turve	$0,2 \times 0,25 = 0,05$	O, Turve	$32,6 \times 0,25 = 8,15$
S, Seos	$0 + 0,05 = 0,05$	O, Seos	$31,875 + 8,15 = 40,025$
N, Hake	$0,5 \times 0,75 = 0,375$	Tuhka, Hake	$0,4 \times 0,75 = 0,3$
N, Turve	$1,7 \times 0,25 = 0,425$	Tuhka, Turve	$5,0 \times 0,25 = 1,25$
N, Seos	$0,375 + 0,425 = 0,8$	Tuhka, Seos	$0,3 + 1,25 = 1,55$

Höyrykattilan suunnittelu

$$H_{u(Kuiva)} = 34,8 \times 0,5115 \text{ kg} + 93,8 \times 0,06025 \text{ kg} + 10,5 \times 0,0005 \text{ kg} + 6,3 \times 0,008 \text{ kg} \\ - 10,8 \times 0,4003 = \mathbf{19,3 \text{ MJ/kg}}$$

$$H_{u(Kostea)} = 19,3 \text{ MJ/kg} \times (1 - 0,475 \text{ kg}) - 2,443 \text{ MJ/kg} \times 0,475 \text{ kg} = \mathbf{9,0 \text{ MJ/kg}}$$

Kuivan polttoaineen lämpöarvo on 19,3 MJ/kg

Kostean polttoaineen lämpöarvo on 9,0 MJ/kg

2.3 Palamistaulukko

Polttoainetta poltetaan teoreettista ilmamäärää suuremmalla ilmamäärällä, jotta epätäydellistä palamista ei muodostuisi. Palamisilmakerroin on 1,3. Ilmakerroin tarkoittaa todellisen ilmamäärän suhdetta teoreettiseen ilmamäärään. Palamisilman oletetaan olevan täysin kuivaa, jolloin ilman mukana ei tule vettä savukaasuihin.

Polttoaineen palamista voidaan havainnollistaa siten, että polttoaineesta ja ilmasta muodostuu savukaasua ja tuhkaa. Yli-ilmamäärän osuus siirtyy savukaasujen joukkoon.



Kuva 1. Palaminen

Polttoainekilon palamisessa tarvittava ilmamäärä sekä muodostuvien savukaasujen määrä ja koostumus määritetään liitteessä 1 olevan palamistaulukon avulla. Polttoaineessa olevat palavat komponentit reagoivat hapen kanssa seuraavien reaktioyhtälöiden mukaisesti.

hiili: $C + O_2 \rightarrow CO_2$

vety: $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$

rikki: $S + O_2 \rightarrow SO_2$

Oletetaan, että typen oksidien ja hiilimonoksidin muodostuminen on pientä.

Ainemäärät on oltava yhtäsuuret ennen ja jälkeen palamisen kuten alla on todistettu:

Ilma + polttoaine = $4252,4 \text{ g} + 1000 \text{ g} = 5252,4 \text{ g}$

Savukaasut + tuhka = $5244,3 \text{ g} + 8,1 \text{ g} = 5252,4 \text{ g}$

Tarvittava ilmamäärä on siis $4,3 \text{ kg/kgPA}$ ja savukaasuja muodostuu $5,2 \text{ kg/kgPA}$.

2.4 Kattilan ainevirrat

Kattilan hyötäteho määritetään kiertoaineen massavirran ja entalpian muutoksen avulla. Kattilan hyötysuhde on 88 % ja syöttöveden lämpötila on 200 °C. Polttoaineen, palamisilman sekä savukaasun massavirrat määritetään polttoainetehon, polttoaineen lämpöarvon sekä palamistaulukosta saatujen arvojen mukaan.

$$\phi_{hyöty} = q_{m,höyry}(h_{höyry} - h_{vesi})$$

$$\phi_{pa} = q_{m,pa}H_u$$

joissa	ϕ	teho [kW]
q_m	massavirta [kg/s]	
h	entalpia [kJ/kg]	
H_u	lämpöarvo [kJ/kg]	

$$q_{m,höyry} = 40 \text{ kg/s}$$

$$h_{höyry} = 3375 \text{ kJ/kg (tuorehöyryn } 500^\circ\text{C}/100\text{bar entalpia)}$$

$$h_{vesi} = 850 \text{ kJ/kg (syöttöveden } 200^\circ\text{C entalpia)}$$

$$\eta = 88 \% = 0,88$$

$$\phi_{hyöty} = \frac{40 \text{ kg}}{\text{s}} \times \left(3375 \text{ kJ/kg} - \frac{850 \text{ kJ}}{\text{kg}} \right) = 101000 \text{ kW} = \mathbf{101 \text{ MW}}$$

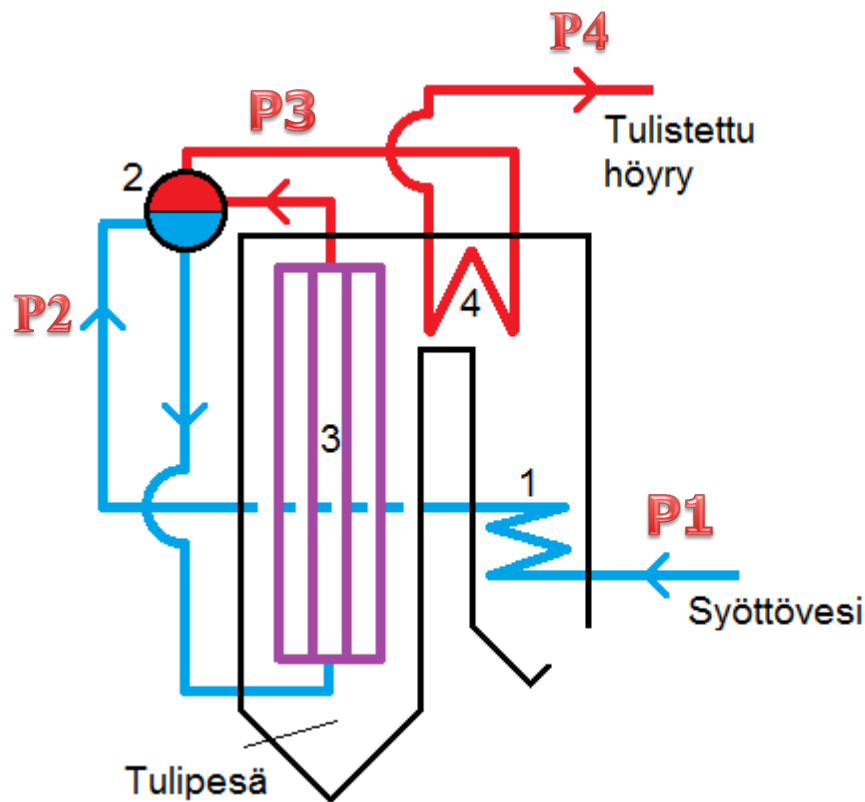
$$\eta = \frac{\phi_{hyöty}}{\phi_{pa}}$$

$$\phi_{pa} = \frac{\phi_{hyöty}}{\eta} = \frac{101 \text{ MW}}{0,88} = \mathbf{114,8 \text{ MW}}$$

$$q_{m,pa} = \frac{\phi_{pa}}{H_u} = \frac{114,8 \text{ MW}}{9,0 \text{ MJ/kg}} = \mathbf{12,76 \text{ kg/s}}$$

2.5 Vesihöyrypiirin suunnittelu

Kattilan vesihöyrypiiri suunnitellaan alla olevan kuvan mukaisesti.



Kuva 2. Kattilan vesihöyrypiiri

Syöttövesi virtaa veden esilämmittimen (1) kautta höyrylieriöön (2). Höyrylieriön alaosassa on kylläistä vettä, mutta veden esilämmittimessä vesi lämmitetään jonkin verran kylläistä lämpötilaa matalammaksi. Tällä estetään veden kiehuminen esilämmittimessä. Höyrystin (3) lämmittää syöttöveden kylläiseksi höyryksi. Kylläinen höyry tuuletetaan tulistimessa tuorehöyryksi (4).

Seuraavat asiat yksinkertaistetaan vesihöyrypiirin suunnittelussa:

- vesi lämpenee esilämmittimessä 15 °C alle kylläisen lämpötilan
- ulospuhallusta ja ruiskutusta ei huomioida (veden/höyryn massavirta on vakio)
- tulistinvaiheita tarkastellaan yhtenä kokonaisuutena
- putkistoissa ei ole painehäviöitä (veden/höyryn paine on vakio)

Lähtötietojen perusteella voidaan määrittää kuvaan kaksi lisättyjen pisteiden P1-P4 arvot.

Höyrykattilan suunnittelu

Veden paineella ei ole käytännössä merkitystä veden entalpiaan joten veden entalpia saadaan höyrytaulukosta lämpötilan perusteella pisteeseen P1.

Painehäviöitä ei ole joten paine on vakio joka pisteessä (P1-P4).

Höyrykattilan lieriössä on kylläinen tila, koska lieriö sisältää vettä ja höyryä samassa lämpötilassa. Höyrytaulukosta voidaan määrittää lämpötila joka vastaa lieriön painetasoa. Lämpötila on noin 310°C pisteessä P3. Näin ollen P2 on siis 15°C alhaisempi eli 295°C.

Lisäksi veden ja höyryn massavirta on siis vakio joka pisteessä (P1-P4).

Kaikkien pisteiden tarvittavat arvot ovat siis tiedossa.

Taulukko 4. Kattilan vesihöyrypiirin tarkastelupisteet

olomuoto	PISTE	massavirta (kg/s)	lämpötila (°C)	paine (bar)	entalpia (kJ/kg)
vesi	P1	40	200	100	850
vesi	P2	40	295	100	1320
kylläinen höyry	P3	40	310	100	2730
tulistettu höyry	P4	40	500	100	3375

Lämmönsiirtimissä siirtyvä teho määritetään nyt veden/höyryn massavirran ja entalpiamuutoksen kautta.

$$\phi = q_m * \Delta h$$

jossa ϕ teho [kW]

q_m massavirta [kg/s]

h entalpia [kJ/kg]

$$\phi_{ekonomaiseri} = q_m * (h_2 - h_1) = 40 \frac{kg}{s} * \left(\frac{1320kJ}{kg} - \frac{850kJ}{kg} \right) = 18800kW = 18,8MW$$

$$\phi_{höyrystin} = q_m * (h_3 - h_2) = \frac{40kg}{s} * \left(\frac{2730kJ}{kg} - \frac{1320kJ}{kg} \right) = 56400kW = 56,4MW$$

$$\phi_{tulistin} = q_m * (h_4 - h_3) = \frac{40kg}{s} * \left(\frac{3375kJ}{kg} - \frac{2730kJ}{kg} \right) = 25800kW = 25,8MW$$

$$\phi_{hyöty} = \phi_{eko} + \phi_{höyrystin} + \phi_{tulistin} = 18,8MW + 56,4MW + 25,8MW = 101MW$$

2.6 Savukaasun lämpötilojen tarkastelu

Kattilan savukaasupuolen suunnittelu aloitetaan laskemalla polttoaineen adiabaattinen palamislämpötila. Adiabaattisella palamislämpötilalla tarkoitetaan polttoaineen palamista siten, että lämpöä ei siirry ympäristöön. Tällöin kaikki polttoaineen sisältämä kemiallinen energia siirtyy savukaasujen lämmitykseen.

$$T_{ad} = \frac{H_u + c_{pi} \cdot T_i \cdot \frac{q_{mi}}{q_{mpa}}}{c_{psk} \cdot \frac{q_{msk}}{q_{mpa}}}$$

jossa	T_{ad}	adiabaattinen palamislämpötila [°C]
	H_u	polttoaineen lämpöarvo [kJ/kg]
	c_{pi}	ilman ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg°C]
	T_i	palamisilman lämpötila [°C]
	q_{mi}	palamisilman todellinen massavirta [kg/s]
	q_{mpa}	polttoaineen massavirta [kg/s]
	c_{psk}	savukaasun ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg°C]
	q_{msk}	savukaasun todellinen massavirta [kg/s]

Ilman ja savukaasun ominaislämpökapasiteetit oletetaan vakioiksi, ilmalle 1,0 kJ/kg°C ja savukaasulle 1,25 kJ/kg°C. Palamisilman lämpötila on 300 °C.

Ilman massavirta q_{mi} saadaan polttoaineen massavirran ja ilmantarpeen mukaan.

Savukaasun massavirta q_{msk} voidaan määrittää polttoaineen massavirran ja savukaasujen muodostumisen perusteella.

$$q_{mpa} = 12,76 \text{ kg/s}$$

$$q_{mi} = q_{mpa} \cdot \text{ilmantarve} = 12,76 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 4,3 \frac{\text{kg}}{\text{kgPA}} = 54,87 \text{ kg/s}$$

$$q_{msk} = q_{mpa} \cdot \text{savukaasumäärä} = 12,76 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 5,2 \frac{\text{kg}}{\text{kgPA}} = 66,35 \text{ kg/s}$$

Höyrykattilan suunnittelu

$$T_{ad} = \frac{H_u + c_{pi} * T_i * \frac{q_{mi}}{q_{mpa}}}{c_{psk} * \frac{q_{msk}}{q_{mpa}}} = \frac{9000 \frac{kJ}{kg} + 1,0 \frac{kJ}{kg^{\circ}C} * 300^{\circ}C * \left(\frac{54,87 \frac{kg}{s}}{12,76 \frac{kg}{s}} \right)}{1,25 \frac{kJ}{kg^{\circ}C} * \left(\frac{66,35 \frac{kg}{s}}{12,76 \frac{kg}{s}} \right)} = 1583^{\circ}C$$

Kattilan höyrystinosassa siirtyvän tehon sekä adiabaattisen palamislämpötilan mukaan määritetään savukaasun lämpötila tulipesässä. Savukaasu poistuu myös tässä samassa lämpötilassa tulipesästä.

$$\Phi_{höyrystin} = q_{msk} c_{psk} (T_{ad} - T_{tulipesä})$$

jossa	$\Phi_{höyrystin}$	höyrystimen teho [kW]
	q_{msk}	savukaasujen massavirta [kg/s]
	c_{psk}	savukaasujen ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg°C]
	T	lämpötila [°C]

$$T_{tulipesä} = T_{ad} - \frac{\Phi_{höyrystin}}{q_{msk} * c_{psk}} = 1583^{\circ}C - \left(\frac{56400 kW}{66,35 \frac{kg}{s} * 1,25 \frac{kJ}{kg^{\circ}C}} \right) = 903^{\circ}C$$

Savukaasun lämpötila muiden lämmönsiirtimien jälkeen määritetään samalla periaatteella eli kuinka paljon savukaasujen on jäähdyttävä, jotta tarvittava teho siirtyisi.

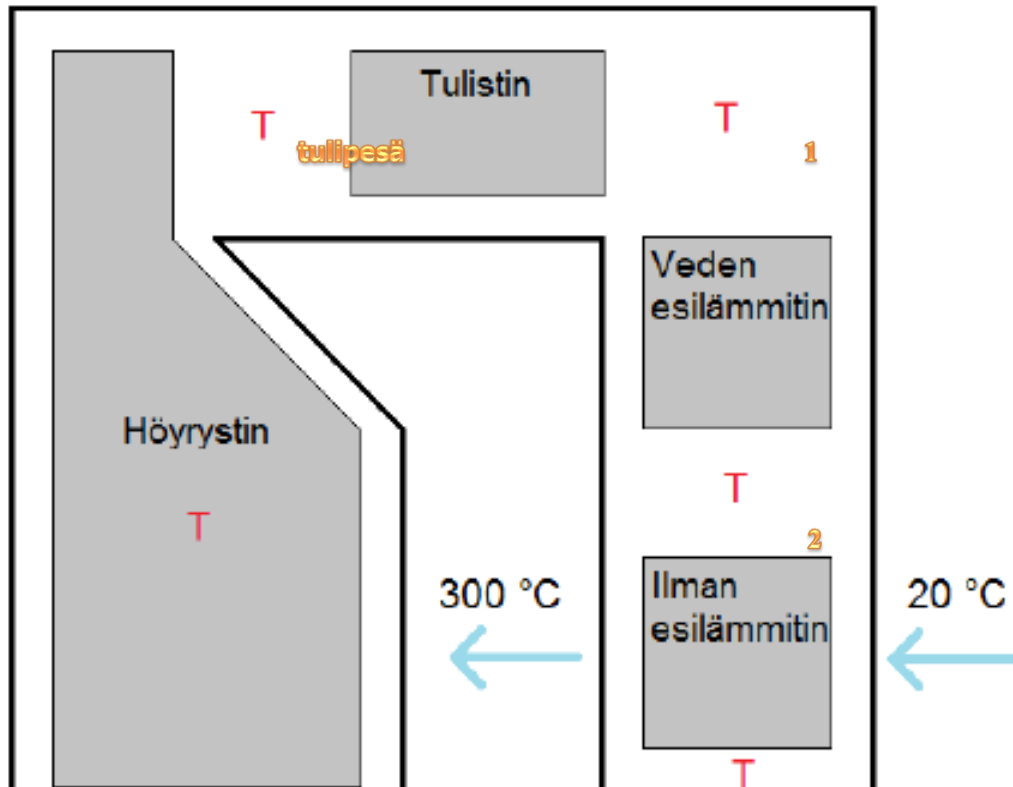
$$T_1 = T_{tulipesä} - \frac{\Phi_{tulistin}}{q_{msk} * c_{psk}} = 903^{\circ}C - \left(\frac{25800 kW}{66,35 \frac{kg}{s} * 1,25 \frac{kJ}{kg^{\circ}C}} \right) = 592^{\circ}C$$

$$T_2 = T_1 - \frac{\Phi_{ekonomaiseri}}{q_{msk} * c_{psk}} = 592^{\circ}C - \left(\frac{18800 kW}{66,35 \frac{kg}{s} * 1,25 \frac{kJ}{kg^{\circ}C}} \right) = 365^{\circ}C$$

Kattilassa käytetään lisäksi palamisilman esilämmitystä. Palamisilman lämpötilaksi valitaan 300 °C, koska tämä on sopiva palamisilman lämpötila kiinteille polttoaineille.

$$\Phi_{luvo} = q_{mi} * c_{pi} * \Delta T_i = 54,87 \frac{kg}{s} * 1,0 \frac{kJ}{kg^{\circ}C} * (300^{\circ}C - 20^{\circ}C) = 15364 kW$$

$$T_3 = T_2 - \frac{\Phi_{luvo}}{q_{msk} * c_{psk}} = 365^{\circ}C - \left(\frac{15364 kW}{66,35 \frac{kg}{s} * 1,25 \frac{kJ}{kg^{\circ}C}} \right) = 180^{\circ}C$$



Kuva 3. Kattilan savukaasupuolen lämpötilojen määrittäminen

3

3 TULOESTEN TARKASTELU

Polttoaineseoksen lämpöarvoa vertailimme netistä löytämiimme tietoihin ja niiden perusteella laskemamme lämpöarvo vaikuttaa oikealta. Alla olevasta linkistä löytyy eri biopolttoaineiden lämpöarvoja:

http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/bioenergia/tietolahteita/biopolttoaineiden_lampoarvoja

Palamistaulukkoon laskimme seoksen sisältämät ainemäärät ja vertasimme saadun seoksen arvoja ympäristöministeriön ja energiateollisuuden julkaiseman tutkimuksen tuloksiin. Alla linkki tutkimukseen:

<http://www.ym.fi/download/noname/%7B200B1E69-09BB-4654-8DBC-F67274431193%7D/30742>

Höyrykattilan suunnittelu

Ominaisuus	Hake	Kuori	Puru	Jyrsinturve	Kivihiili
Kosteus, %	45-55	50-60	50-60	45-55	10
Tuhka, % (d)	0.5-2	1-3	0.5-1	6	14
Haihtuvat aineet, % (d)	80-90	70-80	70-80	65-70	30
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg (d)	19-20	19-20	19-20	20-21	29
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg (ar)	7-10	6-9	6-9	8-10	26
Hiili, % (d)	52	55	50	54	72
Vety, % (d)	6	6	6	5,5	4,5
Typpi, % (d)	<0,5	<0,5	<0,5	1,7	1,0
Rikki, % (d)	<0,05	<0,05	<0,05	0,2	<1,0
Happi, % (d)	40	37	43	33	8
Kloori, % (d)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,1

Kuva 4. Kiinteiden polttoaineiden tyypillisiä ominaisuuksia

Näitä arvoja vertailtaessa meidän palamistaulukon arvoihin tuloksemme vaikuttavat oikeilta.

Kivihiileen vertailtaessa tarvittava ilmamäärä ja syntyvä savukaasumäärä ovat huomattavasti pienemmät (jopa yli 50%). Yritimme löytää netistä hakkeen tai turpeen suhteen vastaavia arvoja, mutta emme löytäneet. Löysimme kuitenkin insinööriyön jossa oli laskettu ilmakertoimella 1,35 7,4% kostean pelletin poltossa syntyvän savukaasuja 7,16kg/kgPA ja tarvittava ilmamäärä silloin on 6,17kg/kgPA. Pelletin lämpöarvo on melkein sama kuin meidän seoksen lämpöarvo ja lisäksi pelletin ainemäärät eivät mahdollisesti eroa seoksemme ainemääristä vaikkakin kosteus eroaa huomattavasti. Tästä teimme johtopäätöksen, että saamamme ilmamäärän tarve ja savukaasujen määrä ovat varmasti lähempänä juuri pelletin vastaavia kuin kivihiilen. Alla olevasta linkistä sivulta 43 löytyy pelletin tarvittava savukaasumäärä ja ilmanmäärä:

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/43838/Kakko_Markku.pdf?sequence=1

Kohdassa 2.4 laskettu hyötyteho vastaa kohdassa 2.5 laskettuun lämmönsiirtimissä yhteenlaskettuun tehoon – voimme todeta, että 101MW on laskettu oikein.

Adiabaattinen lämpötila on 1583°C, kun tunnilla laskimme kivihiilelle 1982°C. Tyypillisesti kiinteillä polttoaineilla adiabaattinen lämpötila on 1000-2000°C. Adiabaattisen lämpötilan perusteella pystyimme laskemaan tulipesän lämpötilan 903°C joka on kiinteillä polttoaineilla tyypillinen lämpötila kattiloissa. Käymme itse paljon voimalaitosten valvomoissa ja siellä on tullut seurattua tulipesän lämpötilaa – voidaan todeta, että myös tässä asiassa olemme oikeassa.

Palamistaulukko

Kemiallisiin reaktioihin perustuva polttoaineen palaminen												
		POLTTOAINE						SAVUKAASUT				
ilmakerroin	1,3	m-%	m [g]	M [g/mol]	n [mol]	O ₂ -tarve [mol]	CO ₂ [mol]	H ₂ O [mol]	SO ₂ [mol]	O ₂ [mol]	N ₂ [mol]	
polttoaineen kosteus	47,5 %	27,06	270,6	12,01	22,53	22,53	22,53					
kosteaa polttoainetta	1000 g	3,16	31,6	2,02	15,66	7,83	15,66					
kuiva polttoaine	seos	0,03	0,3	32,06	0,01	0,01			0,01			
C	51,55 %	21,01	210,1	32,00	6,57	-6,57						
H	6,03 %	0,42	4,2	28,02	0,15						0,15	
S	0,05 %	0,81	8,1									
O	40,03 %	47,50	475,0	18,02	26,36		26,36					
N	0,80 %	100,0	1000,0			23,81						
tuhka	1,55 %	$\text{typpeä ilmasta [mol]} = 79/21 * \text{hapen määrä [mol]}$										
		$\text{ylimäärähappi [mol]} = (\text{ilmakerroin} - 1) * \text{hapen määrä [mol]}$										
		$\text{ylimäärätyyppi [mol]} = (\text{ilmakerroin} - 1) * \text{typpeä ilmasta [mol]}$										
		yhteensä [mol]					22,53	42,02	0,01	7,14	26,87	
		moolimassa [g/mol]					44,01	18,02	64,06	32,00	28,02	
		moolitiilavuus [m ³ n/kmol]					22,26	22,40	21,89	22,39	22,40	
PALAMISILMA												
PÄÄSTÖT												
ilman tiilavuus [m ³ n]	3,301	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	O ₂	N ₂	yhteensä					
ilman massa [g]	4252,4	0,502	0,941	0,000	0,160	2,611	4,214					
		991,7	757,2	0,5	228,5	3266,3	5244,3					
		15,3		0,0	4,9	79,8	100,0					
		11,9	22,3	0,0	3,8	62,0	100,0					