

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0200 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

## **LEIJUKERROSKAASUTUS**

### **FLUIDIZED BED GASIFICATION**

Lappeenrannassa 4.2.2011

0310074 Tanja Näppi Ente 5

## Sisällysluettelo

SYMBOLILUETTELO .....	3
1 JOHDANTO .....	4
1.1 Työn rajaus .....	5
2 PALAMINEN .....	5
2.1 Lämpeneminen .....	6
2.2 Pyrolyysi.....	6
2.3 Jäännöshiili.....	7
3 POLTTOAINEET.....	8
3.1 Käyttötekniset ominaisuudet .....	9
3.1.1 Kosteus.....	10
3.1.2 Lämpöarvo .....	10
3.1.3 Haihtuvat aineet .....	11
3.1.4 Tuhkat ja tervat .....	11
3.2 Tuotekaasun koostumus .....	12
3.2.1 Tuotekaasun puhdistus.....	12
4 KAASUTUS .....	13
4.1 Syitä kaasutukseen .....	13
4.2 Kaasutusprosessi .....	14
4.3 Reaktorit .....	16
4.3.1 Kiinteäkerroskaasutus .....	16
4.3.2 Leijukerroskaasutus .....	17
5 SOVELLUSKOHTEET .....	20
6 CASE: KAASUTIN 50 MW .....	22
7 JOHTOPÄÄTÖKSET.....	26
8 YHTEENVETO .....	27
LÄHTEET.....	29

## SYMBOLILUETTELO

$C$	hiili	[-]
$CH_4$	metaani	[-]
$CO_2$	hiilidioksidi	[-]
$\bar{c}_p$	keskimääräinen ominaislämpökapasiteetti	[MJ/kgK]
$H$	vety	[-]
$H_2O$	vesi	[-]
$I$	höyrystymislämpö referenssitilassa	[MJ/kg]
$\lambda$	ilmakerroin	[-]
$N$	typpi	[-]
$O$	happi	[-]
$T$	lämpötila	[K],[°C]
$q_m$	massavirta	[kg/s]
$Q$	lämpöarvo	[MJ/kg]
$x$	massaosuus	[%]
$wv$	veden massaosuus	[%]

### Alaindeksit

pa	polttoaine
ref	referenssitila
sk	savukaasu

# 1 JOHDANTO

Energian kulutuksen lisääntyessä joudutaan tulevaisuudessa tekemään suuria muutoksia energiantuotantojärjestelmiin. Tämän hetkiset energiantuotantojärjestelmät ovat tulevaisuudessa riittämättömiä ja päästörajoitusten tiukentuessa joudutaan kehittämään uusia polttotekniikoita. Erilaisten polttotekniikoiden ja energiantuotantokeinojen lisäksi nykyiset polttoaineet ovat joutuneet suurenuslasin alle. Fossiilisista polttoaineista pyritään luopumaan ja tilalle halutaan uusiutuvia energialähteitä ja biopolttoaineita.

Etenkin huoli hiilidioksidipäästöistä (CO<sub>2</sub>) ja niiden vaikutuksista ilmastoon, on ajanut energiayhtiöt kehittämään ja tutkimaan uusia tehokkaampia ratkaisuja energiantuotantoon. Hiilidioksidipäästöjä on pyritty vähentämään muun muassa Kioton ilmastopöytäkirjalla, jossa kehittyneet maat sitoutuivat vähentämään kuuden kasvihuonekaasun päästöjä tietyin maakohtaisin prosenttimäärin vuoden 1990 päästötasolta. Hiilidioksidin osuus näistä seurattavista päästöistä on noin 80 prosenttia.

Kaasutusta itsessään voidaan pitää vanhana tekniikkana, jota on käytetty jo satoja vuosia. Kaasutus on kuitenkin ollut aiemmin kehittämätöntä ja keskittynyt lähinnä kivihiilen kaasutukseen. Kaasutuskaasuja, jotka sisälsivät lähinnä häkää ja vetyä, käytettiin niin valaistuksessa kuin lämmityksessä. Sittenkin kaasua on alettu käyttää sähköntuotannossa. Kaasutuksen etuna on sen kyky hyödyntää huonompikin polttoaine. Kaasutustekniikan ja kaasutukseen perustuvien energiasuunnitelmien suunnittelu on jo pitkään jatkunut voimakkaana. Tähän on syynä tulevaisuuden tarve yhdistää korkealla hyötysuhteella toimiva energiantuotantoprosessi alhaisempiin päästöihin. Muuntamalla kiinteä polttoaine kaasumaiseen olomuotoon voidaan suunnitella monenlaisia uusia energiantuotantojärjestelmiä.

Polttoaineita voidaan kaasuttaa erilaisissa reaktoreissa ja kaasutusolosuhteet voidaan valita eri tavoin. Polttoainevalinta vaikuttaa suuresti kaasutinreaktorin valintaan ja kaasutusolosuhteisiin. Esimerkiksi biopolttoaineille ja jätteille leijukerroskaasutus on omiaan. Leijupeti tarjoaa laadultaan vaihtelevalle polttoaineella parhaat mahdolliset kaasutusolosuhteet.

## 1.1 Työn rajaus

Tämä työ on tehty Lappeenrannan teknilliselle yliopistolle osana kurssia BH10A0200 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari. Työn tarkastelun kohteeksi on valittu leijukerroskaasutus. Työssä on keskitytty kiinteän polttoaineen palamiseen ja kaasutukseen sekä tarkasteltu yleisesti leijukerroskaasutusta ja kaasutinreaktoreita. Esimerkkitapauksena on tarkasteltu 50 MW<sub>th</sub> leijukerroskaasuttimen toimintaa ja tutustuttu kaasuttimen lämpötila-arvoihin. Työssä on lisäksi esitelty muutamia Suomessa toimivia sovelluksia kaasutusprosesseista.

## 2 PALAMINEN

Palamisprosessi sisältää aineen ja energian siirtoa sekä kemiallisia reaktioita. Nämä osaprosessit määrittävät palamisen luonteen ja vaikuttavat palamisnopeuteen. Kyseiset osaprosessit voivat myös määrittää palamisen onnistumisen. Palamisprosessin teoreettisessa tarkastelussa tulee keskeisimpänä asiana selvittää ilmiöön osallistuvien aineiden määrät, koostumukset ja siirtyvät energiamäärät. Yleensä palamisessa lämpötila on riittävän korkea ja paine alhainen, jotta voidaan olettaa, että kemiallinen kinetiikka ei rajoita palamisnopeutta. Kemiallisen kinetiikan lisäksi palamiseen vaikuttaa aineen- ja lämmönsiirto. Ainesiiirron ilmiöt, kuten polttoaineen ja ilman sekoittuminen sekä rajakerrosdiffuusio heterogeenisissä palamisreaktioissa, vaikuttavat palamiseen merkittävästi. (Raiko et al. 2002, 31).

Kiinteän polttoaineen palaminen ja kaasutus jakautuu muutamiin toisiaan seuraaviin osioihin. Palamisen alussa polttoainepartikkeli lämpenee kuivumislämpötilaan. Tämän jälkeen seuraa pyrolyysi, jossa polttoaineen rakenne hajoaa ja pyrolyysin jälkeen polttoainepartikkelin jäännöshiilen palaminen tai kaasutus. Seuraavassa luvussa on esitelty palamisen vaiheita tarkemmin. (Kara et al. 2004, 244)

## 2.1 Lämpeneminen

Palamisen ensimmäisessä vaiheessa eli alkulämpenemisessä partikkeli joutuu kuumaan atmosfääriin, jolloin partikkelissa tapahtuu lämpötilan nousu ja sen sisältämän veden höyrystyminen lähellä kiehumislämpötilaa. Polttoainepartikkelista poistuu tällöin vesihöyry. (Höyrykattilatekniikka s. 83) Koska veden höyrystyminen tapahtuu lähellä kiehumislämpötilaa, kuivumista rajoittaa lähinnä lämmönsiirto. Aineensiirto on nopeaa syntyvän paine-eron vuoksi, koska veden höyrystyessä sen tilavuus laajenee. Partikkelin lämpötilan nousu hidastuu hetkellisesti veden höyrystyessä. Höyrystymisen jälkeen lämpötila jatkaa nousuaan kohti pyrolyysin alkua. (Raiko et al. 2002, 189)

## 2.2 Pyrolyysi

Pyrolyysillä tarkoitetaan kiinteän aineen muuntumista kaasu- ja tervamaiseen tilaan lämmöntuonnin vaikutuksesta. Pyrolyysissä polttoaineen haihtuvat aineet irtoavat polttoainepartikkelista lämmöntuonnin vaikutuksesta. Pyrolyysinopeutta rajoittavat pienillä partikkeleilla kemiallinen kinetiikka ja suurilla partikkeleilla joko lämmönsiirto ympäristöstä partikkeliin tai tuotteiden aineensiirto pois partikkelista. Polttoaineen pyrolysoitavuus osuus riippuu polttoaineesta, loppulämpötilasta ja kuumennusnopeudesta. Pyrolysoitavuus osuus kasvaa hiukkasen lämpötilan ja kuumennusnopeuden kasvaessa. Pyrolyysin jälkeen jäljelle jäävää kiinteää ainetta kutsutaan jäännöshiileksi. (Raiko et al. 2002, 193)

## 2.3 Jäännöshiili

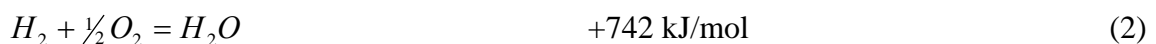
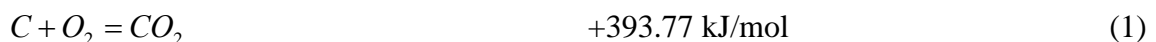
Pyrolyysin jälkeen seuraa jäännöshiilen palaminen. Jäännöshiilen palaminen aiheutuu reagoivien molekyylien diffuusiosta polttoaineen pintaan ja sisäosiin, jossa ne reagoivat heterogeenisesti jäännöshiilen kanssa. Palamisreaktioita kutsutaan yleensä eksotermisiksi reaktioiksi ja kaasutusreaktioita endotermisiksi reaktioiksi.

Palamisessa hiukkasen atmosfäärinä on tavallisesti ilma tai ilman ja savukaasun seos. Kaasutuksessa atmosfäärinä toimii kaasutuskaasujen- ja tuotteiden seos. Jäännöshiilen palamisesta vapautuva lämpöenergia korvaa usein kaasutuksen aikana tapahtuvat lämpöhäviöt, joihin kuuluu esimerkiksi polttoainepartikkelin sisältämän kosteuden haihtuminen. (Raiko et al. 2002, 202)

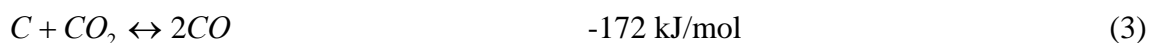
Merkittävimmät palamisreaktiot, jotka tapahtuvat jäännöshiilen palamisessa ja kaasutuksessa, ovat hiilen reaktiot hapen, vesihöyryn sekä hiilidioksidin kanssa.

Tärkeimpiä kiinteän aineen ja kaasun välisiä reaktioita ovat:

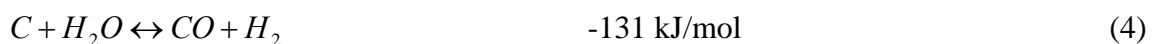
### *Palamisreaktiot*



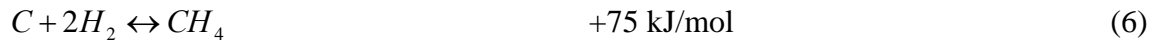
### *Boudouard reaktio*



### *Water-Gas-reaktio*



*Metanaatio*



Reaktioissa syntyviä kaasuja kutsutaan tuotekaasuiksi. Eräillä tuotekaasuilla on havaittu olevan kaasutusta hidastava vaikutus. Etenkin tuotekaasujen  $H_2$  ja  $CO$  läsnä ollessa kaasutusreaktiivisuus vähenee. (Basu, 2006, 66)

Tuotekaasujen koostumusta käsitellään tarkemmin luvussa 3.2.

### **3 POLTTOAINEET**

Kaasutukseen soveltuvia polttoaineita ovat niin kiinteät polttoaineet kuin nestemäisissäkin muodossa olevat polttoaineet. Yleisimpiä kaasutuksessa käytettyjä polttoaineita ovat muun muassa kivihiili, yhdyskuntajätteet ja biopolttoaineet. Yleensä kaasutuksessa käytettävät polttoaineet ovat sellaisia, joita on muuten vaikea hyödyntää, joiden hyötysuhde tavallisessa polttoprosessissa on huono tai niiden palamisessa syntyviä haitallisia savukaasuja halutaan vähentää.

Polttoaineiden laatuvariaatiot asettavat omat rajoituksensa käytettäville poltto- ja kaasutustekniikoille. Taulukossa 1 on kuvattu yleisimpien kiinteiden polttoaineiden ominaisuuksia.



**Taulukko 1.** Kiinteiden polttoaineiden ominaisuuksia (Raiko et al. 2002, 137)

Ominaisuus	Puu	Kuori	Turve	Kivihili	Kierrätyspolttoaine
Kosteus, %	30–45	40–65	40–55	10	15–25
Tuhka, % (d)	0,4-0,5	2-3	4-7	14	5-7
Haihtuvat aineet, % (d)	84–88	70–80	65–70	29,5	78–90
Kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg (d)	21	20	21,6	29,6	20–32
Tehollinen lämpöarvo MJ/kg (d)	19,5	19	20,4	28,7	13-20
Alkuainekoostumus, % (d)					
C	48–50	51–66	50–57	76–87	51–70
H	6–6,5	5,9–8,4	5–6,5	3,5–5	6,5–10
N	0,5-2,3	0,3-0,8	1-2,7	0,8-1,2	0,4-1,4
O	38–42	24,3–40,2	30–40	2,8–11,3	
S	0,05	0,005	<0,2	<0,5	<0,1-0,2
Cl	<0,01	<0,01-0,03	0,03	<0,1	<0,2-1

### 3.1 Käyttötekniset ominaisuudet

Merkittävimpiä tekijöitä poltto- ja kaasutustekniikoita mietittäessä ovat muun muassa polttoaineen kosteus, haihtuvien aineiden määrä, tuhkapitoisuus, tuhkan koostumus ja polttoaineen alkuainekoostumus sekä partikkelikoko. Näitä kyseisiä tekijöitä kutsutaan polttoaineen käyttöteknisiksi ominaisuuksiksi.

### **3.1.1 Kosteus**

Kosteus on yksi merkittävimmistä ja tavanomaisimmista polttoaineille määritellyistä ominaisuuksista. Kosteuden merkitys johtuu sen suoranaisesta vaikutuksesta polttoaineen käytettävyyteen. Käytettävyydellä tarkoitetaan tässä tapauksessa polttoaineen tehollista lämpöarvoa eli tavanomaisessa poltossa vapautuvaa lämpöenergiaa. (Raiko et al. 2002, 121).

Polttoaineen palaessa sen sisältämä kosteus haihtuu. Haihtumisprosessi tarvitsee lämpöä, jolloin haihtumisen tarvitsema lämpömäärä jää hyödyntämättä muussa prosessissa. Käytettävyyden lisäksi kosteus vaikuttaa polttoaineen palamiskäyttäytymiseen. Esimerkiksi biopolttoaineiden kosteusprosentti ei saisi ylittää 30 %. Jos polttoaineen kosteusprosentti on yli 30 %, tuotekaasun lämpöarvo laskee ja kaasutusprosessi vaikeutuu.

### **3.1.2 Lämpöarvo**

Polton kannalta tärkein ja olennaisin polttoaineominaisuus on lämpöarvo. Se ilmoittaa polttoaineen täydellisessä palamisessa vapautuvan lämpöenergian. Lämpöarvo riippuu suurelta osin polttoaineen kuiva-ainekoostumuksesta, tuhkapitoisuudesta ja kosteudesta. Kiinteillä polttoaineilla lämpöarvo on ilmoitettu tavallisesti energiana massayksikköä kohden (MJ/kg). Lämpöarvo voidaan ilmoittaa ylempänä tai alempana lämpöarvona. Ylempi lämpöarvo (HHV) olettaa, että polttoaineen sisältämä ja palamistuotteena syntyvä vesi on palamisen jälkeen nestettä. Alemmassa lämpöarvossa (LHV) oletetaan, että polttoaineen sisältämä vesi ja palamisessa syntyvä vesi ovat palamisen jälkeen vesihöyryä. (Kokko 2002, 13)

### 3.1.3 Haihtuvat aineet

Haihtuvilla aineilla tarkoitetaan sitä osaa polttoaineesta, joka kaasuuntuu kuumennettaessa polttoainetta nopeasti korkeaan lämpötilaan. Haihtuvien aineiden määrä riippuu muun muassa lämpötilasta, polttoaineen lämpenemisnopeudesta sekä paineesta. Esimerkiksi biomassilla haihtuvien aineiden osuus on kohtuullisen suuri, yleensä noin 85 % kiintoaineesta. (Kokko 2002, 13)

### 3.1.4 Tuhkat ja tervat

Polttoaineet sisältävät erilaisia määriä tuhkaa muodostavia ainesosia. Vaihtelut sekä määrien että laatuojen suhteen voivat olla huomattavan suuria. Tuhkaa muodostavien ainesosien vapautuminen polton yhteydessä on riippuvainen niin polttoaineesta kuin polttotekniikasta. Kaasutuksen ja palamisen lämpötilat riippuvat myös suuresti tuhkan laadusta.

Tuhkalla on suuri merkitys kaasutusprosesseissa. Tuhka ei niinkään vaikuta tuotekaasuun, vaan enimmäkseen itse kaasutuskäytäntöön. Jos tuhka-aines esimerkiksi pääsee pehmenemään tai sulamaan prosessin aikana, alkavat yksittäiset tuhkapartikkelit kasaantua ja muodostaa isompia partikkeliryhmiä. Nämä syntyneet partikkelit tipahtavat petin alaosaan, josta niiden poistaminen on hankalaa ja ongelmallista. Tästä johtuen leijukerroskaasuttimissa lämpötilat pidetään tuhkan pehmenemispisteen alapuolella noin 800 – 950 °C välillä. Tuhkan aiheuttamiin haittoihin kuuluu esimerkiksi lämpöpintojen likaantuminen. (Basu, 2006, 73. Higman, van der Burgt 2008, 105)

Tuhkan takia alhaisena pidettävä lämpötila tuo kuitenkin mukanaan muita haasteita. Mitä alhaisempi prosessilämpötila on, sitä enemmän tervaa muodostuu tuotekaasun tuotoksen seurauksena. Tervan muodostumiseen vaikuttavat hiilipartikkeleiden hidas lämpeneminen ja se, että muodostuneet tervat eivät hajoa lämmön vaikutuksesta niin tehokkaasti. Tervan lisäksi alhaisissa lämpötiloissa NO<sub>x</sub>-päästöt lisääntyvät.

## 3.2 Tuotekaasun koostumus

Kaasun koostumukseen vaikuttavat kaasutusprosessi, polttoaine ja käytetty kaasutusaine. Yleisimmät tuotekaasuissa esiintyvät aineet ovat  $H_2$ ,  $CO$  ja  $CH_4$ . Edellä mainitut tuotekaasun komponentit ovat palamiskelpoisia kaasuja. Tuotekaasussa esiintyy myös inerttejä eli kemiallisesti reagoimattomia kaasuja kuten vesihöyryä, typpeä ja hiilidioksidia. Puhdistamaton tuotekaasu sisältää myös tervaa, öljyä ja rikkivetyä. Typen esiintyminen kaasussa laskee kaasun lämpöarvoa, jolloin sen vaikutus kaasun ominaisuuksiin on merkittävä.

Riippuen kaasutustavasta neljää erilaista tuotekaasua on mahdollista tuottaa.

- Pienlämpöarvoinen tuotekaasu (Low heating-value gas)
- Keskilämpöarvoinen tuotekaasu (Medium heating-value gas)
- Korkealämpöarvoinen tuotekaasu (High heating-value gas)
- SNG eli synteettinen maakaasu

(Rezaiyan, Cheremisinoff 2005, 9)

### 3.2.1 Tuotekaasun puhdistus

Kaasutuksessa syntyvä tuotekaasu sisältää monia epäpuhtauksia. Vaikka epäpuhtauksien määrä on suhteellisen pieni, voivat ne aiheuttaa kaasuttimen jälkeisissä laitteissa ongelmia. Yleisimpiä ongelmia ovat eroosio ja korroosio. Kaasutuksessa syntyvien tuotekaasujen puhdistuksessa on etuna poltossa syntyvien savukaasujen puhdistukseen verrattuna kaasun pienempi määrä ja epäpuhtauksien suurempi konsentraatio. Kaasunpuhdistus menetelmät voidaan jakaa karkeasti kylmä- ja kuumapuhdistusmenetelmiin.

Kylmäpuhdistusmenetelmässä kaasu jäädytetään (alle 150 °C), jonka jälkeen kaasu pestään vedellä. Tällöin valtaosa kiinteistä partikkeleista, typpiyhdisteistä, tervoista ja alkali- sekä raskasmetalleista poistuu kaasusta. Rikkiyhdisteiden poisto on tehtävä erikseen kaasun pesun jälkeen. Epäpuhtauden päätyvät puhdistuksen jälkeen jäteveeten, josta ne puhdistetaan jätevedenpuhdistusprosesseilla pois. Jäteveden käsittelyn monimutkaisuuden takia kaasun kylmäpuhdistus on kannattavinta suurten kokoluokkien energiantuotantolaitoksissa.

Kuumapuhdistusmenetelmä riippuu suurelta osin käytetystä polttoaineesta ja kaasutussovelluksesta. Kuumapuhdistuksella pyritään yksinkertaistamaan puhdistusprosessi kylmäpuhdistukseen verrattuna. Kuumapuhdistusmenetelmät ovat vielä kehitystilassa. Esimerkiksi kaasutuskombivoimalaitoksissa päätavoitteena on alentaa kaasun hiukkas- ja alkalimetallipitoisuuksia riittävän pieniksi, jotta turbiinin siipien kuluminen hidastuu halutulle tasolle. (Kara et al. 2004, 245)

## **4 KAASUTUS**

Polttoainetta voidaan kaasuttaa hyvin erilaisissa reaktoreissa ja kaasutusolosuhteissa. Kaasutusmenetelmän valinta vaikuttaa energiantuotantosovellusten tekniseen toteutettavuuteen sekä kannattavuuteen kuin myös tuotekaasun koostumukseen ja prosessin hyötysuhteeseen. Seuraavissa kappaleissa on esitelty kaasutusprosessia itsessään sekä erilaisia kaasutusreaktoreita.

### **4.1 Syitä kaasutukseen**

Kaasutuksen kehittämisen takana on ollut ajatus fossiilisten polttoaineiden korvaamisesta CO<sub>2</sub> neutraaleiden polttoaineiden kaasutuksella. Suomen näkökulmasta ajatellen kaasutuksella pystytään tuottamaan energiaa omavaraisemmin ja entistä vähäisemmällä ympäristönkuormituksella. Kaasutuksessa syntyvää tuotekaasua pystytään hyödyntämään

monipuolisesti niin sähkön- ja lämmöntuotannossa kuin esimerkiksi liikenteen polttoaineena. Tuotekaasua pystytään käyttämään maakaasun ja raskaan polttoöljyn korvaajana, jolloin fossiilisten polttoaineiden käyttöä voidaan vähentää. Lämpöä ja sähköä voidaan tuottaa pien CHP- laitoksissa, jolloin prosessin hyötysuhde saadaan korkealle. Liikenteen polttoaineena voidaan käyttää puusta, jätteestä ja biomassoista tuotettua biopolttoainetta. Kaasutuksessa syntyvän tuotekaasun poltolla pystytään hyödyntämään polttoprosessin korkeammat höyryn arvot tuotekaasun puhtauden takia, jolloin prosessin hyötysuhde paranee. (Nieminen)

Kaasutusprosessiin voidaan yhdistää jo vanhana tekniikkana tunnettu Fisher-Tropsch menetelmä, jolla tuotekaasu muokataan hiilivetyketjuiksi. Kyseisessä menetelmässä polttoaine kaasutetaan ensin, jonka jälkeen tuotekaasusta muodostetaan hiilivetyketjuja rauta- tai kobolttikatalyytin avulla. (Kreutz et al. 2008, 3)

Syntyneet hiilivetyketjut voivat olla nestemäisessä kaasumaisessa tai vahamaisessa olomuodossa. FT- polttoaineet ovat korkealaatuisia ja muistuttavat hyvin paljon fossiilisia polttoaineita. (Bioste oy)

Kaasutuskombivoimalaitoksessa eli IGCC-laitoksessa (Integrated Gasification Combined Cycle) polttoaine kaasutetaan ja tuotekaasu käytetään kaasuturbiinin polttoaineena. Kyseisiä laitoksia on suunniteltu prosessin demonstrointiin USA:ssa, Japanissa sekä Euroopassa, mutta tekniikka on vielä alkutekijöissään ja prosessi on kehitysvaiheessa.

## **4.2 Kaasutusprosessi**

Kaasutuksen ja polttamisen erottaa toisistaan prosessissa käytetty ilmamäärä. Palamisessa hapettuminen tapahtuu kokonaisvaltaisesti, kun taas kaasutuksessa hapettuminen on osittaista. Palamisprosessissa polttoaine muuntuu kaasumaisiksi palamistuotteiksi ja energiaksi, kun taas kaasutuksen tarkoituksena on muuntaa polttoaine kaasumaiseen olomuotoon, johon energia on sitoutuneena. Kaasutuksessa syntyvä tuotekaasu on polttoainetta. Kaasutus tapahtuu korkeassa lämpötilassa ali-ilmalla, jolloin

kaasutusprosessiin tuodaan ilmaa vähemmän kuin polttoaineen täydellinen eli stökiometrinen palaminen edellyttää. Tällöin ilmakerroin  $\lambda$  jää alle yhden. Kaasutuksessa syntyvä tuotekaasu on käyttökelpoista, mutta sisältää kuitenkin epäpuhtauksia. Riippuen tuotekaasun käyttötarkoituksesta kaasu voidaan joko polttaa sellaisenaan tai se voidaan puhdistaa, jonka jälkeen se voidaan käyttää halutulla tavalla. Tällä tavoin polttoprosesseista saadaan puhtaampia ja hyötysuhteeltaan parempia. (Combustion, Gasification and Propulsion laboratory 2006)

Kaasutuskaasuna voidaan käyttää ilmaa, happea tai vesihöyryä. Ilmakaasutuksessa käytetään 20–50 % stökiometrisen palamisen ilmamäärästä. Runsaasti haihtuvia aineita sisältävät biopolttoaineet voidaan kaasuttaa melko alhaisessa lämpötilassa (800 – 1000 °C), jolloin ilman tarve on noin 20–30 % teoreettisen palamisen ilmantarpeesta. Ilmakaasutuksessa ilman sisältämä typpi ei häviä reaktioissa minnekään, vaan typpi esiintyy myös tuotekaasussa. Typpi laimentaa tuotekaasua, jolloin kyseessä on niin sanottu pienlämpöarvoinen kaasu. Pienlämpöarvoisten tuotekaasujen tehollinen lämpöarvo vaihtelee yleensä 3 – 7 MJ/m<sup>3</sup>n välillä. Ilmakaasutus sopii parhaiten pieniin ja keskisuuriin laitoksiin (< 200 MW) ja reaktiivisten polttoaineiden kaasuttamiseen. (Kara et al. 2004, 244)

Happi- ja vesihöyrykaasutuksessa typpeä syntyy vähän tai sitä ei synny ollenkaan, koska happikaasutuksessa kaasutusaine ei sisällä typpeä. Tällöin tuotekaasu on keskilämpöarvoista, jonka tehollinen lämpöarvo vaihtelee 7 – 15 MJ/m<sup>3</sup>n välillä. Hiilivetyjen suuri pitoisuus nostaa tuotekaasun lämpöarvoa. Happikaasutus soveltuu hyvin suureen kokoluokkaan (> 200 MW) sekä sellaisiin sovelluksiin, joissa tarvitaan korkeaa kaasutuslämpötilaa. Happikaasutuslaitoksissa investointikustannukset ovat huomattavat, koska laitokselle tarvitaan oma happitehdas. (Raiko et al. 2002, 568)

Kaasutus voidaan toteuttaa joko ilmanpaineessa tai paineistettuna. Ilmanpaineessa kaasuttaminen on vanhempaa tekniikkaa ja hyvin tunnettua. Paineistettu kaasutus sen sijaan on uudempaa tekniikkaa ja sillä on saatu hyviä tuloksia. Paineistetulla kaasutuksella laitekoko on pienempi kuin ilmanpaineikaasuttimilla, mutta investointikustannukset ovat taas ilmanpaineikaasuttimeen verrattuna korkeammat. Paineikaasutus soveltuu parhaiten

sellaisiin prosesseihin, jossa kaasun korkeaa painetta voidaan hyödyntää myös muualla energiantuotantoprosessissa. (Kara et al. 2004, 244)

### **4.3 Reaktorit**

Kaasutusreaktorit voidaan jakaa karkeasti kahteen ryhmään, joita ovat kiinteäkerroskaasuttimet ja leijukerroskaasuttimet. Kiinteäkerroskaasuttimet voidaan edelleen jakaa myötävirta-, vastavirta- ja ristivirtakaasuttimiin. Menetelmät eroavat toisistaan lähinnä kaasuvirtojen ja kaasutusaineen kulkusuunnissa toisiinsa nähden.

Leijukerroskaasuttimet voidaan jakaa myös kahteen ryhmään, joita ovat kiertoleiju- ja kerrosleijukaasuttimet. Kaasuttimet eroavat toisistaan niin petimateriaalin osalta kuin leijutustavoiltaan. (Basu 2006, 5)

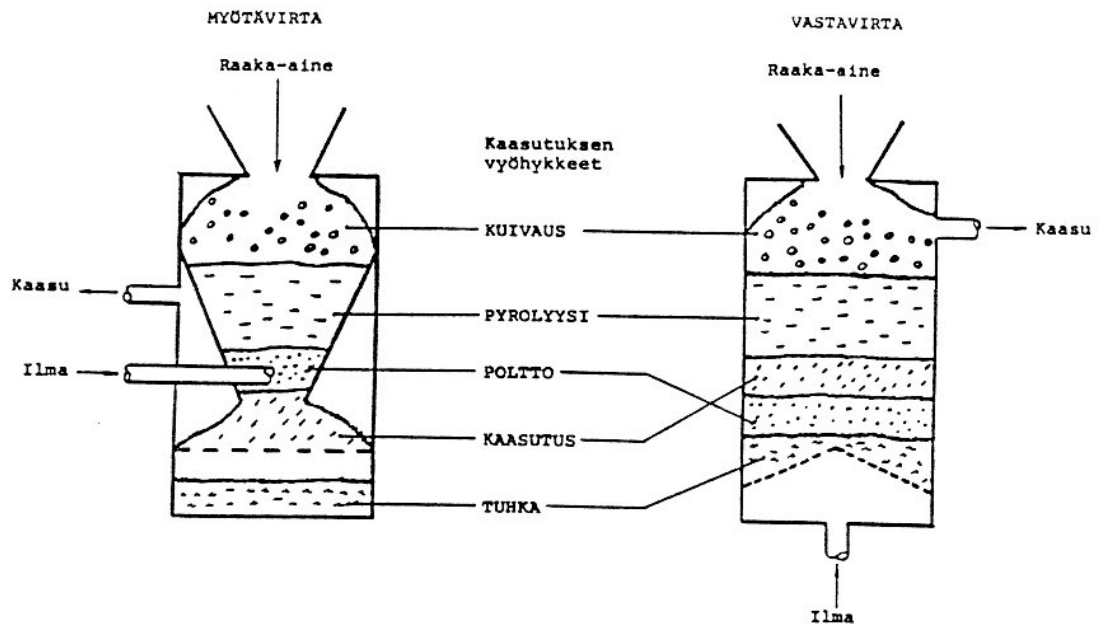
#### **4.3.1 Kiinteäkerroskaasutus**

Vastavirtakaasutus ja myötävirtakaasutus eroavat toisistaan polttoaineen ja kaasun virtaussuunnilla. Vastavirtakaasuttimessa polttoaine syötetään reaktorin yläosaan, josta se valuu kuivumis-, pyrolyysi-, kaasutus- ja polttovyöhykkeiden läpi. Kaasutuskaasu johdetaan reaktorin alaosaan arinan kautta. Tuhka poistetaan reaktorin pohjalta. Tälle reaktorityypille on ominaista kaasun korkea terva- ja hiilivety-pitoisuus ja alhainen tuotekaasun lämpötila, koska polttoaineen vapautuvat aineet joutuvat suoraan reaktorista poistuvaan kaasuun.

Myötävirtakaasuttimessa polttoaine ja kaasu virtaavat samaan suuntaan, jolloin vapautuvat hiilivedyt ja tervat kulkevat kuumen poltto- ja kaasutusvyöhykkeen läpi ja hajoavat yksinkertaisimmiksi yhdisteiksi. Tästä syystä myötävirtakaasuttimen tuotekaasun tervapitoisuus on hyvin toimivassa kaasuttimessa pienempi kuin vastavirtakaasuttimen tuotekaasun pitoisuudet. (Kara et al. 2004, 245)



Ristivirtakaasuttimen toimintaperiaate on hyvin samanlainen kuin myötävirtakaasuttimen toiminta. Kuvassa 1 on esitetty kiinteäkerroskaasuttimien toimintaperiaatteet.



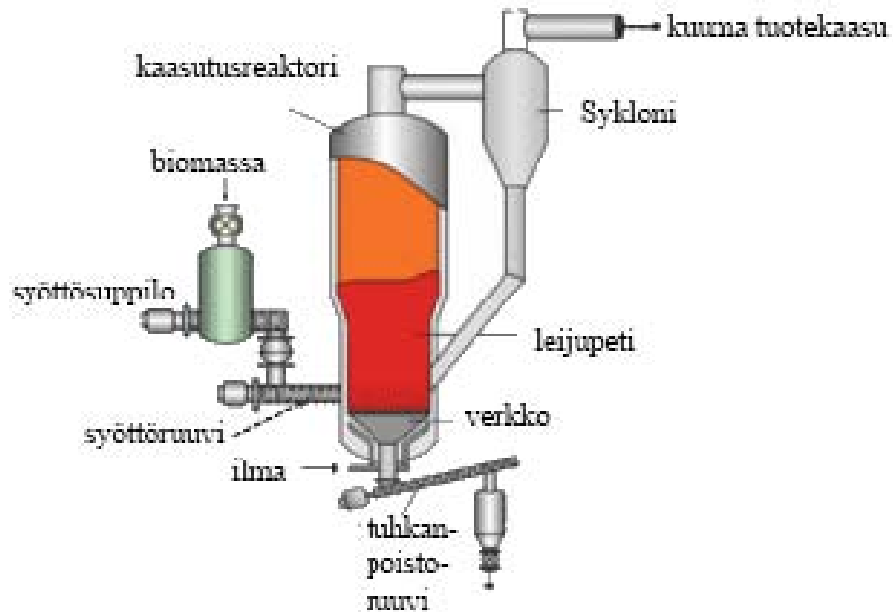
Kuva 1. Kiinteäkerroskaasuttimien toimintaperiaatteet

#### 4.3.2 Leijukerroskaasutus

Leijukerroskaasutuksessa kaasutus tapahtuu inertin leijuvan petimateriaalin sisällä. Leijukerroskaasutuksessa polttoaine syötetään leijupetiin reaktorin alaosasta. Polttoaine kaasuuntuu ja tuotekaasut poistuvat reaktorista sen yläosasta. Tämän jälkeen kaasu voidaan puhdistaa ja käyttää. Petimateriaalina voidaan käyttää samaa ainetta kuten leijukerroskattiloissa. Yleisimmin petimateriaali on hiekkaa. Petimateriaalin leijutuksella taataan polttoaineen jatkuvat sekoittuminen, jolloin lämmön ja kaasujen siirto tehostuu. Leijukerrostekniikkaa käytetään yleensä keskisuuren tai suuren kokoluokan kaasuttimissa. (Higman, van der Burgt 2008, 104)

#### 4.3.2.1 Kerrosleijukaasutus (BFBG)

Kerrosleijukaasutuksessa polttoainepartikkeli ( $< 10\text{mm}$ ) johdetaan leijukerrokseen, jonne kaasuttavana aineena toimiva ilma on johdettu reaktorin alaosaan. Polttoainepartikkelit kuivuvat nopeasti ja pyrolysoituminen alkaa. Osa syntyneestä hiilestä putoaa leijukerroksen alaosaan ja palaa siellä muodostaen osan muiden prosessissa tapahtuvien reaktioiden tarvitsemasta lämpöenergiasta. Syntyneet kaasut johdetaan reaktorin yläosaan pois. BFB-kaasutuksen olennaisena osana on suuri petimateriaali, joka toimii hyvänä lämmönvarastojana ja lämpötilaerojen tasaajana. Kerrosleijukaasutuksessa petimateriaali ei pääasiallisesti poistu reaktorista. Kaasun mukana poistuu kuitenkin osittain reagoimatta kiintoainesta, joka palautetaan takaisin reaktoriin. Kiinteäkerroskaasuttimiin verrattuna kerrosleijukaasutuksessa syntyy huomattavasti vähemmän haitallisia tervoja korkeammasta tuotekaasun lämpötilasta johtuen, mikä helpottaa kaasun käyttöä ja puhdistusta. Kerrosleijukaasuttimissa petin alaosa lämmitetään noin  $500 - 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ :een ennen polttoaineen syöttämistä, jolloin varmistetaan polttoaineen turvallinen syttyminen. Polttoaine syötetään petiin kuljettimien ja syöttötorvien avulla. Polttoaineen tasaisen jakautumisen varmistamiseksi polttoaineen syöttötorvia on monia. Kerrosleijukaasuttimien kapasiteetti on tyypillisesti  $15 - 40\text{ MW}$ :n luokkaa. (Huhtinen et al. 2000, 159, Kokko 2002, 45) Kuvassa 2 on esitetty kerrosleijureaktorin pääosat.



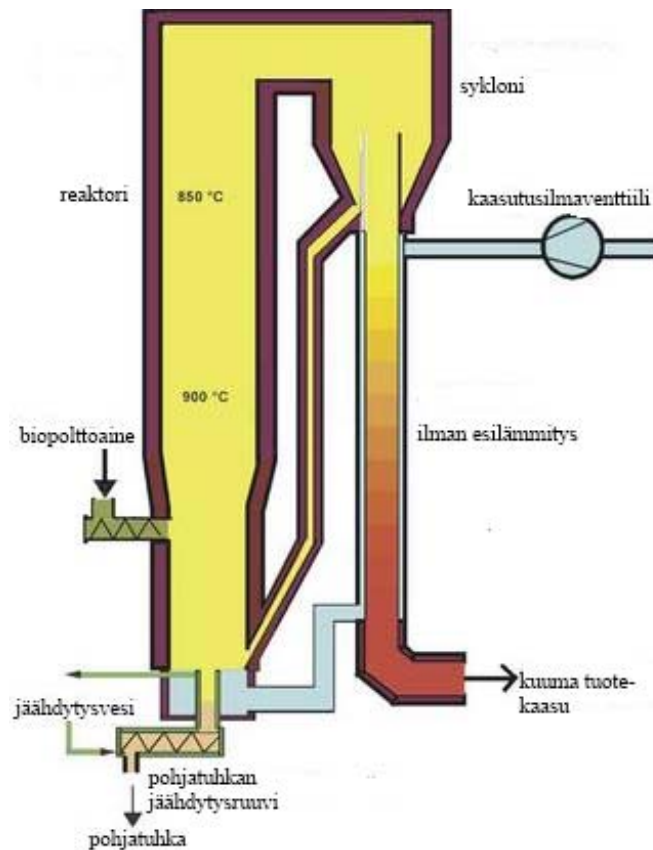
**Kuva 2.** Kerrosleijukaasutin (Salo, 2009)

#### 4.3.2.2 Kiertoleijukaasutus (CFBG)

Kiertoleijukaasuttimen pääosia ovat reaktoriosa, sykloni ja palautusputki. Reaktoriosassa tapahtuu itse kaasutusprosessi, josta syntyneet kaasut ja petimateriaali johdetaan sykloniin. Syklonissa syntyneet kaasut erotetaan petimateriaalista, joka johdetaan palautusputkea pitkin takaisin reaktoriin. Kiertoleijukaasutuksessa osa petimateriaalista siis poistuu kaasuvirtauksen mukana reaktoriosasta. Reaktoriin syötettävää leijutusilmaa esilämmitetään poistuvalla tuotekaasulla ja leijutusilma syötetään reaktoriin sen alaosasta. Polttoaine syötetään reaktoriin sen keskivaiheilta harvaan kiertoainesuspensioon. Kiertoleijureaktorilla on todettu olevan helpompi välttää tuhkan aiheuttama pedin sintraantuminen. Polttoaineen pyrolysoituminen ja palaminen noudattaa samanlaista kaavaa kuin kerrosleijukaasutuksessa.

Kiertoleijukaasutuksessa käytetään huomattavasti suurempia leijutusnopeuksia BFB-kaasutukseen verrattuna. Petimateriaali on myös hienojakoisempaa. Suuresta virtausnopeudesta johtuen tuotekaasun viiveaika reaktorissa on lyhyt. Tämän takia

kiertoleijukaasutus soveltuu reaktiivisille ja helposti kaasuuntuville polttoaineille. Kiertoleijukaasuttimien kapasiteetti on yleensä 40 – 100 MW:n välillä. Kuvassa 3 on esitetty kiertoleijukaasuttimen pääosat. (Kokko, 2008, 159)



**Kuva 3.** Kiertoleijukaasutin (Kokko 2002, 39)

## 5 SOVELLUSKOHTEET

Kaasutusprosessin sovelluksia on käytössä muutamissa kohteissa Suomessa. Lisäksi tutkimuskäyttöön suunniteltuja demonstraatiokaasuttimia sijaitsee Suomessa ja muualla maailmassa. Seuraavaksi on esitelty muutamia sovelluskohteita.

Lahti Energia oy:lle myönnettiin vuonna 2005 lupa kaasutuslaitoksen rakentamiseen vanhan voimalaitoksen yhteyteen Kymijärvelle. Kaasutuslaitos käyttää polttoaineenaan jätepolttainetta ja pääasiallisena polttoaineena on esikäsitelty kierrätyspolttoaine. Lisäpolttoaineena voidaan käyttää puujätettä. Laitos on CFB- kaasutuslaitos, joka on varustettu kaasunjäähdytyksellä ja puhdistuksella. Puhdistettu tuotekaasu poltetaan uudessa kaasunpolttokattilassa. Laitos koostuu kahdesta kaasutuslinjasta, joiden yhteenlaskettu polttoaineteho on 160 MW. Itse kaasutin on kiertoleijukaasutin, jossa kaasutus tapahtuu pienessä ylipaineessa ja noin 900 °C lämpötilassa. Kaasuttimelta syntyvä tuotekaasu johdetaan jäähdyttimeen, jossa kaasu jäähdytetään noin 400 – 450 °C lämpötilaan. Jäähdytyksen jälkeen tuotekaasu suodatetaan, jolloin kaasusta poistuvat haitta-aineet. Tuotekaasun poltto tapahtuu tornimallisessa kaasukattilassa neljällä polttimella. (KYVO2-Roskat energiaksi)

Corenso United Oy Ltd, jonka nykyään omistaa Stora Enso, tuottaa kartonkia Varkauden tehtaillaan. Vuonna 2001 tehtaalle rakennettiin kaasutuslaitos ja kattila, joka hyödyntää uusiokuitulaitoksella syntyvän alumiinipitoisen muovin. Muovi kaasutetaan kattilassa ja alumiini erotetaan jauheena uusiokäyttöön. Syntyvän tuotekaasun laatu on hyvää, lämpöarvo on korkea ja kaasu palaa puhtaasti. Laitos on ainutlaatuinen maailmassa. Kaasutuksella ratkaistiin aiempi ongelma, jossa kuitulaitoksella syntyvä muovi poltettiin ja polttoaineen sisältämä alumiini tukki kattilan. (Avila, 2004)

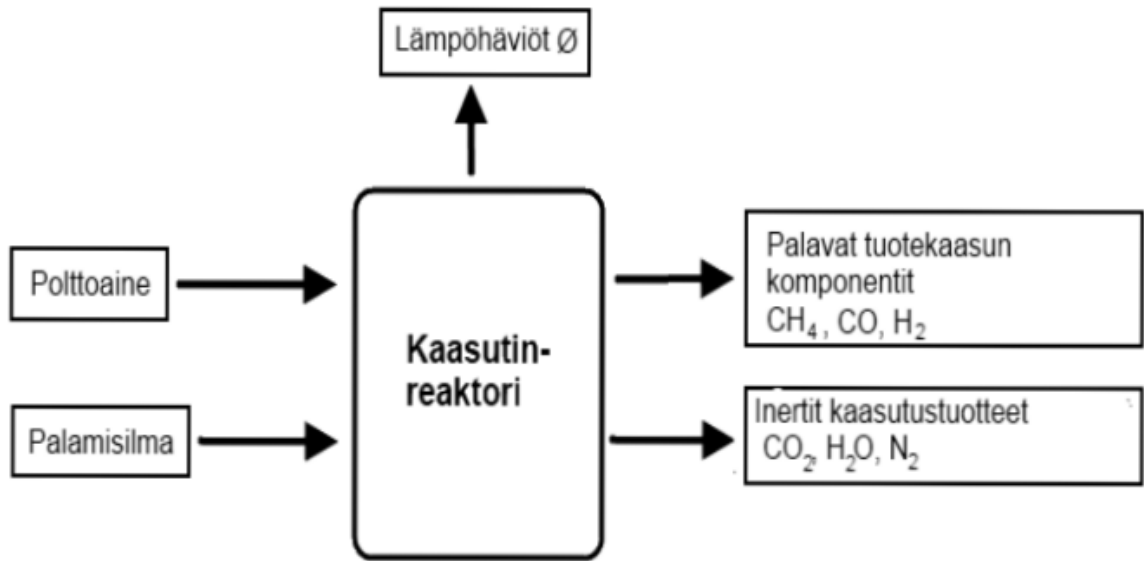
Metsä-Botnian tehtaille Joutsenoon rakennetaan valtion tuella kuoren kaasutuslaitos. Kaasutuslaitoksella kaasutetaan sellutehtaalla puunkuorinnassa syntyvää kuorta. Syntyvillä tuotekaasuilla on tarkoitus korvata olemassa olevan meesauunin käyttämä maakaasu. Tällä tavoin edistetään uusiutuvan energian käyttöönottoa ja vähennetään energiantuotannon kasvihuonepäästöjä. Tuotekaasun polttaminen meesauunissa on uusi tekninen sovellus, sillä kuoren kaasutusta on Suomessa tehty aiemminkin, mutta tuotekaasujen hyödyntämistä meesauunissa ei ole aiemmin toteutettu. Kaasutin itsessään on kiertopetikaasutin, jonka polttoaineteho on 48 MW. Laitoksen on arvioitu vähentävän hiilidioksidipäästöjä 60 000 tonnia vuodessa. Laitoksen arvioitu käyttöönotto on joulukuussa 2012.

Stora Enso ja Neste Oil päättivät vuonna 2007 yhteisestä kehityshankkeesta, jonka tarkoituksena on tuottaa uusiutuvaa dieseliä puubiomassasta. Syinä yhteistyöhön olivat EU:n lainsäädäntö, jonka mukaan vuonna 2020 biovelvoite EU:ssa on 10 % sekä kansallinen energiaomavaraisuus. Projektin lähtökohtana on kehittää BTL-teknologiaa liikennepolttoaineiden teollisen tuotannon aloittamiseksi uusiutuvista, metsäpohjaisista raaka-aineista. Stora Enson Varkauden tehtaille rakennettu 12 MW:n kaasutuskoelaitos kattaa kaikki vaiheet biomassan kuivauksesta, kaasutuksesta ja tuotekaasun puhdistuksesta aina Fischer-Tropsch katalyyttien testaamiseen. Ajomallina on käytetty happi/höyrykaasutusta ja kaasutuslämpötilat ovat vaihdelleet 800 – 900 °C välillä. Projektin tulokset ovat lupaavia ja koetulosten perusteella odotetaan tulevia päätöksiä tuotantolaitoksen rakentamisesta. (Holma, H. Jokela, V. 2010)

UPM, Andritz ja sen osakkuusyhtiö Carbona aloittivat yhteistyön biomassan kaasutusteknologian ja synteettisen kaasunpuhdistusteknologian kehittämiseksi vuonna 2007. Heinäkuussa 2008 yhtiöt aloittivat Yhdysvalloissa Chicagossa Gas Technology Institutin GTI:n pilottilaitoksella testaukset biomassan kaasutusteknologioista. GTI:n pilottilaitoksen erikoisuutena on, että laitoksella pystytään tuottamaan synteettistä kaasua samankaltaisissa olosuhteissa kuin oikeissa laitoksissa. Tuotetusta synteetikaasusta on tarkoitus valmistaa edelleen biodieseliä Fischer-Tropsch menetelmällä. Yhtiöiden välinen sopimus käsittää myös täysimittaisen kaasutuslaitoksen rakentamisen ja suunnittelun. Päätöstä laitoksen rakentamisesta odotetaan vuoden 2011 aikana. (Similä, 2008)

## **6 CASE: KAASUTIN 50 MW**

Tässä esimerkissä on tutkittu kaasuttimen lämpötiloja. Tarkoituksena on selvittää tuotekaasun lämpötilataso. Laskennan tarkoituksena on toimia suuntaa antavana esimerkkinä kaasutuslaskennasta. Kuvassa 4 on kuvattu yksinkertaistetun kaasutinreaktorin taserajan ylittävät virrat.



**Kuva 4.** Kaasutinreaktorin toiminta.

Laskennan lähtötiedot ovat seuraavanlaiset:

Polttoaineteho  $50 \text{ MW}_{\text{th}}$

Kaasutusprosessi on adiabaattinen eli lämpöhäviöt  $\emptyset = 0$

Seuraavat polttoaineen ja tuotekaasun koostumukseen liittyvät arvot on saatu LUT:n projektista, jossa tutkittiin kaasuttimen toimintaa.

Polttoaineen koostumus:

haihtuvat aineet 49,8 %

hiiltä 9 %

tuhkaa 1,2 %

kosteus 40 %

Polttoaineen kemiallinen koostumus til-%:

$N$  0,51

$H$  6,12

$O$  42,24

$C$  51.13

Tuotekaasun koostumus massaosuuksina:

$CO_2$  0,2201

$H_2O$  0,1077

$N_2$  0,4834

$CO$  0,1634

$CH_4$  0,0104

$H_2$  0,0127

Polttoaineen alempi lämpöarvo LHV 20,51 MJ/kg.

Tuotekaasu koostuu kahdesta osasta; inerteistä komponenteista, jotka eivät enää sisällä energiaa ja palavista komponenteista, jotka ovat reagoimiskykyisiä. Inerttejä komponentteja ovat  $N_2$ ,  $H_2O$  ja  $CO_2$ . Palaviin komponentteihin luetaan  $CO$ ,  $CH_4$  ja  $H_2$ .

Laskenta aloitetaan selvittämällä tuotekaasun komponenttien massavirrat.

Kun polttoaineen massavirta on  $q_m=5,2$  kg/s ja ilmamäärä  $q_m=7,15$  kg/s, saadaan yhtälöllä 7 ratkaistua jokaisen komponentin massavirta savukaasun koostumuksen massaosuuksien avulla.

$$q_{m,i} + q_{m,pa} = q_{m,sk} (x_{CO_2} + x_{H_2O} + x_{CO} + x_{H_2} + x_{CH_4} + x_{N_2}) \quad (7)$$

$q_m$ = massavirta [kg/s]

$x$ = massaosuus

Massavirrat on esitetty taulukossa 2.



**Taulukko 2.** Massavirrat

	$q_m$ [kg/s]
CO <sub>2</sub>	2,7182
N <sub>2</sub>	5,9700
H <sub>2</sub> O	1,3301
H <sub>2</sub>	0,1569
CH <sub>4</sub>	0,1284
CO	2,018

Koska referenssilämpötilana on käytetty  $T_{\text{ref}}=25$  °C, saadaan ilman entalpiaksi  $h_i=0$  kJ/kg (Raiko et al. 2002, 698).

Tuotekaasun keskimääräinen ominaislämpökapasiteetti on  $\bar{c}_p=1,4098$  kJ/kgK. Taulukosta 3 selviää palavien komponenttien lämpöarvot, joita tarvitaan lämpötilalaskennasta.

**Taulukko 3.** Lämpöarvot

	LHV [MJ/kg]
H <sub>2</sub>	119
CH <sub>4</sub>	50
CO	10

Koska polttoaineen kosteus on 40 % ja alempi lämpöarvo on ilmoitettu kuivalle polttoaineelle, täytyy kosteuden osuus huomioida lämpöarvossa. Yhtälöllä 8 saadaan ratkaistua kostean polttoaineen lämpöarvo.

$$Q_{\text{pa,kostea}} = (1 - wv) \times Q_{\text{pa,kuiva}} - wv \times I \quad (8)$$

$wv$ = veden massaosuus

$I$ = höyrystymislämpö referenssitilassa

Höyrystymislämpöarvo  $I=2,4$  MJ/kg.

Kostean polttoaineen alemmaksi lämpöarvoksi saadaan  $Q_{\text{pa,kostea}}=11,25 \text{ MJ/kg}$ .

Kun kaikki tarvittavat arvot on saatu ratkaistua, voidaan kaasutusreaktorille kirjoittaa energiatase. Energiataseesta, yhtälö 9, saadaan ratkaistua haluttu savukaasujen lämpötila.

$$q_{m,i}h_i + q_{m,\text{pa}}Q_{\text{pa}} = q_{m,g}h_g + q_{m,\text{CO}}Q_{\text{CO}} + q_{m,\text{H}_2}Q_{\text{H}_2} + q_{m,\text{CH}_4}Q_{\text{CH}_4} \quad (9)$$

missä  $h_g = \bar{c}_p \Delta T = \bar{c}_p (T - T_{\text{ref}})$

$$T = \frac{q_{m,i}h_i + q_{m,\text{pa}}Q_{\text{pa}} - q_{m,\text{CO}}Q_{\text{CO}} - q_{m,\text{H}_2}Q_{\text{H}_2} - q_{m,\text{CH}_4}Q_{\text{CH}_4}}{q_{m,g}\bar{c}_p} + T_{\text{ref}}$$

Referenssilämpötilana on käytetty  $T_{\text{ref}}=25^\circ\text{C}=298,15 \text{ K}$

Tuotekaasun lämpötilaksi saadaan  $T=1063 \text{ K}=765 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Laskentaosuudessa saatu tuotekaasun lämpötila  $T=765 \text{ }^\circ\text{C}$  vastaa kirjallisuudesta löytyviä arvoja. Reaktorin lämpötilatasoksi kirjallisuus antaa arvot  $800 - 900 \text{ }^\circ\text{C}$  väliltä, joten tuotekaasu poistuu reaktorista hieman viileämpänä. Täytyy kuitenkin ottaa huomioon, että laskentaa varten kaasutusprosessi on yksinkertaistettu ja reaktori on oletettu adiabaattiseksi. Jo näiden oletusten pohjalta lämpötiloihin tulee virheitä. Laskennasta saatu lämpötilataso vastaa riittävän hyvin kirjallisuuden antamia lämpötiloja, joten tulokseen voidaan luottaa ja olettaa virhemarginaalin olevan pieni.

## 8 YHTEENVETO

Kaasutusprosessissa on kiistämättä monia etuja. Kaasutuksella voidaan vähentää hiukkaspäästöjä muiden kaasumaisten päästöjen ohella. Kiinteän polttoaineen kaasutuksella pystytään parantamaan polton hyötysuhdetta ja prosessista saadaan siten ympäristöystävällisempi. Leijukerroskaasutuksella pystytään hyödyntämään huonoimmatkin polttoaineet ja kotimaisten energialähteiden hyödynnettävyys paranee. Tuotekaasua voidaan käyttää suoraan polttoprosesseissa tai jäädytettynä, ja puhdistettuna se voidaan jakaa suoraan kuluttajille maakaasun tapaan. Tulevaisuudessa leijukerroskaasutusta tullaan hyödyntämään yhä enemmän etenkin biopolttoaineiden ja jätteenpolton yhteydessä. Huonojen ja laadultaan vaihtelevien polttoaineiden hyödynnettävyys leijukerroskaasutuksessa takaa, että kyseistä tekniikkaa ei tulla unohtamaan aikoihin. Vaikka kaasutuksesta on jo saatu paljon tuloksia ja demolaitoksia on rakennettu, ei kuitenkaan olla vielä selvillä kaikista mahdollisista yksityiskohdista, joita kaasutukseen liittyy. Tämänkin takia kaasutuksen saralla riittää vielä tutkittavaa ja kokeiltavaa ennen kuin kaasutuksen voidaan sanoa kuuluvan perinteisiin energiantuotanto menetelmiin.

Kaasutuksen tuotekaasun monipuolinen hyödynnettävyys tarjoaa mahdollisuuksia niin pienissä kuin suurissa energiantuotantolaitoksissa. Kaasuntuotanto yhdistettynä kaasumoottoriin tai suuren voimalaitoksen varapolttoainejärjestelmään edesauttaa puhtaamman ja tehokkaamman energian tuotantoa. Tuotekaasun käytettävyydelle haasteen kuitenkin asettaa kaasun puhdistukseen liittyvät ongelmat. Kuten laskentaosuuden tuloksista nähdään, tuotekaasu poistuu reaktorista hyvin korkeassa lämpötilassa ja lisäksi se sisältää epäpuhtauksia. Lämpötilasta johtuen on hyvin yleistä, että kaasu jäädytetään alhaisempaan lämpötilaan ennen sen puhdistamista. Tuotekaasun kuumapuhdistuksessa lämpötila pidetään korkealla, mutta oikeanlaisten ja kestävien materiaalien valinta on tällöin erityisen tärkeää. Tuotekaasun puhdistusmenetelmiä tutkitaan ja kehitetään tehokkaammiksi, joten voidaankin toivoa, että tulevaisuudessa kaasutuksella pystytään tuottamaan yhä puhtaampaa energiaa.

Kehityksen ja tutkimuksen jatkuessa voidaan lähivuosien aikana odottaa ratkaisevia siirtoja kaasutukseen ja tuotekaasun käyttöön liittyen. Jo nyt valtio tukee uusia puhtaampia energiantuotantoprojekteja ja odotettavissa on, että EU:n kiristäessä päästörajoituksia ja vihreän energian osuutta, myös valtion tuki energiaprojekteille kasvaa.

Nähtäväksi jää mikä on kaasutuksen osuus näissä kuvioissa.

## LÄHTEET

Avila, H. 2004. Päättäjien Metsäakatemia. [Verkkodokumentti]. Päivitetty 6.10.2004. Viitattu 24.02.2011.

Saatavissa:

[http://www.forest.fi/smy/Materiaalitdeve.nsf/allbyid/6CC951B104A622E1C22570AB003B6917/\\$file/PMA18-HarriAvila.pdf](http://www.forest.fi/smy/Materiaalitdeve.nsf/allbyid/6CC951B104A622E1C22570AB003B6917/$file/PMA18-HarriAvila.pdf)

Basu, Prabir. 2006. Combustion and gasification in fluidized beds. Florida. Taylor & Francis Group.

Bioste oy. Fischer-Tropsch menetelmä. [Verkkodokumentti]. Viitattu 24.2.2011.

Saatavissa:

[http://www.bioste.fi/index.php?option=com\\_content&task=view&id=13&Itemid=14](http://www.bioste.fi/index.php?option=com_content&task=view&id=13&Itemid=14)

Higman, C. van der Burgt, M. 2009. Gasification. 2nd edition. Elsevier. ISBN 978-0-7506-8528-3

Holma, H. Jokela, V. Neste Oil – Stora Enso uusiutuvaa dieseliä biomassasta. [Verkkodokumentti]. Päivitetty 30.11.2010. Viitattu 19.02.2011.

Saatavissa:

[http://www.tekes.fi/fi/gateway/PTARGS\\_0\\_201\\_403\\_994\\_2095\\_43/http/tekes-ali1:7087/publishedcontent/publish/programmes/biorefine/documents/vuosiseminaari2010/holma011210.pdf](http://www.tekes.fi/fi/gateway/PTARGS_0_201_403_994_2095_43/http/tekes-ali1:7087/publishedcontent/publish/programmes/biorefine/documents/vuosiseminaari2010/holma011210.pdf)

Huhtinen, M. Kettunen, A. Nurminen, P. Pakkanen, H. 2000. Höyrykattilatekniikka. 5. painos. Helsinki. Oy Edita Ab. ISBN 951-37-3360-2.

Kara, M. Hoffman, K. Pirilä, P. Savolainen, I. Helynen, S. 2004. Energia Suomessa. 3. painos. Helsinki. Edita Prima Oy.

Kokko, S. 2002. Jätteiden energiakäytön näkymät Euroopassa leijukerrospolton kannalta. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, energiatekniikan osasto.

Kreutz, T. Larson, E. Liu, G. Williams, R. 2008. Fischer-Tropsch Fuels from Coal and Biomass. Pittsburgh. Princeton Environmental Institute.

KYVO2-Roskat energiaksi. Lahti Energian KYVO2-kaasutuslaitos. [Verkkodokumentti]. Päivitetty. Viitattu 22.02.2011.

Saatavissa: <http://www.roskatenenergiaksi.fi/voimalaitos/hankkeen-kuvaus>

Nieminen, M. Jätteenpolton uudet tekniikat. [Verkkodokumentti] Viitattu 23.02.2011.

Saatavissa:

[http://www.vtt.fi/liitetiedostot/muut/191012006\\_jatteenpolton\\_uudet\\_tekniikat.pdf](http://www.vtt.fi/liitetiedostot/muut/191012006_jatteenpolton_uudet_tekniikat.pdf)

Raiko, R. Saastamoinen, J. Hupa, M. Kurki-Suoni, I. 2002. Poltto- ja palaminen. 2. painos. Jyväskylä. Gummerus Kirjapaino P.Y. ISBN 951-666-604-3

Rezaiyan, J. Cheremisinoff, N. 2005. Gasification Technologies: A Primer for Engineers and Scientists. Florida. Taylor & Francis Group.

Salo, K. 2009. Application of Bubbling Fluidized Bed Gasification. [Verkkodokumentti].

Päivitetty 13.11.2009. Viitattu 10.11.2010.

Saatavissa: [http://www.flexgas.cnr.it/workshop/papers/S3\\_1\\_Salo.pdf](http://www.flexgas.cnr.it/workshop/papers/S3_1_Salo.pdf)

Similä, T. 2008. Biodiesel luo UPM:lle tulevaisuutta. [Verkkodokumentti]. Viitattu 24.02.2011.

Saatavissa:

[http://www.upm.com/fi/upm/media/artikkelit/biodiesel\\_luo\\_upmlle\\_tulevaisuutta/](http://www.upm.com/fi/upm/media/artikkelit/biodiesel_luo_upmlle_tulevaisuutta/)

Combustion, Gasification and Propulsion Laboratory, Dept of Aerospace Engineering, Indian Institute of Science. [Verkkodokumentti]. Päivitetty 26.2.2010. Viitattu 2.2.2011.

Saatavissa:<http://cgpl.iisc.ernet.in/site/FAQ/MostFrequentlyDiscussedIssues/CombustionsGasification/tabid/163/Default.aspx>