



Teknillinen tiedekunta

Energia- ympäristötekniikan osasto

BH10A0200 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

## **BIOPOLTTOAINEIDEN KÄYTTÖ MIKROTURBIINEISSA**

BIOFUEL APPLICATIONS FOR MICRO TURBINES

Lappeenrannassa 5.5.2008

0261217 Matti Koski      Ente 4

0296130 Tanja Puurtinen      Ente 3

## SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
1.1 Työn rajaus.....	1
2. SOVELLUSKOHTEET .....	2
3. BIOPOLTTOAINEET .....	3
3.1 Nestemäiset biopolttoaineet.....	5
3.2 Biokaasulaitokset .....	6
4. PALAMINEN JA KAASUTUS .....	8
4.1 Pääreaktiot .....	8
4.1.1 Kosteuden poistuminen.....	8
4.1.2 Pyrolyysi .....	9
4.1.3 Jäännöshiilen palaminen .....	9
4.2 Kaasutus.....	10
4.2.1 Palaminen ja kaasutus kiinteässä kerroksessa.....	10
4.2.2 Kaasutuksen reaktiot.....	11
5. PROSESSIT.....	14
5.1 Suora prosessi .....	14
5.2 Epäsuora menetelmä.....	17
5.2.1 Arinapoltto .....	17
5.2.2 Epäsuora prosessi .....	18
5.3 Edut.....	21
5.3.1 Suora menetelmä .....	21
5.3.2 Epäsuora menetelmä.....	21
5.4 Haitat .....	21
5.4.1 Suora menetelmä .....	21
5.4.2 Epäsuora menetelmä.....	22
6. APULAITTEET.....	23
6.1 HTHX.....	23
6.2 Turbiinin savukaasujen hyödyntäminen.....	26
7. SUURNOPEUSTEKNIikka .....	26
7.1 Tekniikka .....	27
7.1.1 Ongelmia.....	28
7.1.2 Vaihtoehtoiset menetelmät.....	29
7.2 Mikroturbiinit.....	29
7.3 Suurnopeuskompressorit.....	32
7.4 Laakerit.....	34
7.5 Generaattori.....	35
7.6 Koelaitos .....	35
7.7 Parannuksia .....	36
8. TALOUDELLISUUS.....	37
9. JOHTOPÄÄTÖKSET .....	40

Lähteet

## SYMBOLILUETTELO

### Symbolit

$\dot{m}$	massavirta	[kg/s]
$p$	paine	[Pa]
$R_c$	painesuhde	[-]
TET	turbiiniin tulevan aineen lämpötila	[K]
$\Delta$	ero	
$\eta$	hyötysuhde	[-]
$\varphi$	kosteusprosentti	[%]

### Alaindeksit

c	kompressori
gasif	kaasutin
hx	lämmönsiirrin
t	turbiini

### Lyhenteet

EFGT	ulkoisesti lämmitetty kaasuturbiinisysteemi
HTHX	korkealämpötilälämmönsiirrin
BIG/ICR	suora, välijäähdytyksellä varustettu kaasutusprosessi
BIG/GT	suora kaasutusprosessi
ICEFGT	välijäähdytyksellä varustettu ulkoisesti lämmitetty prosessi
MEMS	Micro-Electro-Mechanical System

## 1. JOHDANTO

Lisääntynyt ja kiristynyt sähköntarve, ympäristöasiat sekä päästökaupan toimenpiteet ovat nostaneet sähkön hintaa ja herättäneet kysymyksiä uusien energiantuotantomenetelmien soveltamisesta. Alati uusiutuva energiakenttä ja yhteiskunta kaipaavat uusia menetelmiä puhtaan ja taloudellisen tuotannon varmistamiseksi ja tämän takia useat tahot lähinnä Euroopassa ovat suunnitelleet useita variaatioita mikroturbiinilaitosten käyttämiseksi biopolttoaineilla.

Soveltamalla biopolttoaineiden kaasutusta sekä mikroturbiinisysteemejä saadaan kehitettyä uusia ja mielenkiintoisia haastajia konventionaalisille voimalaitosmalleille. Uusi tekniikka lähinnä suurnopeus- ja mikroturbiinisuunniteluissa ovat mahdollistaneet pienkäyttöön sopivia voimaloita, joilla voidaan kattaa pienten yhteisöjen sähkön- ja lämmöntarve. Uusina sovellutuksina on sekä polttoaineen kaasutus ja poltto mikroturbiinissa että poltto arinakattilassa ja mikroturbiinille menevän ilman lämmittäminen erillisellä, korkeille lämpötiloille soveltuvalla lämmönsiirtimellä. Hyötypuolina näille prosesseille on nopea käynnistäminen sekä sopivassa käyttökohteessa myös kilpailukykyinen hyötysuhde.

Vaikka edellä kuvatun kaltaisia systeemejä voitaisiin soveltaa myös suuremmille, maksimissaan usean sadan megawatin, laitoksille, niin tässä työssä on keskitytty pienen mittakaavan, noin 10...100 kW:n, laitoksiin, joita voidaan soveltaa pienyhteisöjen energiantarpeen tyydyttämiseksi. Työssä on kuvailtu prosesseissa vaadittua tekniikkaa erityisesti kaasutuksen, lämmönsiirtimien sekä suurnopeustekniikan osilta. Lisäksi on tutkittu suoran ja epäsuoran menetelmien eroja käytössä, vertailtu eri polttoainevaihtoehtoja sekä pohdittu menetelmien kannattavuutta pienkäytössä.

### 1.1 Työn rajaus

Tämä kirjallisuustyö on tehty parityönä. Käytännössä Matti Koski ja Tanja Puurtinen tekivät tiivistä yhteistyötä koko tutkimuksen aikana, mutta työn alueet voidaan jakaa karkeasti seuraavalla tavalla:

Matti Koski: Sovelluskohteet, Suora ja epäsuora prosessi, HT-lämmönsiirrin.

Tanja Puurtinen: Biokaasulaitokset, Turbiinin savukaasujen hyödyntäminen, Suurnopeustekniikka

Tämän lisäksi yhteistyötä on tehty erityisesti kohdissa: Biopolttoaineet, Palaminen ja kaasutus sekä Taloudellisuus. Aiheiden sovittaminen kokonaisuuteen ja työn viimeistely on tehty yhteistyönä.

## **2. SOVELLUSKOHTEET**

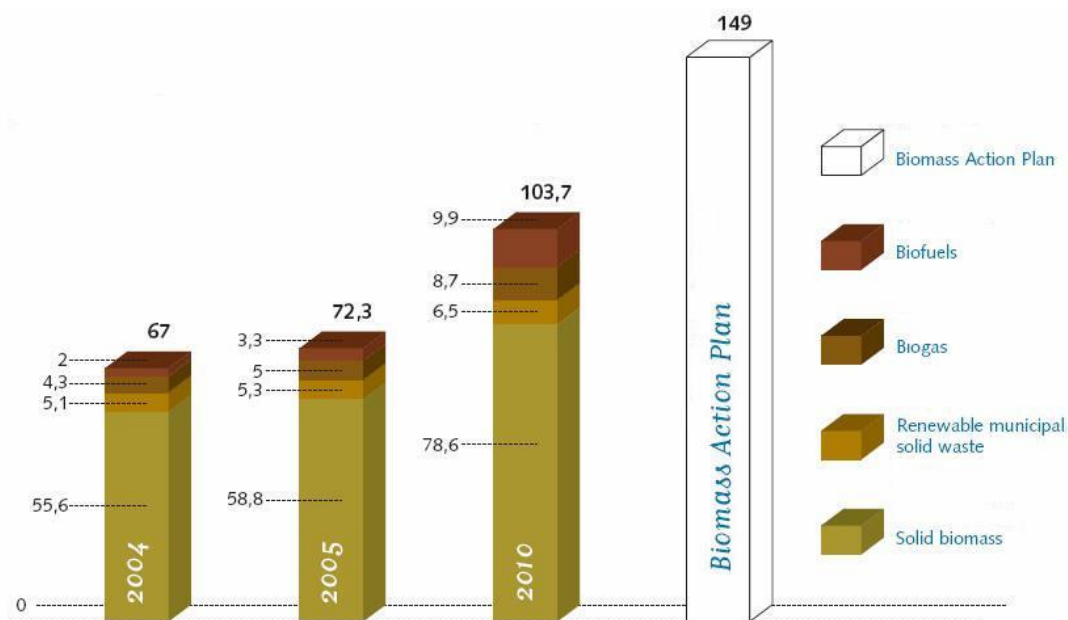
Tässä työssä kuvailtuja mikroturbiinisysteemejä voidaan soveltaa monipuolisissa käyttökohteissa. Käytettävän tekniikan mukana tulee kuitenkin tiettyjä rajoituksia. Koska laitoksen teho rajoittuu verrattain pieniin tehoihin mikrokokoluokan laitteiden sekä polttoaineiden takia, niin on luontevaa, ettei tekniikkaa sovelleta suuriin voimalaitoksiin. Mikroturbiineja käytetäänkin enemmän pienten energiantarpeiden, 10...100 kW, täyttämiseen. Tämän kokoluokan ”käyttökohteita” voisivat olla esimerkiksi pienet yhteisöt sekä paljon energiaa kuluttavat kohteet kuten sairaalat ja muut vastaavat laitokset.

Kuten edellä tullaan kertomaan, mikroturbiinisysteemit sopivat sekä sähkön- että lämmöntuotantoon kohteen tarpeiden mukaan. Systemi soveltuu sekä huippu- että varavoiman kattamiseen. Käsiteltävät biovoimalat soveltuvat siis myös jatkuvaan käyttöön, mikä voidaan laskea eduksi verrattuna esimerkiksi maakaasu- ja öljyvoimaloihin, joiden toiminta keskittyy varavoiman tuotantoon. Huippusähkötuotannossa kulut ovat verrattain pieniä ja varavoimantuotanto mikroturbiineilla on dieselmootoreita halvempaa niin toiminta- kuin huoltokustannuksiltaan. Lisäksi mikroturbiini saadaan käynnistettyä nopeasti ja se on myös luotettava. Prosessi voi olla edullinen myös perusvoimantuotannossa. (Euroopan komissio. 2006)

Määrittelevänä tekijänä toimii polttoainehuollon vakauttaminen sekä energiantarve. Polttoaineketjun tulee olla vahva ja tarkoin mietitty, sillä muutoin voimalaitoksesta ei saada taloudellisesti kannattavaa ja siten järkevää sijoituskohdetta. Tämän takia laitoksen läheisyydestä tulee saada paljon polttoaineeksi soveltuvaa materiaalia, joka tämän työn piirissä on biopolttoainetta kuten metsähake tai vastaava uusiutuva aine.

### 3. BIOPOLTTOAINEET

Viime vuosina biopolttoaineiden käyttö on tullut entistä suosittumaksi vaihtoehdoksi kasvavan energiantarpeen tyydyttämiseksi. Tämä on seurausta kiristyneille päästövaatimuksille sekä muiden polttoaineiden hintojen kallistumisesta biopolttoaineisiin verrattuna. Biopolttoaineet sopivat myös kotimaisuutensa puolesta mainiosti energiantuotannon polttoaineeksi. Eurooppalaisten voimalaitosten lisäksi biopolttoaineet ovat suosittuja energianlähteitä Afrikassa, jonka valtioilla on runsaat luonnonvarat ja siten edellytykset biopolttoaineiden tehokkaaseen käyttöön.



**Kuva 1.** Uusiutuvat polttoaineet EU:ssa [ Mtoe] (European comission. 2006)

Kyseinen trendi näkyy myös EU:n energiapolitiikassa. Kuvassa 1 nähdään EU:n biopolttoaineiden käytön kehitys vuodesta 2004 ja ennuste vuoden 2010 kulutuksesta. Ennusteen mukaan kiinteän biopolttoaineen kulutus kasvaa noin 20 Mtoe vuoteen 2005 verrattuna. Tämän takia uudet energiantuotantomenetelmät sekä ympäristöystävälliset teknologiat ovat saaneet lisähuomiota päättäjiltä ja suunnittelijoilta.

Biopolttoaineiden suosion nousun seurauksena teollisuuden tutkimus on keskittynyt entistä enemmän syventämään tietämystään uusiutuvien polttoaineiden käytöstä. Perinteisten polttomekanismien lisäksi on alettu tutkia uusia ratkaisumalleja, joiden avulla saataisiin entistä

paremmin hyödynnettyä olemassa olevia resursseja sekä mahdollisuuksien rajoissa olevia uusia teknologioita. Muuttamalla biopolttoaine kaasuttamalla kiinteästä olomuodosta kaasumaiseksi voidaan perinteisiä polttoaineita käyttää uusissa sovellutuksissa. Tämä kaasutusprosessi perustuu polttoaineen kaasuuntuviin, eli haihtuvien, aineiden poistumiseen polttoaineesta. Jäljelle jää kiinteä jäännös polttoaineesta, joka poistetaan kaasuttimesta mekaanisin menetelmin, ellei sitä voida muutoin hyödyntää.

Prosessiin soveltuvia polttoaineita ovat muun muassa hiili, turve, kuori, pelletit, hake, muut puupohjaiset polttoaineet sekä lanta. Tässä työssä keskitytään kuitenkin biopolttoaineisiin ja jätetään hiili omana tutkimuskohteenaan vähemmälle huomiolle. Prosesseissa voidaan soveltaa myös kaasuturbiineille sopivaa biokaasua, jota syntyy esimerkiksi kaatopaikoilla materiaalin hajotessa biologisesti. Taulukossa 1 on esitetty saksalaisen maakaasun, jonka metaanipitoisuus on hieman Siperian maakaasua pienempi, kaasutetun biopolttoaineen sekä biokaasun tyypillinen koostumus. Taulukossa on vertailtu myös edellä mainittujen polttoaineiden alemmaa lämpöarvoa.

Luvuista nähdään, että vaikka kaasutettu biopolttoaine olisikin mahdollista valmistaa ja käyttää, niin sen lämpöteho häviää kuitenkin selvästi verrattuna kilpailijoihinsa. Tämä tarkoittaa sitä, että haluttaessa sama teho kuin esimerkiksi maakaasulla, tulee polttaa selvästi enemmän kaasutettua biopolttoainetta. Tietysti ”puukaasun” lämpöarvo riippuu pitkälti kaasutettavan kiinteän aineen koostumuksesta: erityisesti suuri kosteuspitoisuus ja vähäinen hiilipitoisuus heikentävät kyseistä arvoa.

Kaatopaikoilta saatava biokaasu sen sijaan on suurimmilta osin metaania, joten se soveltuu erittäin hyvin polttoaineeksi. Toisaalta biokaasun hiilidioksidipitoisuus on myös vertailumaakaasua suurempi, joten sitä poltettaessa hiilidioksidin osuus savukaasuista on vastaavasti tavallista maakaasua suurempi.

**Taulukko 1:** Kaasumaisten polttoaineiden tyypilliset koostumukset (Kautz. Simulation von...2006 s. 8.)**Tab. 1: Zusammensetzung der in Abb. 9 gezeigten Brennstoffe**

		Erdgas-H	Holzgas	Biogas
CH <sub>4</sub>	Anteil in %	0,930		0,600
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Anteil in %	0,013		
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	Anteil in %	0,025		
CO <sub>2</sub>	Anteil in %	0,002	0,106	0,380
N <sub>2</sub>	Anteil in %	0,030	0,414	0,005
H <sub>2</sub> O	Anteil in %		0,073	0,010
H <sub>2</sub>	Anteil in %		0,205	
CO	Anteil in %		0,202	
O <sub>min</sub>	-	2,088	0,204	1,200
H <sub>u</sub>	kJ/kg	47015	4534	17800

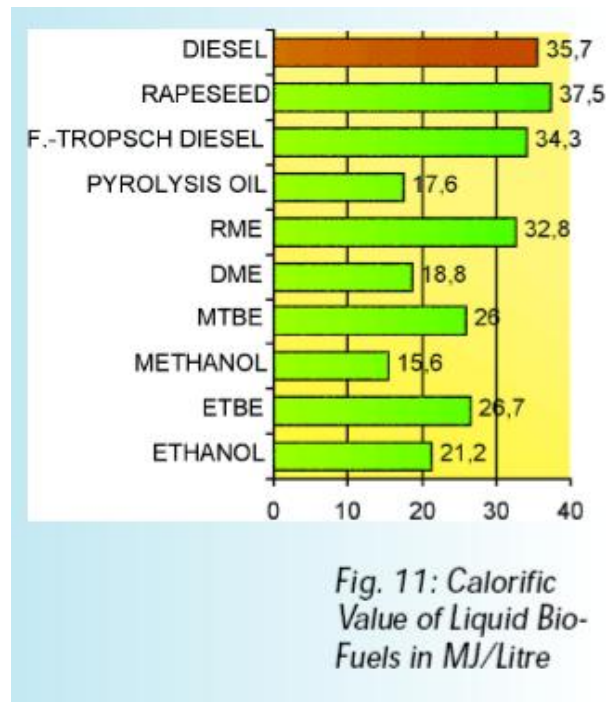
### 3.1 Nestemäiset biopolttoaineet

Kiinteiden ja kaasumaisten biopolttoaineiden lisäksi on mahdollista käyttää nestemäisiä polttoaineita. Käytäntö on hyvin harvinainen, mutta Capstone on valmistanut tähän tarkoitukseen sopivan mikroturbiinin. Nykyiset tutkimukset nestemäisen biopolttoaineen osalta kohdistuvat vaihtoehtoisiin nestemäisiin biopolttoaineisiin, kuten rapsiöljyyn, pellavaöljyyn, etanoliin, auringonkukkametyyliesteriin ja eläinrasvamaatyliesteriin.

Useimpien nestemäisten biopolttoaineiden lämpöarvo on pienempi kuin fossiilisilla polttoaineilla. Jotta tuotannon ja ajoajan sekä tankkauksen väli saataisiin samanlaiseksi kuin fossiilisia poltettaessa täytyy virtausnopeutta ja varastointitilavuutta kasvattaa. Fossiilisilla nestemäisillä polttoaineilla energiasisältö on suurempi kuin 30 MJ/l, jonka saavuttaa toisaalta myös biodiesel ja muutama muu kasviperäisen öljy (taulukko 2).

Viskositeetti kasviöljyillä voi olla huoneenlämpötilassa jopa kymmenen kertaa suurempi kuin fossiilisella dieselillä, mikä tekee hankalaksi tai jopa mahdottomaksi kasviöljyn pumppaamisen ympäröivässä lämpötilassa. Korkea viskositeetti aiheuttaa myös kaasujen sekoittumisongelmia polttokammiossa eli syttymisongelman polttoainepiikkien takia. Ongelma voidaan ratkaista sekoittamalla pienviskoosista nestettä, esimerkiksi alkoholia, kasviöljyyn ja esilämmittämällä kasviöljyä. Polttoaineen lämmitys olisi mahdollista järjestää turbiinilta poistuvan lämpimän kaasun avulla. (Euroopan komissio.)



**Taulukko 2:** Nestemäisten biopolttoaineiden lämpöarvoja (Euroopan komissio. )

Nestemäinen polttoaine tuo omat polttoteknilliset haasteensa voimantuotantoon: polttoaineen kuljetus, käsittely sekä itse polttaminen poikkeavat kiinteän tai kaasumaisen aineen käsittelystä. Tämän takia nestemäinen vaihtoehto ei ole vielä saavuttanut suurta suosiota mikroturbiinilaitoksissa. Nestemäisiä biopolttoaineita käytetään enemmän Etelä-Euroopassa.

### 3.2 Biokaasulaitokset

Yksityiset biokaasulaitokset ovat maatilakohtaisia ja niissä käsitellään vain yhden maatilan lantaa, muita orgaanisia aineita ja kasvibiomassaa. Tuotettu energia käytetään tilalla lämpönä ja sähkönä ja käsitelty lanta lannoitteena tilan pelloilla. Keskitetyssä biokaasulaitoksessa käsitellään vastaavasti usealta maatilalta saatua lantaa yhdessä teollisuuden ja yhdyskuntien biojätteiden ja lietteiden kanssa. Hajautettu tuotanto vähentää yksittäisen viljelijän taloudellista panosta laitoksen rakentamiseen, lannan varastointikustannuksia, kuljetuskustannuksia ja levityskustannuksia. Myös humuslannoitteen laatu paranee, kun sekoitetaan eri lantalajeja ja mädätetään humuslannoitetta.

Anaerobinen käsittely tapahtuu mesofiilisenä (30-35°C) tai termofiilisenä (50-65°C). Tosin pienemmätkin lämpötilat riittävät, mutta käsittelyaika on pidempi, metaanin tuotto pienempää ja materiaali hygienisoituu huonommin. Kun taas toisaalta termofiilinen prosessi kuluttaa enemmän energiaa lämmitykseen ja on herkempi häiriötekijöille. Käsittelyn ansiosta metaanipäästöt pienenevät, torjunta-aineet hajoavat, hajuhaitat vähenevät 80 % ja patogeenit tuhoutuvat kun niiden leviäminen lannan välityksellä estyy. Käsittely vähentää myös lannan fytotoksisten eli kasveille haitallisten yhdisteiden määrää ja lisää lannan juoksettavuutta. Näin lanta voidaan hyödyntää lannoitteena kaasutuksen jälkeen ja ravinteet palauttaa pellolle.

Myös yhdyskunta ja teollisuuden orgaanisten jätteiden ravinteet voidaan palauttaa pellolle tai käyttää maantäytössä. Prosessi on myös energiatehokas, sillä lämmitys, sekoitus ja pumppaus vaativat vain 10 % kaasun energiasisällöstä

Perusmateriaalina lanta on hyvä biokaasun tuotantoon, sillä se sisältää paljon bakteerien tarvitsemia ravinteita ja vettä. Tuotantoa voidaan tehostaa lisäämällä jätteen sekaan muuta orgaanista ainetta. Kuitenkin esimerkiksi ruokohelven käyttö on tehokkaampaa suorassa biokaasun tuotossa ilman, että käyttö tapahtuu vasta eläimen lannasta. Metaanintuotantoa saadaan vielä parannettua sadonkorjuun oikealla ajoituksella sekä esikäsittelemällä kasvia ensin biologisesti, kemiallisesti tai fysikaalisesti. (Tuomisto. 2005 ja Lehtimäki. 1995.)

Kaasutuksen yhteydessä pyritään kiinnittämään erityistä huomiota polttoaineen kosteuspitoisuuteen, jolla on suuri vaikutus polttoaineen soveltuvuuteen sekä kaasutuksessa että perinteisessä polttamisessa. Luontaista kosteusprosenttia pienennetään erityisellä kuivauslaitteistolla, jotka hyödyntävät biomassan poltosta syntyvien savukaasujen lämpöä lämmönsiirtimen jälkeen.

Alhaisen lämpöarvon lisäksi biopolttoaineiden käytön kannattavuutta sekä kaasumaisessa että kiinteässä muodossa hillitsee polttoaineen kalleus energiantuotannossa. Koska bioaineiden lämpöarvo jää verrattain alhaiseksi niiden käyttökustannukset kohoavat laitevaatimusten sekä tarvittavan polttoainemäärän takia. Suuri polttoainemassavirta merkitsee myös lisäkustannuksia logistiikassa: voimalaitosalueelle tulee varata riittävän suuret polttoainekentät ja lisäksi tulee varmistaa, etteivät polttoainekuljetukset katkea missään vaiheessa energiantuotantoa vaarantaen. Kuljetusluotettavuuteen vaikuttaa suuresti voimalaitoksen etäisyys polttoaineen sijainnista Foster

Wheelerin Nieminen ja Kivelä kirjoittivat, että suurille laitoksille, 30...150 MW, kuljetusetäisyydet eivät saisi olla yli 50 kilometriä.(Nieminen, Kivelä. 1998. s.2) Tätä pienemmille laitoksille kriittinen etäisyys on luokkaa 30 kilometriä. Pienillä laitoksilla, ja varsinkin pienyhteisöjen energiantarpeen tyydyttämiseen, tarvittava polttoainemäärä on pienempi, joten laitoksen polttoainelogistiikkaa voidaan pohtia uudelta kantilta: kannattaako laitokselle ensinnäkään rakentaa kookasta polttoainevarastoa vai saadaanko jatkuvat polttoainekuljetukset varmistettua myös huonoimman mahdollisen tapauksen varalta?

#### **4. PALAMINEN JA KAASUTUS**

Aineen palaminen tapahtuu aina tietyn tapahtumaketjun mukaisesti. Tämä on kuvattu seuraavien alaotsikoiden yhteydessä. Lisäksi alla on esitetty palamiseen ja kaasutukseen vaikuttavia tekijöitä ja eritelty niiden vaikutusta lopputulokseen.

##### **4.1 Pääreaktiot**

Palaminen tapahtuu kolmen perusreaktion, kuivumisen, pyrolyysin ja jäännöshiilen palamisen kautta. Näitä kolmea reaktiota on käsitelty seuraavissa alakappaleissa.

###### **4.1.1 Kosteuden poistuminen**

Kosteus on merkittävä tekijä kattilan mitoituksessa varsinkin, kun se on biopolttoaineilla jopa 30...60 prosenttia kokonaispainosta. Suurin osa arinapinnasta ja tulipesätilasta on siis varattava kosteuden kuivattamiseen. Palamistulos on myös parempi, jos kosteuden poistuminen on nopeaa, sillä kuivuminen laskee tulipesän lämpötilaa. Kosteuden poistumisen nopeutta voidaan kasvattaa pienentämällä palakokoja eli kasvattamalla haihtumispintaa ja kuivaamalla esilämmitetyllä palamisilmalla. Tulipesägeometrialla on myös merkityksensä. (Raiko et al. 2002. s.467)

Kosteus lisää huomattavasti savukaasujen määrää, eli tässä tapauksessa kaasuttimesta poistuvan kaasuseoksen määrää, mitä voidaan pitää myös hyvänä asiana. Toisaalta seoksen sisältämä kosteus heikentää huomattavasti seoksen lämpöarvoa, mikä vaikuttaa suoraan prosessin hyötysuhteeseen ja kannattavuuteen. Mikäli polttoaineen kosteus ylittää 60...62 prosenttia, palamista joudutaan

tukemaan polttoaineella, jonka lämpöarvo on käytettyä ainetta parempi. Tähän sopiva aine on turve, jonka ominaisuudet sopivat erinomaisesti polttoprosesseihin. (Raiko et al. 2002. s. 469)

#### **4.1.2 Pyrolyysi**

Polttoaineen kosteuden haihduttua jäljelle jää aines, joka koostuu haihtuvista aineista sekä kiintoaineesta. Pyrolyysivaiheessa nämä haihtuvat aineet muuttuvat inerteiksi eli kemiallisesti reagoimattomiksi kaasuiksi, palamiskelpoisiksi kaasuiksi ja nestefaasissa oleviksi terva-aineiksi, jotka palavat hyvin liekissä, jos happea on riittävästi. Pyrolyysi alkaa endotermisenä eli lämpöä sitovana reaktiona ja lämpötilan kasvaessa muuttuu eksotermiseksi eli lämpöä vapauttavaksi reaktioksi. Suurin merkitys pyrolyysivaiheessa on haihtuvien aineiden määrällä. Tämä vaikuttaa suuresti laitteistomitoitukseen, sillä haihtuvia aineita biopolttoaineilla on kuiva-aineista noin 70 %, kun taas hiilellä vain 30 %. Polttoaineen koostumus vaikuttaa suuresti myös laitteiston suunnitteluun.

Kuumilla säteilypinnoilla ja muilla tulipesäkonstruktiolla yritetään saada aikaan kaasujen syttymiselle ja palamisreaktioille riittävä viipymäaika eli riittävä lämpötilataso ja ylläpitää se. Koska polttoaine palaa diffuusioliekillä, ilman sekoittuminen palamisvyöhykkeessä on erityisen tärkeää biopolttoaineilla, joiden haihtuvien aineiden määrä on suuri (Raiko et al. 2002. s.468). Tässä auttaa esilämmitetty ilma, jonka lämpö saadaan prosessista.

Pyrolyysillä on suuri merkitys varsinkin suorilla prosesseilla, joissa kaasutin on yksi tärkeimmistä prosessin komponenteista. Kaasutuksesta kerrotaan lisää kappaleessa Kaasutus.

#### **4.1.3 Jäännöshiilen palaminen**

Siinä missä pyrolyysin tärkeimpänä tekijänä on lämmönsiirto, pyrolyysistä jäljelle jäävän jäännöshiilen kaasutus perustuu vankasti massansiirtoon. Koska massansiirto on lämmönsiirrolle analoginen fysikaalinen reaktio, niin prosessia voidaan tutkia vastaavin ajatusmallein. Toisaalta prosessin lämmön merkitystä ei voida väheksyä, sillä diffuusio on voimakkaasti riippuvainen lämpötilasta. Itse kaasutusprosessin nopeuteen ja tehokkuuteen vaikuttavat tietenkin myös polttoaineen ja kaasutusaineen koostumus. Alkuaineiden reaktiot poikkeavat suuresti toisistaan ja

onkin tärkeää tietää käytettyjen aineiden määrä toisiinsa nähden, jotta saataisiin toivottu lopputulos kaasutuksesta.

Kiinteä hiili, joka pyrolyysivaiheen jälkeen on jäljellä, palaa pinnaltaan ilman liekkiä, jos lämpötila on riittävä ja happea tarpeeksi. Vaihe on hidaskäyttö ja vaatii suhteessa enemmän arinapintaa kuin pyrolyysi. Nopeuteen voidaan vaikuttaa hieman pienentämällä polttoaineen palakokoa. Lämpötilatason nostoa reaktioita kiihdyttämään ei kuitenkaan kannata käyttää, sillä se voi aiheuttaa käytettävyysongelmia. Esimerkiksi esilämmittämällä palamisilmaa voi tuhka sulaa ja syövyttää tulipesän muurauksia. Arinapolton tuhka poistuu pääosin tulipesätuhkana, eikä savukaasujen mukana. Näin tuhka ei aiheuta likakerroksia tai muita ongelmia lämpöpinnoille. Jäännöshiilen palamisvaiheen mitoituksella on siis suuri merkitys palamishyötysuhteeseen. (Raiko et al. 2002. s.468)

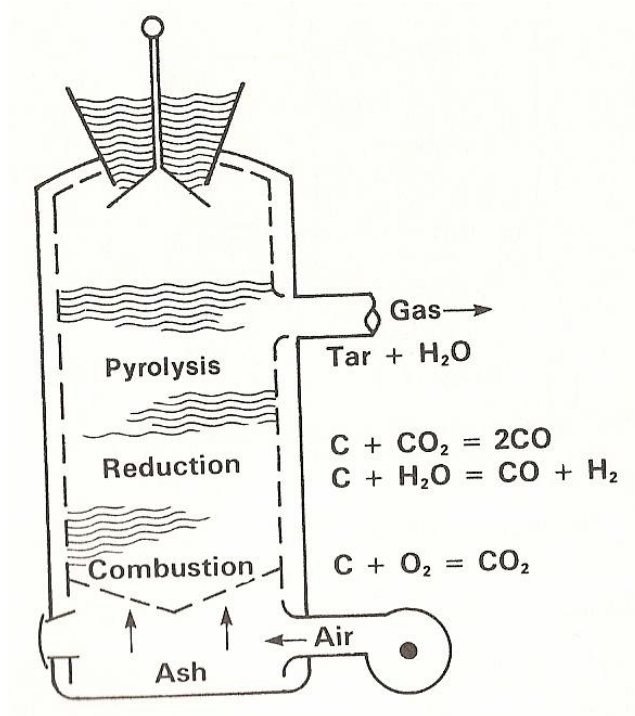
## **4.2 Kaasutus**

### **4.2.1 Palaminen ja kaasutus kiinteässä kerroksessa**

Kaasuttimen toiminta, eli kiinteän polttoaineen kaasutus, perustuu prosessiin tuotavaan lämpöön, alistökiömetrisiin olosuhteisiin sekä itse polttoaineeseen, joka tuodaan prosessiin huonoimmassa tapauksessa erittäin kosteana. Suuri kosteusprosessi sitoo prosessilämpöä ja heikentää polttoaineen ominaisuuksia selvästi. Siispä onkin suotavaa toimittaa polttoaine kuivana kaasuttimeen, mutta tämä on pienkäytössä usein poissuljettu vaihtoehto, koska erillinen polttoaineen kuivaamo lisäisi investointikustannuksia huomattavasti.

Kuvassa 2 on esitetty yleinen malli kaasuttimelle. Kuvassa näkyy kuinka kaasutusilma syötetään kaasuttimeen alakautta ja polttoaine yläkautta. Lämmin ilma kohtaa polttoaineen polttoalueella, jossa se yhtyy välittömästi korkean lämpötilan vaikutuksesta hiiliainekseen. Palamisessa syntyvät kaasut reagoivat kaasuttimen keskivaiheessa polttoaineen mukana tulleiden kosteuden ja hiilen kanssa muodostaen häkää hiilidioksidista ja vedestä. Syntynyt kaasuseos johdetaan kaasuttimesta mikroturbiinisysteemin, jossa se poltetaan.

Kuvailtu kaasutinmalli on vain yksi useista mahdollisista vaihtoehdoista. Riippuen laitteen toiminnasta, käytetystä polttoaineesta, painetasosta, lämmön- ja massansiirrosta sekä tuhkankäsittelystä on mahdollista rakentaa toimiva kaasutin yli 500 eri menetelmällä (Reed, T.B. et al.. 1981. s.192)



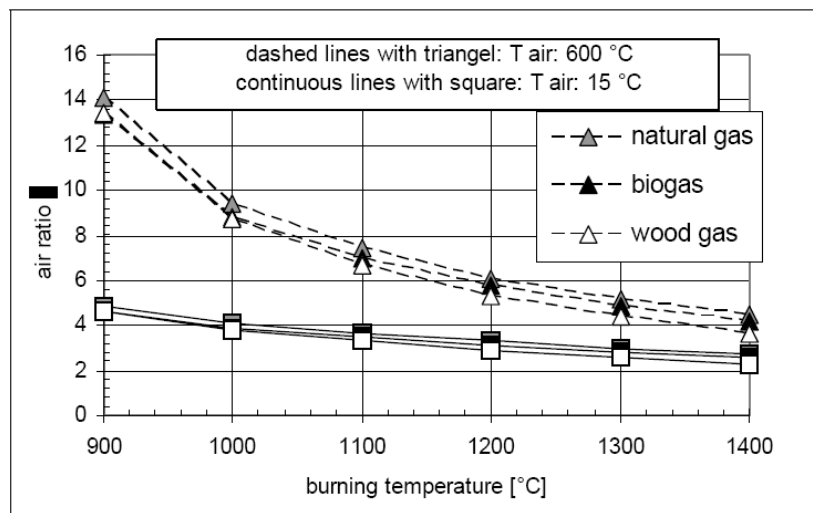
**Kuva 2.** Vastavirtakaasutin(Reed, T.B. et al.. 1981. s.193)

#### 4.2.2 Kaasutuksen reaktiot

Mikrokaasuturbiinilta tuleva paisunut kiertoilma voidaan ohjata epäsuorassa prosessissa kuumana suoraan kaasuttimeen, jossa sen sisältämä lämpö käytetään hyväksi kiinteän polttoainetta kaasuttaessa. Kokonaisuudessaan kaasuttimeen tuodaan erittäin vähän palamisilmaa, ilmaluku on noin 0,2...0,3. Tämä tarkoittaa sitä, että seoksesta syntyy epätäydellisen palamisen tuloksena lämpöarvoltaan verrattain heikkoa kaasua, joka sisältää melko paljon palamisilmaa ja suhteessa vähemmän polttoainetta. Tämän takia polttoaineen sisältämä kosteus korostuu entisestään, sillä jo entuudestaan pieni palavan aineksen osuus pienenee ilmamäärän kasvaessa ja veden höyrystyessä kaasuksi. Biopolttoaineilla kosteutta voi olla jopa 30...60 painoprosenttia, mikä on merkittävä osuus. Kosteuden vaikutusta prosessiin voidaan pienentää kuivaamalla polttoainetta tai pienentämällä palakokoa eli kasvattamalla haihtumispinta-alaa. Tietenkin myös kaasutusilman

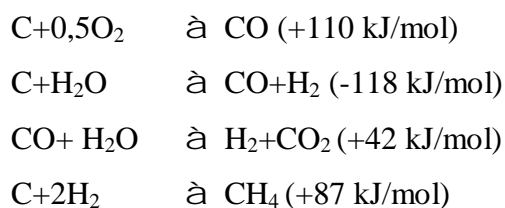
sisältämä kosteus vaikuttaa paljon saatavan kaasuseoksen kokonaisuuteen. (Raiko et al. 2002. s. 467-469)

Verrattaessa ilmakertoimen ja palamislämpötilan välistä suhdetta maakaasun, biokaasun sekä puukaasun palamisessa, niin saadaan kuvan 3 mukaisia tuloksia. Tästä huomataan kuinka palamislämpötilan kasvaessa tarvittava ilmamäärä putoaa paljon. Polttoaineen matala lämpöarvo mahdollistaa polton pienellä ilmakertoimella ja matalissa lämpötiloissa kuten kuvasta 3 nähdään. Tämä vaikuttaa tehokkaasti typen oksidien muodostumiseen ja on siten polttoteknillisesti positiivinen asia vähentäen palamistuotteiden päästöpitaisuuksia.



**Kuva 3:** Palamisilmamäärän vaikutus palamislämpötilaan eri polttoaineilla (Koskelainen, 2008)

Haihtuvat aineet irtoavat polttoaineesta pyrolyysin myötä ja lopulta jäljellä on enää palava aines, jäännöshiili, sekä palamaton osuus, tuhka, jonka sulamisen aiheuttama tulipesärakenteiden syöpyminen on vaarana lähinnä erittäin suurissa lämpötiloissa,  $T > 1400$  °C. Itse kaasutus on käytännössä alistokiömetristä palamista, jolloin palavan aineksen ei anneta palaa loppuun asti. Korkeissa lämpötiloissa tapahtuu seuraavia reaktioita:



Reaktioiden perään on kirjoitettu reaktiossa vapautuva tai sitoutuva kemiallinen sidosenergia, joka vaikuttaa suoraan prosessin kokonaistilaan. Kuten kemiallisista kaavoista nähdään, lopputuloksena saadaan lähinnä hiilimonoksidia eli häkää, jota voidaan vielä hyödyntää polttoaineena. (Huhtinen et al. 2004. s. 179)

Koska palaminen ei ole täydellistä ja osa polttoaineesta poistuu kaasumaisessa muodossa, reaktio tapahtuu verrattain alhaisessa lämpötilassa, 800...1000 °C. Tällä on positiivinen vaikutus laitteiston materiaalikestävyyteen sekä päästöjen muodostumiseen (Raiko et al. 2002 s. 568). Tyypillinen puun kaasutuksessa syntyvä seos on esitetty taulukossa 3.

**Taulukko 3.** Ilmakaasutetun puupolttoaineen tyypillinen koostumus.( Huhtinen et al. 2004. s. 180)

Polttoaine	CH <sub>4</sub> [%]	H <sub>2</sub> [%]	CO [%]	CO <sub>2</sub> [%]	N <sub>2</sub> [%]	H <sub>2</sub> O [%]
Puu	1...6	8...20	10...20	9...15	42...56	0...27

Tällainen kaasuseos on lämpöarvoltaan luokkaa 3,3...5,1 MJ/m<sup>3</sup>n. Luku on verrattain pieni, koska kaasutusaineena on käytetty runsaasti inerttiä kaasua, typpeä, sisältävää ilmaa ja kaasuseoksen palavana aineksena on vety sekä häkä. Pienestä lämpöarvostaan huolimatta saatu kaasuseos on pienkäyttöön soveltuvaa, koska saatava lämpömäärä on riittävä energiantuotannon lähteeksi. (Raiko et al. 2002. s. 568).

Biopolttoaineen kaasuttaminen voidaan tehdä myös puhtaalla hapella. Tällöin seoskaasu saadaan ilmakaasutettua kaasua puhtaammaksi ja siten myös kaasuseoksen lämpöarvo paranee. Happikaasutetun polttoaineen lämpöarvo on tyypillisesti luokkaa 7...15 MJ/m<sup>3</sup>n, eli noin kaksi kertaa suurempi kuin ilmakaasutetun polttoaineen. Happikaasutuksen haittapuolena on menetelmän kalleus ja tekniikan monimutkaisuus. Prosessi vaatii puhdasta happea, jonka valmistaminen edellyttää ilman jäähdyttämistä erittäin kylmäksi hapen erottamiseksi kaasuseoksesta. Tämä vaatii erittäin paljon energiaa ja menetelmä on täten myös kallis investointien ja käyttökustannuksien takia. Happikaasutusta sovelletaankin lähinnä suurien voimalaitosten, sähköntuotanto satoja megawatteja, energiantuotannossa. Happipolttu mahdollistaa myös ilmakaasutusta suuremman palamislämpötilan, noin 1500 °C (Raiko et al. 2002. s. 568).



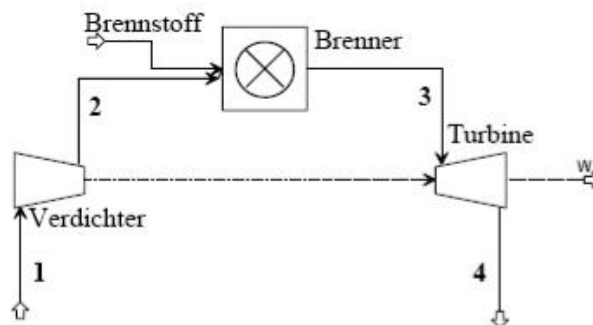
Kaasutuksen lopputulosta, biokaasua, voidaan käyttää polttoaineena suorassa mikro-turbiiniprosessissa.

## 5. PROSESSIT

Mikroturbiiniprosesseja on kaksi erilaista perustyyppiä: suora ja epäsuora prosessi. Suorassa menetelmässä kaasuttimessa syntyvät kaasut ohjataan suoraan mikrokaasuturbiiniin ja epäsuora menetelmä perustuu savukaasujen lämmittämään kiertoaineeseen, joka pyörittää turbiinia erillisessä kierrossa.

### 5.1 Suora prosessi

Toisin kuin epäsuoralla menettelyllä, suoraa polttomenetelmää sovellettaessa prosessiin ei tarvitse lisätä suurille lämpötiloille soveltuvaa lämmönsiirintä kaasutus- ja mikroturbiinipiirien välille. Tämä kiistaton etu on mahdollista saavuttaa muuttamalla biopolttoaine kaasumaiseen muotoon kaasuttimessa ja polttamalla se mikroturbiinisysteemissä. Suoran polttoprosessin eteneminen on esitetty kuvassa 4.



**Kuva 4.** Suora menetelmä (Kautz. Simulation von extern...2006. s.2)

Kuten kuvasta nähdään, suoran polttoprosessin pääkomponentit ovat kompressori (Verdichter), polttokammio (Brenner), itse kaasuturbiini (Turbine) sekä yllä olevan kaavion ulkopuolella oleva kaasutin. Prosessi noudattaa konventionaalisen kaasuturbiinin periaatetta, jossa kompressorissa paineistettu palamisilma ohjataan polttokammioon, jonka polttimissa se palaa polttoaineen kanssa.

Tämän jälkeen syntyneet savukaasut ohjataan turbiiniin, jossa kaasu luovuttaa lämpöenergiansa turbiiniin pyörittämiseksi. Prosessissa on edellytykset tehokkaalle energianmuuntoprosessille.

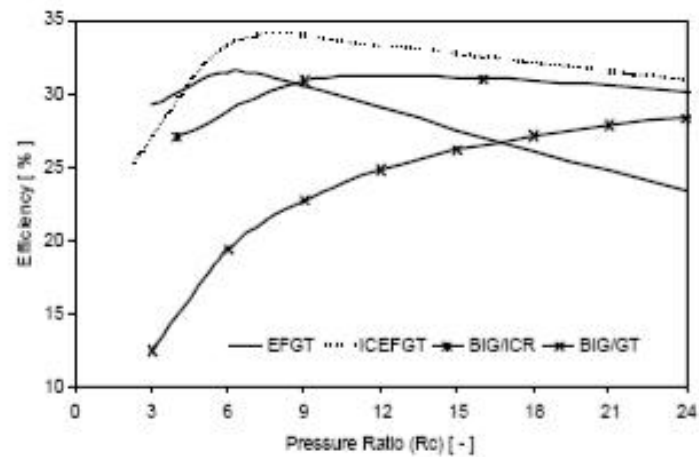
Toisaalta suoran menetelmän heikkoutena on polttoaineen epäpuhtauksien pääseminen turbiiniin. Erityisen epäpuhtaat savukaasut likaavat ja pahimmassa tapauksessa myös kuluttavat turbiinin pintaa ja siten haittaavat sen optimaalista käyttöä sekä vähentävät laitteiston käyttöikä.

Sekä suorien, BIG/GT ja BIG/ICR, että epäsuorien, EFGT ja ICEFGT, prosessien arvoja on esitetty taulukossa 4. Luvuista nähdään erityisesti, kuinka suoran prosessin kokonaishyötysuhde heikkenee kaasuttimen takia. Kaasuttimen hyötysuhde riippuu kuitenkin paljon käytetystä mallista, ja epätaloudellisimmilla laitteilla hyötysuhde saattaa olla jopa 50 prosenttia. (Syred et al. 2004. s. 7). Tämän takia epäsuora prosessi on useimmissa tapauksissa hyötysuhteeltaan suoraa parempi. Lisäksi olisi järkevää suunnitella turbiinilta poistuville kaasuille lämmönsiirrin hukkalämmön hyödyntämiseksi. Alustavia arvoja sekä suorille että epäsuorille prosesseille saadaan taulukosta 4.

**Taulukko 4:** Prosessien suunnitteluarvoja (Ferreira et al. 2001. s.4)

	BIG/GT	EFGT	ICEFGT	BIG/ICR
$\eta_{gsair}$	0.75	-	-	0.75
$\eta_c$	0.88	0.88	0.88	0.88
$\eta_{cc}$	0.99	0.99	0.99	0.99
$(\Delta p/p)_{cc}$	0.04	0.02	0.02	0.04
$\eta_t$	0.89	0.89	0.89	0.89
$\Phi_{hx}$	-	0.90	0.90	0.90
TET [K]	1400	1350	1350	1400
$m$	110	140	140	110
$R_c$	18	6.3	8.0	12

Molemmissa prosesseissa on olennaista valita oikea painesuhde kokonaishyötysuhteen maksimoimiseksi. Kuten kuvasta 5 nähdään kuinka suorilla prosesseilla, BIG/ICT ja BIG/GT, hyötysuhde joko nousee jopa kymmenen prosenttiyksikköä tai pysyy suunnilleen samalla tasolla. Täten voidaan todeta, että prosessin kokonaishyötysuhde riippuu voimakkaasti käytetystä painesuhdeesta. Tilanne on kuitenkin huonompi epäsuorilla prosesseilla, EFGT ja ICEFGT, joilla optimipiste saavutetaan verrattain pienillä painesuhdeilla,  $\pi=5\dots6$ . Tämän seurauksena epäsuorilla systeemeissä ei voida soveltaa korkeapaineisia prosesseja, jottei kokonaishyötysuhde kärsisi liikaa. Toisaalta tämä heikentää voimantuotantoa, sillä ilman lämpötila puristuksen jälkeen on riippuvainen kompressorin painesuhdeesta.



**Kuva 5:** Painesuhteen vaikutus kokonaishyötysuhteeseen (Ferreira et al. 2001. s.5)

Kuvasta 5 nähdään myös, että paras hyötysuhde saavutetaan epäsuorilla prosesseilla vaikkakin välijäähdytetty suora prosessi on tehokkaimmillaan hyvin lähellä välijäähdytettyä epäsuoraa prosessia.

Toisaalta taulukon 5 lukujen perusteella saadaan tietää, että suoran prosessin avulla voidaan tuottaa melko tehokkaasti energiaa. Koska painesuhde on alhainen, 3,4, prosessi ei vaadi kovin isoa ja paljon sähkötehoa vaativaa kompressoria. Tämä on kiistaton etu, sillä tässä tapauksessa omakäyttöhyötysuhde pysyy kurissa eikä siten vaikeuta taloudellisen hyödyn saamista prosessista. Kyseiset luvut on saatu polttamalla maakaasua, joten todellisessa biopolttoainekäyttöisessä mikroturbiinisysteemissä tehot olisivat esitettyä pienempiä.

**Taulukko 5.** Suoran prosessin tyypillisiä arvoja. (Labinov. 2002. s. 9)

**Microturbine information supplied by the manufacturer for the low pressure natural gas unit at full load, under ISO conditions (288K at sea level)**

Parameter	Description	Value
$T_4$	Turbine inlet temperature (K)	1116
$\pi_c$	Compressor pressure ratio	3.4
$G_{a,c}$	Air compressor air flow rate (kg/s)	0.31
$W_f$	Total power of the electrical fan motors (kW)	0.122
$W_{ng}$	Gas compressor power (kW)	2.1
$\eta_{dc}$	Digital controller efficiency	0.94
$W_{p,net}$	Microturbine full load power (kW net)	28 +/-1
$E_{LHV}$	Microturbine efficiency (LHV)* (%)	26 +/-2
$E_{HHV}$	Microturbine efficiency (HHV)* (%)	23.6 +/-1.8
$Q_g$	Natural gas heat input (kW)	122.5
$T_6$	Exhaust gas temperature at the recuperator outlet (K)	534
$Q_{exhaust}$	Total exhaust energy (kW)	85
$n$	Microturbine engine speed (rpm)	96,000

\*Note that calculations presented in this study are based on the higher heating value (HHV) of natural gas rather than the lower heating value (LHV).

## 5.2 Epäsuora menetelmä

Epäsuora menetelmä poikkeaa suorasta menetelmästä pääosin siten, että itse polttoaineen palaminen ja lämmöntuonti prosessiin ovat erillään turbiinikerrosta. Seuraavassa on eritelty arinapolton ja itse prosessin ominaisuuksia.

### 5.2.1 Arinapoltto

Arinaksi kutsutaan kattilan pohjalle sijoitettavaa polttolaitetta, jonka päällä kiinteä polttoaine poltetaan kerroksena, joka pysyy paikoillaan tai liikkuu hitaasti. Kuten muillakin polttomenetelmillä kiinteän polttoaineen palamisen päävaiheet arinalla ovat kosteuden poistuminen, pyrolyysi ja haihtuvien palaminen sekä jäännöshiilen palaminen. Arinalla on kuitenkin eri palamisvaiheessa olevia kappaleita samanaikaisesti. Tästä huolimatta arinapolttolaitteiden mitoittamiseen vaikuttavat edelleen kosteus, palakoko, haihtuvien määrä ja tuhkan sulamiskäyttäytyminen. (Huhtinen et al. 2004, s. 133)

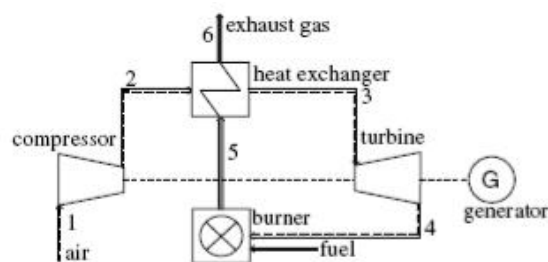
Vaikka arinapoltto on ollut pienten ja keskisuurten yksiköiden yleisin polttomenetelmä kiinteille polttoaineille teollistumiskauden alusta lähtien, ovat uudet tekniikat esimerkiksi leijutuspoltto syrjäyttäneet sen yli 5 MW<sub>th</sub> tehoalueilla erityisesti Suomessa. Suosio tätä pienemmissä yksiköissä ei ole kuitenkaan tyrehtynyt. Biomassan käytön takia arinakattiloita on alettu suosimaan Keski- ja

Etelä-Euroopassa alle 20 MWe lauhdevoimalaitoksissa (Raiko et al. 2002. s. 466). Suuremmat kattilat ovat kuitenkin jo taloudellisten seikkojen takia epäsuosiossa mikroturbiinisysteemissä. Arinakattila riittää useimmille mikroturbiinisysteemeille.

Pienpolton, eli tämän työn alaiset, arinat ovat kiinteitä tasoarinoita, joiden materiaalina on joko valurautaa tai keraaminen materiaali. Polttoaineen syöttö tapahtuu käsin tai mekaanisesti syöttöruuvilla tai sylinterillä. Arinakattilat voidaan jakaa yläpalokattiloihin ja alapalokattiloihin. Kattila on tässä tapauksessa alapalokattila vähempien päästöjen ja jatkuvuuden takia. Kattilaan voidaan siis lisätä polttoainetta vaikuttamatta oleellisesti palamisvyöhykkeen olosuhteisiin. Alapalokattila tarvitsee kuitenkin hyvän sekundääri-ilman sekoittimen, sillä polttoainekerroksen läpi tuotu ilmamäärä on melko pieni. (Raiko et al. 2002, s. 478-479)

### 5.2.2 Epäsuora prosessi

Epäsuoralla lämmitysprosessilla voidaan ymmärtää kaksi erilaista biopolttoaineen polttomahdollisuutta. Ensinnäkin voidaan suunnitella palamistila, yleensä arina, joka polttaa käytetyn polttoaineen tehokkaasti. Poltossa syntyneet raskaat, haitalliset partikkelit poistetaan systeemistä kattilan yhteydessä olevan syklonin avustuksella. Savukaasut ohjautuvat syklonissa kierteiseen liikkeeseen, jonka synnyttämän suuren keskipakoisvoiman vaikutuksesta raskaat hiukkaset ohjautuvat pois virtauksesta ja puhdistunut savukaasu jatkaa savukaasukanavaan. Järjestelmään tuotu kiertoaine, ilma, paineistetaan ensin kompressorissa, minkä jälkeen paineistettu ilma johdetaan kuumilla savukaasuilla lämmitettäväksi lämmönsiirtimeen. Kuuma ja paineistettu ilma johdetaan mikroturbiiniin, jossa se luovuttaa lämpöenergiansa sähköenergian tuottamiseksi. Turbiinista poistuva ilma on vielä lämmintä, joten sitä voidaan vielä hyödyntää primääripiirin toiminnassa kattilan palamisilmana. Tämä järjestely on esitetty kuvassa 6.



**Kuva 6.** Ulkoisesti lämmitetty kaasuturbiiniprosessi (Kautz. The externally-fired...2006. s.3)

Toinen mahdollisuus on tehdä polttoaineesta kaasumaista ja polttaa se perinteisillä kaasupolttimilla. Kaasutus mahdollistaa mikroturbiinilta tulevien kuumien kaasujen hyödyntämisen polttoaineen kuivaamisessa, lämmittämisessä ja kaasuttamisessa. Täten saadaan hyödynnettyä prosessin hukkalämpöä ja parannettua hyötysuhdetta. Myös itse palaminen saadaan tehokkaammaksi, sillä kaasumainen polttoaine saadaan levitettyä helpommin suurelle pinta-alalle, mikä lisää lämmönsiirron tehokkuutta palamisessa. Haasteina tässä mallissa on kuitenkin polttoaineen epäpuhtaus poltettaessa ja polttoteknisten näkökulmien optimointi, toisin sanoen tehon maksimointi ja päästöjen minimointi. Polttoaineen kaasutuksen kannattavuus pienessä mittakaavassa, 10...100 kW, on kuitenkin kyseenalaista ja epäsuoralla menetelmällä arinapoltto on selvästi suositumpi vaihtoehto yksinkertaisuutensa ja tehokkuutensa ansiosta.

Tässä työssä käsitellyt prosessit hyödyntävät kuumaa ilmaa ja savukaasuja tehokkaasti parantaen kokonaisprosessin hyötysuhdetta. Mikroturbiinisysteemistä poistuva kuuma ilma tai savukaasu voidaan ohjata palamisilman lämmittämiseen. Epäsuorassa poltossa turbiinisysteemistä saadaan vain puhdasta ilmaa suhteellisen korkeassa lämpötilassa, joten tämä kannattaa ohjata kattilaan palamisilmaksi. Tällöin säästytään palamisilman erilliseltä esilämmittämiseltä, prosessi yksinkertaistuu ja sen kokonaishyötysuhde kasvaa. Erikoistilanteessa näitä kuumia kaasuja voidaan hyödyntää myös kaasuttimessa kiinteän polttoaineen kaasuttamisessa, sillä tämä reaktio vaatii ilman lisäksi paljon prosessilämpöä. Vastaavanlainen epäsuora kiertoaineen lämmitys on mahdollista toteuttaa myös hyödyntämällä jätelämpöä muista prosesseista. Esimerkiksi teollisuuden prosessin yhteyteen sijoitettu lämmöntalteenottojärjestelmä saattaa olla taloudellisesti kannattava ratkaisu. Tällaiseen järjestelmään soveltuvan lämmöntalteenottokattilan toimintaa on selitetty tarkemmin kohdassa ”6.2 Turbiinin savukaasujen hyödyntäminen”. (Kautz. The externally-fired...2006. s.3)

Biomassaa polttavaan EFGT- laitokseen on mahdollista asentaa myös kierto-ilmakuivain, jonka avulla pakokaasuista saadaan lisähyötyä kuivaamalla sen avulla prosessiin syötettävää polttoainetta. Tällöin polttoaineen kosteudelle asetetut kriteerit ovat löyhempiä.

Taulukosta 6 nähdään tyypilliset toiminta-arvot EFGT-prosessin kompressorille, turbiinille ja lämmönsiirtimelle.

**Taulukko 6:** EFGT-prosessin tyypillisiä toiminta-arvoja(Cocco et al. 2006. s. 4)

Compressor air mass flow, kg/s	0.75
Compressor polytropic efficiency (%)	80
Turbine polytropic efficiency (%)	85
BF pressure drop, % of inlet press.	5
BF combustion efficiency (%)	95
$\Delta p$ at HTHE hot side, % of inlet press.	1.5
$\Delta p$ at HTHE cold side	3.0
$\Delta T_{\text{MIN}}$ of HTHE, °C	100
Mech. losses and aux. cons., % of $P$	3

Vastaavasti taulukossa 7 on vertailtu kolmen, teholuokaltaan toisistaan eroavan EFGT-prosessin toiminta-arvoja yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa. Vertailemalla taulukon arvoja huomataan kuinka lämpötilan nostaminen parantaa selkeästi laitoksen kokonaishyötysuhdetta. Esimerkkitapauksissa turbiinin jälkeen on sijoitettu lämmönsiirrin, jonka avulla paisuneen kiertoaineen sisältämä lämpöenergia on saatu kerättyä osittain talteen. Toisaalta, kuten perinteisissäkin voimalaitoksissa, savukaasujen poistolämpötila on korkeahko, mikä tarjoaa mahdollisuuksia biopolttoaineen kuivaamiseen. Tämä parantaisi kokonaishyötysuhdetta, sillä hukkalämpö saataisiin käytettyä hyväksi kuivaamisessa ja lisäksi kuiva polttoaine sopii paremmin voimantuotantoon.

**Taulukko 7:** EFGT-prosessien vertailua. (Cocco et al. 2006. s. 10)

	EF800	EF1000	EF1200
Air mass flow (kg/s)	0.75	0.75	0.75
Pressure ratio	3.25	3.75	4.50
Fuel mass flow (kg/s)	0.021	0.027	0.034
Thermal input (kW)	321.5	404.8	508.2
Air by-pass ratio (%)	6.3	7.3	8.7
Exhaust flow (kg/s)	0.771	0.777	0.784
Exhaust temp. (°C)	283.8	317.5	360.3
Exhaust heat (kW)	211.5	240.9	278.6
Power output (kW)	72.4	116.0	169.1
Net efficiency (%)	22.5	28.7	33.3
Hot water heat (kW)	126.4	153.8	188.2
Flue gas temp. (°C)	120	120	120
CHP efficiency (%)	61.8	66.7	70.3

## **5.3 Edut**

### **5.3.1 Suora menetelmä**

Suoran prosessin selvänä etuna on prosessin yksinkertaisuus verrattuna epäsuoraan. Yksinkertaisuus heijastuu laitoksen käyttökustannuksiin ja huollontarpeeseen. Lisäksi mikäli käytetty polttoaine on biokaasua, tuloksena on hyvin pitkälti perinteistä kaasuturbiiniprosessin kaltainen systeemi. Tuttu tekniikka sekä polttoaineen ominaisuudet takaavat hyvän käytettävyyden energiantuotannossa.

### **5.3.2 Epäsuora menetelmä**

Epäsuoraa polttomenetelmää käytettäessä saavutetaan monia etuja kuten kalliista kaasutusyhteemistä luopuminen. Kaasutus aiheuttaa myös suuria häviöitä kiertosysteemin hyötysuhteeseen eikä myöskään järjestelmän suuri koko aiheuta etuja. Toisena etuna on mahdollisuus polttaa polttokammiossa hyvin erilaisia polttoaineita ja valita halvimmat ja parhaiten saatavilla olevat polttoaineet. Lisäksi kuuman ilman kierrättäminen polttokammioon tai polttoaineen kuivaamiseen parantavat prosessin tehokkuutta ja toimintaolosuhteita. Muissa polttomenetelmissä joudutaan esikäsittelemään polttoaine ja näin ollen epäsuora polttomenetelmä on juuri ideaalinen biopolttoaineille. Koska kiertävä ilma on puhdasta, valmistuskustannukset tippuvat ja turbiinin elinikä kasvaa. (Ferreira et al. 2001. s. 3).

## **5.4 Haitat**

### **5.4.1 Suora menetelmä**

Biomassojen kaasuttaminen on niin uusi asia, ettei tutkimuksia ole juurikaan tehty kaasujen vaikutuksista turbiiniin. Kuitenkin suorat prosessit vaatisivat kaasun puhdistuksen, jos käytetään biomassaa. Suurin syy tähän on käytetyn aineen epäpuhtauksissa, jotka siirtyvät polttilasta turbiiniin ja muihin komponentteihin.

Suoralla menetelmällä turbiinin siivet voivat vahingoittua, jos käytetään likaisia biopolttoaineita ja tällöin tarvitaan savukaasujen puhdistusmenetelmä kaasuttimesta tulevien savukaasujen käsittelyyn.



Erityisesti alkalit ja suolat voivat aiheuttaa vakavia vaurioita turbiinin siivistöille korroosion ja eroosion muodossa. Partikkelit saattavat myös sulaa turbiinin siivistöihin ja asettaa turbiinin epätasapainoon. Tältä voidaan yrittää välttyä esimerkiksi jäähdyttämällä savukaasuja 500...600 °C:een, mistä tosin seuraa järjestelmän monimutkaistuminen ja kallistuminen. Yksi vaihtoehto on suodattaa savukaasuja, mutta suodatin aiheuttaa paineen alenemista, pienentää hyötysuhdetta ja lisää huoltokustannuksia.

Polttoaineen puhtaus korostuu erityisesti suorassa prosessissa, jossa savukaasut pyörittävät turbiinia. Tästä syystä suoraan menetelmään valitaan polttoaineita, jotka ovat käytännössä täysin puhtaita. (Syred et al. 2004. s. 2381-2382)

Taulukossa 8 on esitetty turvalliset rajat kaasun sisältämille epäpuhtauksille.

**Taulukko 8:** Raja-arvot savukaasujen epäpuhtauksille turbiinissa [Syred et al. 2004. s. 2382]

<i>Environmental</i>	
NO <sub>x</sub>	Less than 50 mg NO <sub>2</sub> /MJ
SO <sub>x</sub>	Less than 25 mg S/MJ
Dust	Less than 10 mg/m <sup>3</sup>
<i>Gas turbine</i>	
Alkali metals	Less than 0.1 ppm (w)
Dust	Less than 2.5 ppm (w)

Näiden rajojen takia mikroturbiinisysteemiin tulee lisäkuluja erityisesti huollon ja suodatuksen takia. Lisäksi laitoksesta tulee erinäisten suodattimien takia monimutkaisempi ja siten entistä hankalampi käsitellä.

#### 5.4.2 Epäsuora menetelmä

Epäsuoralla menetelmällä tuhkapitoisia polttoaineita poltettaessa arinakattilan alaosassa tulipesän seinämät voivat kuonaantua ja likaantua. Tämä tarkoittaa, että kattilan pinnoille sulaa tuhkaa ja törmää kiinteitä tuhkapartikkeleita muodostaen kerroksia. Likakerrosten kasvaminen voidaan välttää säännöllisellä nuohouksella. Kuitenkaan arinakattilasta ei pääse suuria määriä tuhkahiukkasia savukaasujen mukana lämmönvaihtimelle, joten lämmönläpäisykerroin ei juuri

huonone. Kun vielä oletetaan, että poltettava biopolttoaine on täysin puhdasta, ei ongelmia päästöjen käsittelyssä synny. (Raiko, 2002 s.275, 285)

Huonona puolena epäsuorassa prosessissa on sen ytimessä oleva lämmönsiirrin, jonka suunnittelu ja valmistus on hankalaa. Tästä seuraa suuria investointikuluja. Lämmönsiirtimen ominaispiirteistä kerrotaan lisää seuraavassa kappaleessa.

## **6. APULAITTEET**

Toimiakseen tehokkaasti sekä suora että epäsuora prosessi tarvitsevat erilaisia lämmönsiirtimiä. Epäsuorassa prosessissa kahden piirin välillä oleva lämmönsiirrin on yksi prosessin tärkeimmistä komponenteista ja vastaavasti lämmön talteenottoa varten suunniteltu lämmönsiirrin tai lämmöntalteenottokattila maksimoi prosessista saatavan hyödyn.

### **6.1 HTHX**

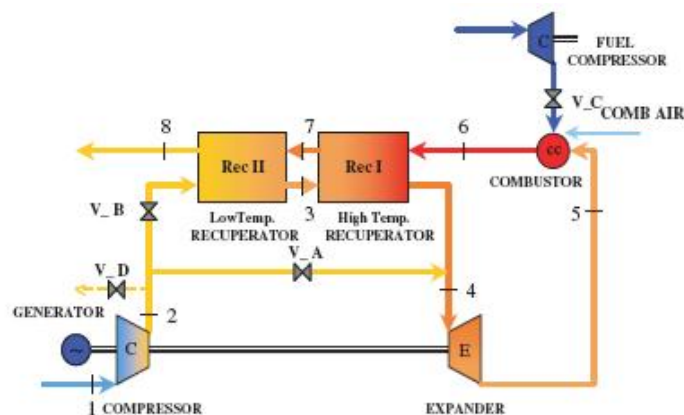
Yksi epäsuoran menetelmän tärkeimmistä komponenteista on lämmönsiirrin, johon liittyy myös prosessin suurimmat ongelmat. Lämmönsiirtimen suurten tehovaatimusten takia ongelmaksi muodostuu laitteen koko sekä materiaalikysymykset. Materiaalin tulee kestää tehokkaimmissa prosesseissa erittäin suuria lämpötiloja,  $T > 1300$  K, mikä asettaa haasteita sekä laitteen suunnittelulle että käytetylle materiaalille. Tavallisten terästen lujuusominaisuudet ja lämmönkestävyydet ovat näillä rajoilla, joten prosessin optimoimiseksi joudutaan pohtimaan keraamisten materiaalien käyttöä. Nämä aineet ovat kuitenkin vielä kalliita tavallisiin teräksiin verrattuina ja niiden kehitys ei ole edennyt vielä riittävän pitkälle, jotta niitä voitaisiin soveltaa useammassa teknillisissä sovellutuksissa. (Ferreira et al. 2001. s. 3)

Prosessin lämmönsiirrin on erittäin tärkeässä roolissa ulkoisesti lämmitetyissä kaasuturbiini-systeemeissä, joissa kaasuturbiinille menevä kiertoaine lämmitetään lämmönsiirtimessä kompressorin jälkeen ennen turbiinia. Täten turbiinin sisäänmenolämpötila, TIT, riippuu erittäin paljon lämmityslaitteiston lisäksi käytettävästä lämmönsiirtimestä. Useissa tutkimuksissa on todettu kuinka laitteiston teho ja hyötysuhde kasvavat suhteessa turbiinin sisäänmenolämpötilan nousuun.

Tässä asiassa ratkaisevaksi kysymykseksi nousee lämmönsiirtimen ja tulipesän lämpörasitus. Vaikka termodynaamisesti olisi parasta saada lämpötilat mahdollisimman korkeiksi molemmissa edellä mainituissa kohteissa, niin käytännössä lämpötilaa, ja siten myös saatavaa tehoa ja hyötysuhdetta, joudutaan rajoittamaan materiaalikestävyyden takia. Nikkelipohjaisten metalliseosten varaan rakennetuilla lämmönsiirtimillä voidaan saavuttaa arviolta 800...825°C lämpötiloja, mikä ei anna valmiuksia tehokkaalle termodynaamiselle toiminnalle. Kehittyneet ODS-seokset kestävät maksimissaan lämpötiloja 950...1100 °C. Tämän hetken kestävimät materiaalit ovat kuitenkin keraamisia, piikarbidiseoksia, joiden kehityksen uskotaan mahdollistavan 1300 °C:n lämpötilat prosessissa. Tämä taso on jo riittävä tehokkaille sovellutuksille, mutta materiaali on vielä verrattain kallista ja harvinaista (Anheden. 2000. s.44).

Lämpörasitusta voidaan pienentää asettamalla epäsuoraan prosessiin toinen lämmönsiirrin, jolloin yksittäisen lämmönsiirtimen suunnittelu ja valmistus helpottuvat huomattavasti. Toisaalta tällaisen järjestelyn haittapuolena ovat kohonneet investointikustannukset toisen lämmönsiirtimen hankkimisen takia. Uusi laite sijoitettaisiin ensimmäisen lämmönsiirtimen perään ilmapuolen kompressorin ja turbiinin väliin (Traverso et al. 2006, s. 3). Järjestely on esitetty kuvassa 7. Kuvan korkealämpölämmönsiirrin, Rec I, on erikoisvalmisteinen, suuriin lämpötiloihin soveltuva laite ja matalalämpölämmönsiirrin, Rec II, puolestaan perinteinen lämmönsiirrin.

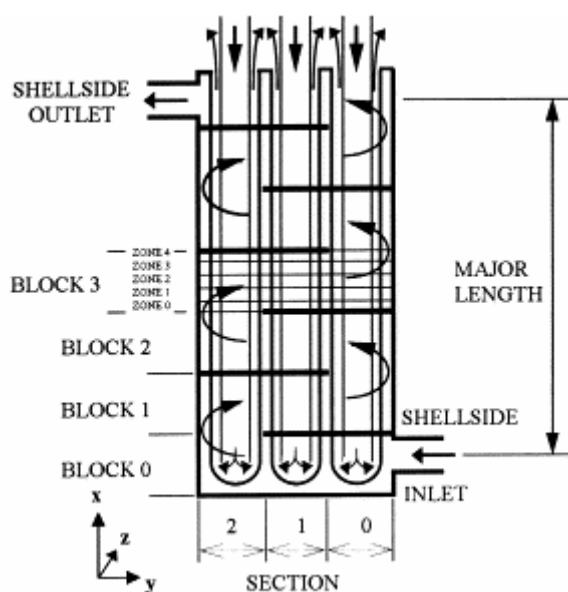
**Kuva 7.** Kahden lämmönsiirtimen, ulkoisesti lämmitetty prosessi (Traverso et al. 2006, s. 3)



Lämmönsiirto-ominaisuudet korostuvat entisestään prosessissa, jossa turbiinille menevää paineistettua ilmaa lämmitetään kuumen puolen savukaasuilla. Tällöin lämmönsiirtimen sekä

kuumalla että kylmällä puolella on kaasumaista ainetta, joilla ei ole kovin suotuisia lämmönsiirto-ominaisuuksia; lämmönsiirtimestä tulee erittäin kookas sekä siten myös kallis. Hintaan vaikuttaa materiaalikustannukset, hitsaus- sekä muut valmistuskustannukset.

Kuvasta 8 nähdään periaatteellinen kuvaus kaasu-kaasu-lämmönsiirtimestä. Kyseessä on putkilämmönsiirrin, joka toimii vastavirtaperiaatteella lämmönsiirtymisen tehostamiseksi. Kuuma savukaasu virtaa laitteeseen sisään koko lämmönsiirtimen pinta-alan kattavaan putkistoon, jossa se luovuttaa lämpönsä kylmällä puolella virtaavalle ilmalle. Ilma liikkuu kylmällä puolella siten, että se on suorassa kosketuksessa kuumaan putkistoon näin tehostaen lämmönsiirtoa ilman, että itse kiertoaineet kuitenkin sekoittuisivat. Haittapuolena laitteella on virtauksessa syntyvät painehäviöt, jotka ovat luokkaa 1,5 %. Lisäksi kaasumaisten aineiden lämmönsiirto-ominaisuudet rajoittavat tehokasta lämmönsiirtoa aineiden välillä. (Jolly et al.. 1998. s.5)



**Kuva 8:** Kaasu-kaasu-lämmönsiirtimen perusmalli korkeisiin lämpötiloihin (Jolly et al.. 1998. s.5)

Epäsuorassa poltossa kattilasta poistuvan savukaasun energiaa ei saada kokonaisuudessaan otettua talteen, sillä HT-lämmönsiirrin on haasteellista suunnitella riittävän tehokkaaksi, jotta sillä voitaisiin lämmittää tehokkaasti paineistettua ilmaa kuumalla kaasulla. Tämän seurauksena polttoaineen lämpötehoa ei saada otettua talteen ilman erillistä lämmönsiirrintä. Kokonaisprosessin tehostamiseksi savukaasuille voi tehdä toisen lämmönsiirtopiirin, jossa yhä verrattain kuumat kaasut luovuttavat lämpöä kaukolämpöpiiriin tai muuhun soveltuvaan lämpönieluun. Ottamalla

lämpöä talteen myös varsinaisen mikroturbiinipiirin jälkeen saadaan parannettua kokonaishyötysuhdetta ja siten myös tehtyä voimalaitoksesta entistä kannattavampi taloudellisesti. Pienkäytössä tämä on erittäin tärkeää, jotta edellä kuvatun mikroturbiiniprosessi olisi taloudellisesti järkevä vaihtoehto muihin energiantuotantomenetelmiin verrattuna.

Mikäli kaasuturbiinin kierto on suljettu, voidaan ilman lisäksi harkita myös muita kiertoaineita kuten heliumia, tyypeä sekä hiilidioksidia. (Anheden, 2000. s. 47). Tällöin lämmönsiirtimen suunnittelu saattaa helpottua, sillä prosessissa voidaan soveltaa myös kiertoainetta, jonka ominaislämpökapasiteetti on ilman vastaavaa arvoa parempi.

## **6.2 Turbiinin savukaasujen hyödyntäminen**

Turbiinista ulostulevien kaasujen lämpötila on vielä erittäin korkea (noin 500 °C), jolloin kaasua kannattaa hyödyntää höyryn tuottamiseen. Näin ollen epäsuoran polton vaatiman, korkeisiin lämpötiloihin sopivan kaasukaasu-lämmönsiirtimen lisäksi prosessiin voidaan lisätä turbiinin kuumia savukaasuja hyödyntävä syöttöveden esilämmitin eli ekonomaiseri. Turbiinilta tulevia kuumia savukaasuja voidaan siis hyödyntää lämmittämällä niillä kaukolämpöpiirin syöttövettä. Tällä tavalla savukaasujen lämpötila saadaan alhaisemmaksi jopa 250 °C:ksi. Näin saadaan hyötysuhdetta nostettua ja kannattavuutta parannettua. Usein lämmönsiirtoa parannetaan vielä rivoituksen avulla. (Huhtinen et al 1994, s 180)

## **7. SUURNOPEUSTEKNIikka**

Tämän työn laitteet, kuten kompressorit, generaattori ja turbiinit, ovat erittäin pieniä verrattuina konventionaalisiin laitteisiin. Käytetyt laitteet pyörivät pienen kokonsa ansiosta erittäin nopeasti, noin 100000 kier/min. Akselin eli suurnopeusroottorin laakerit ovat öljyttömiä laakereita kuten kaasulaakereita, magneettilaakereita tai käsiteltävällä nesteellä (tolueeni, vesi) voideltuja. Mikroturbiinisysteemin tapauksessa käytössä on siis turbiini, kompressori ja generaattori, joka muuttaa mekaanisen energian sähköenergiaksi. Esimerkiksi Capstonen mikroturbiinin kahden akselilla olevan ilmalaakerin voitelusta huolehtii metallipintojen väliin puhallettu ohut ilmakerros.

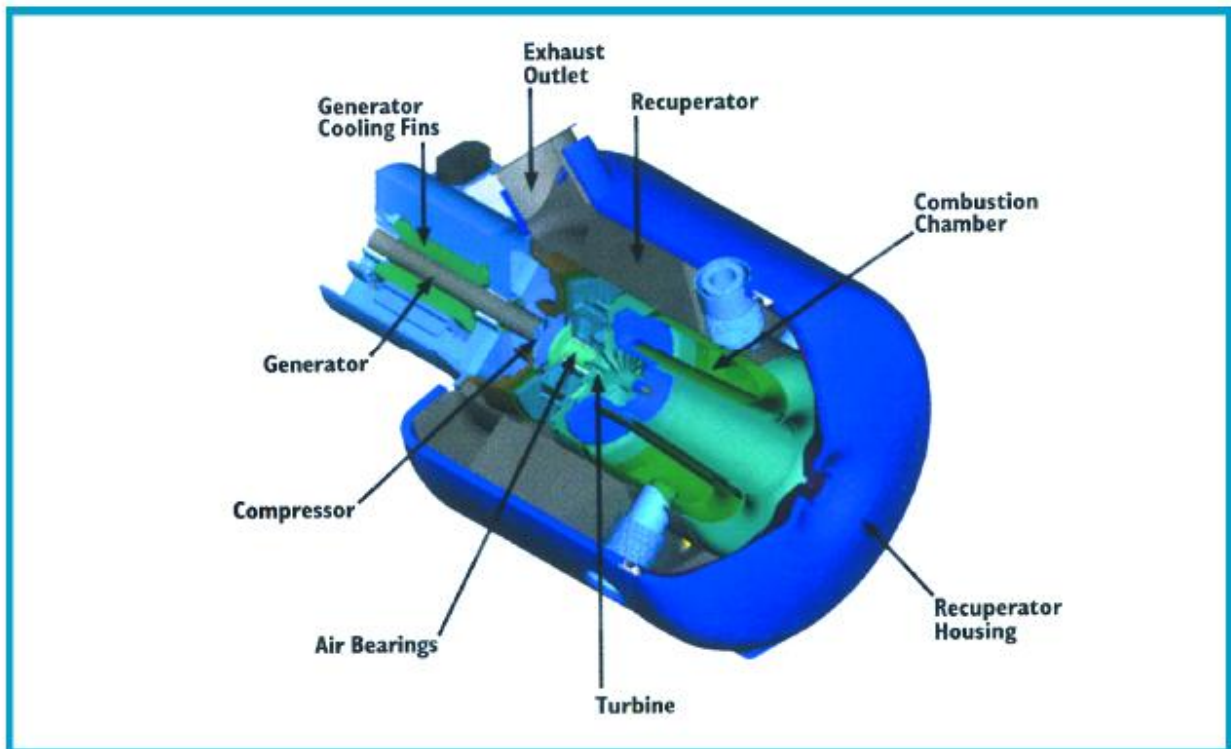
Jotta saavutettaisiin suuri energiatiheys sekä fluidissa että pyörivässä sähkölaitteessa, tarvitaan suuri pyörimisnopeus. Tämän takia suurnopeudella pyörivällä laitteella keskipakovoimasta aiheutuva rasitus on suuri. Tavallisesti roottorin nopeus pakotetaan useisiin satoihin metreihin sekunnissa suuren taajuuseron avulla. Mikrotekniikan materiaalit eivät ole kuitenkaan vielä tarpeeksi kestäviä maksimitaajuuseron aiheuttamalle nopeudelle. Kuitenkin verrattuna makromateriaaleihin mikromateriaalit ovat kestävämpiä, joten ne voivat saavuttaa suuren nopeuden rikkoutumatta. Suurnopeus myös vaatii matalakitkaiset laakerit, sillä kuutiomainen tilavuus on riippuvainen neliömäisen pinta-alan mittasuhteista. Tämä tarkoittaa, että pinta-ala roottorin rasitusalueella on huomattavan suuri pienillä mittasuhteilla ja näin ollen pienien laakereiden täytyy kestää suuria kuormia. Alustava tutkimus tällä alueella on kuitenkin melko lupaavaa. (Koskelainen.2008)

## 7.1 Tekniikka

Mikroturbiini on yhdistetty samalle kahden laakerin varassa toimivalle akselille ahtimen ja generaattorin kanssa. Mikroturbiinin asennus-, huolto- ja kunnossapitokustannukset ovat alhaisemmat vaikkakin sen sähköntuotantohyötysuhde on vielä alhainen ottomootoriin nähden. Myös alhaiset päästöt, vähäinen tilan tarve ja vähäinen melu ovat mikroturbiinin etuja. Ääni on siis korkeataajuista, jolloin se on helppo eristää.(Malkamäki. 2004.)

Mikroturbiinit voivat toimia ilman verkkoa tai rinnan verkon kanssa, jolloin verkon kaatuessa tapahtuu automaattinen katkaisu ja siirtyminen oman piirin syöttöön ja kuorman valvontaan. Näin ollen mikroturbiini ei tarvitse virtaa muilta lähteiltä, joten se on paljon luotettavampi kuin yhteisistä virtalähteistä riippuvaisia olevat komponentit. Se tarvitsee kuitenkin käynnistykseen käynnistäjän, esimerkiksi akun, jonka avulla turbiini käynnistyy ja saa riittävään nopeuden, jolla se pystyy siirtämään generaattorille energiaa. Biokaasua käyttävät turbiinien käynnistyminen kestää kuitenkin noin 30 minuuttia, joten ne tarvitsevat käynnistykseen akun lisäksi generaattorin. (Laaksonen. 2004, s.33)

Kuvassa 9 on esitetty Capstonen mikroturbiinin rakenne tarkemmassa kuvassa. Kuvasta nähdään, että turbiini, kompressorin ja generaattorin ovat samalla akselilla. Lisäksi kuvasta selkenee kuinka laitteen lämmönsiirtopinnat ovat sijoittuneet sekä laakereiden, koteloiden sekä polttokammion sijainti.



Kuva 9. Capstonen mikroturbiinin rakenne (Capstone)

### 7.1.1 Ongelmia

Mikroturbiinia käynnistettäessä ja systeemiä lämmitettäessä täytyy pienentää mahdollisimman paljon lämmönsiirtimen rakenteeseen syntyvää lämpöjännitystä. Tämä tarkoittaa, että turbiini tulee ajaa ylös riittävän hitaasti. Pakokaasuista ei kuitenkaan biokaasuja poltettaessa aiheudu ongelmia, koska tutkittavassa prosessissa käytettävä polttoaine on verrattain puhdasta. Puristuksen kasvu on taas aiheuttanut ongelmia, sillä paineen kasvu ja nopeat vaihtelut voivat vahingoittaa vakavasti lämmönsiirintä. ( Traverso et al. 2006. s.2)

Mikroturbiineissa on huomattu suuri vastapaine turbiinin ulostulossa, mikä johtuu muun muassa lämmönsiirtimelle aiheutuvasta vastuksesta. Vastapaineen merkitys riippuu käyttötoiminnon kunnosta ja lämmönvaihtimista ja –siirtimistä. Koska vastapaine on huomattava, eikä kiertoaine siis paisu loppuun asti turbiinissa, turbiinin tehokkuus vähenee. (Labinov et al. 2002. s. 6)

### 7.1.2 Vaihtoehtoiset menetelmät

Wilson TurboPowerin suunnittelema matalanopeuksinen mikroturbiini eroaa suurnopeus-tekniikkaan perustuvasta mikroturbiinista seuraavassa mainituilla tavoilla:

Wilsonin tehokas lämmönvaihdin ja tasokas mikroturbiinin rakenne yhdistämällä saavutettaisiin suuri hyötysuhde. Tällä tekniikalla odotetaan saavutettavan halvempaa ja matalammat päästöt tuottavaa sähköä jakeluasemille sekä paljon energiaa kuluttaville teollisille ja kaupallisille sovelluksille.

Keraamisia siipiä käytettäessä matalanopeuksisessa turbiinissa sallittaisiin suurempi sisääntulolämpötila ja suorituskyky, jolloin hyötysuhde kasvaisi. Tämä matalalämpötilainen ja matalapaineinen malli muihin vaihtoehtoisiin mikroturbiineihin nähden vähentää siipien rasitusta ja lisää turbiinin elinikää.

Lämmönvaihtimen tehokkuuden avulla saavutettu matalampi painetaso sallii pienemmän nopeuden keraamisen roottorin siiville. Koska lämmönvaihdin keraamisen sisuksensa ansiosta siirtää tehokkaammin lämpöä ja näin sallii suuremmat käyttölämpötilat, se voi luovuttaa enemmän lämpöä sisääntuloilman esilämmitykseen. Tehokkuutta ja hyötysuhdetta nostettaessa käytetään Wilsonin Mikroturbiineissa kolmea vaihetta tyypillisen yhden vaiheen sijaan. Tällä tekniikalla saavutettaisiin sähkön tuotannossa 50%:n hyötysuhde ja yhdistetyssä tuotannossa kasvu 90 prosenttiin on mahdollista. (Wilson Turbo Power. 2008)

### 7.2 Mikroturbiinit

Mikroturbiineilla tarkoitetaan määritelmän mukaan teholtaan 25-250 kW olevia pieniä kaasuturbiineita (kuva 9), jotka nykyisin ovat yleisesti radiaaliturbiineja. Capstone, joka on suurin valmistaja maailmalla, valmistaa 30,60 ja 200 kW tehoisia mikroturbiineja. Euroopassa laitteita valmistaa Greenenvironment- ja Virossa Is TeamWork As -yritys. Mikroturbiinien suurena etuna on pitkä huolto- ja kuluvien osien vaihtoväli, 40 000 h, ja ensimmäinen huolto vaaditaan vasta 8000 tunnin, eli käytännössä yhden vuoden, jälkeen. Mikroturbiinien käyttö on myös tehokasta, eikä mekaanisia häviöitä juuri synny.



Tällä hetkellä mikroturbiinit eivät ole vielä suosittuja vaihtoehtoja Suomessa voimantuotannossa, sillä maassa toimii ainoastaan kaksi mikroturbiinilaitosta, yksi Imatralla kaatopaikalla ja yksi Espoossa Otaniemessä. On toki olemassa useita tutkimuslaitoksia maailmanlaajuisesti, joissa tutkitaan eri prosessien ominaisuuksia ja toimivuutta käytännössä. Mikroturbiinilla toimiva biokaasulaitos on kuitenkin käyttökustannuksiltaan huomattavasti polttomoottorikäyttöistä laitosta edullisempi, ja siten tulevaisuudessa tekniikka yleistyne selvästi. (Ylönen. 2003)

Mikroturbiinien yleistymisen näkyy erityisesti pienikokoisten, alle 50 kW, maakaasua polttoaineena käyttävien järjestelmien, kohdalla. Yleistymisen jouduttajana pidetään mikroturbiinien pientä kokoa, korkeaa pyörimisnopeutta ja integroitua rakennetta. Kaupallinen taso on saavutettu suurnopeussähkökoneen ja huoltovapaiden laakereiden avulla.

Tehokkuuden parantamiseksi mikroturbiineja kytketään rinnan, jolloin yksittäisiä yksiköitä voidaan sammuttaa tai käynnistää verkon kuorman ja energiantarpeen mukaan. Tällöin kierroksia ei tarvitse pudottaa tai sähköä ajaa hukkaan. Tämä lisää myös varmuutta prosessiin, ja esimerkiksi sairaalat käyttävät useasta mikroturbiinista koostuvaa energiajärjestelmää takaamaan sähkönsaantinsa. (Malkamäki. 2004.)

Taulukossa 9 on esitetty Turbec T100 mikroturbiinin toiminta-arvoja. Prosessissa käytetään polttoaineena maakaasua, joten biokäytössä arvot olisivat erilaiset polttoaineen pienemmän lämpöarvon takia. Huomionarvoista on kompressorin vaatima teho suhteessa turbiinin tehoon.

**Taulukko 9.** Turbec T100 mikroturbiinin toiminta-arvot, epäsuora prosessi (Koskelainen. 2008)

Nettosähköteho	100	kW
Lämmöntuotanto	333	kJ/s
Turbiinin teho	282	kW
Kompressorin teho	159	kW
Nettohyötysuhde	30	%
Polttoaine	Maakaasu	
Poistokaasun lämpötila	650	°C
Ilman lämpötila kompressorin jälkeen	214	°C

Kaasun lämpötila turbiinin sisäänmenossa	950	°C
Kaasun lämpötila rekuperaattorin jälkeen	270	°C
Ilman massavirta	0,7833	kg/s
Maakaasun virta	0,0067	kg/s
Poistokaasun massavirta	0,79	kg/s
Painesuhde	4,5	
Kompressorin hyötysuhde	76,80	%
Turbiinin hyötysuhde	82,61	%
Rekuperattorin lämmönsiirtopinta-ala	164	m <sup>2</sup>

Taulukossa 10 on puolestaan vertailtu toiminta-arvoja pienillä ja suuremmilla mikroturbiineilla.

**Taulukko 10.** Arvoja Mikroturbiinille (Koskelainen. 2008)

	<b>25-250 kW</b>	<b>&gt; 1000 kW</b>
Sähköhyötysuhde (%)	15-25	25-40
Lämpöhyötysuhde (%)	50-60	40-45
Kokonaishyötysuhde (%)	75-85	80-85
Lämmöntuotto (°C) *	85-100, höyry	85-100, höyry
Huoltoväli (h)	20000-30000	20000-40000
Käytettävyys (%)	-	92

\*) Turbiinista lähtevän kaasun lämpötila 450-600 °C

Arvot ovat saatu tutkimalla sähkön ja lämmön yhteistuotantoa varten suunniteltua mikroturbiinijärjestelmää. Tämän ansiosta prosessin kokonaishyötysuhde on korkea. Laitteiden pitkä huoltoväli on yksinkertaisen rakenteen ansiota.

Mikroturbiinia ei kannata käyttää vajaalla kuormalla, sillä sen hyötysuhde ja paine-ero laskevat huomattavasti kuten taulukossa 11 näkyy. Hään pitoisuus on suurimmillaan keskisuurilla kuormilla, hiilidioksidin osuus pienenee hieman tehoa laskettaessa ja typpeä sekä typpiyhdisteitä syntyy eniten

pienimmillä kuormilla. Lämpötilaero pienenee tehoa pudotettaessa kuten myös pyörimisnopeus. (Labinov et al. 2002. s.8)

**Taulukko 11.** 30 kW mikroturbiini eri kuormilla (Labinov et al. 2002 s.9)

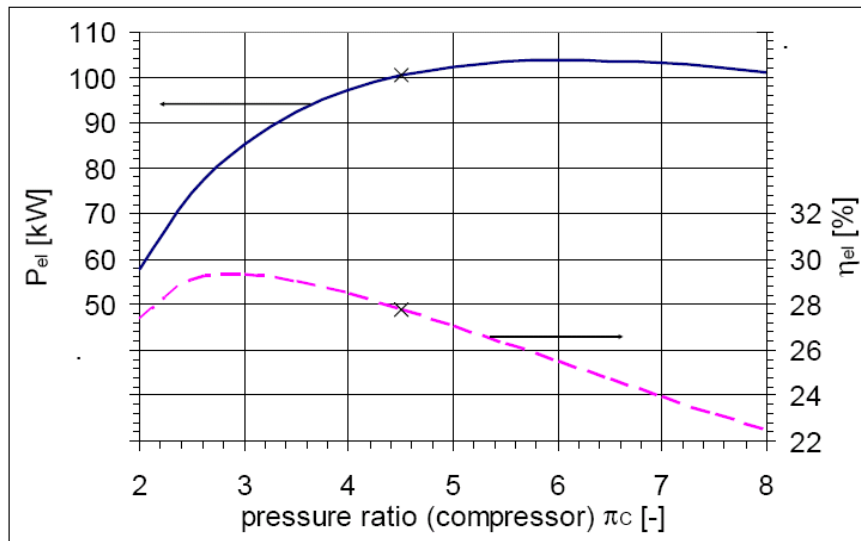
**Table 1. Capstone 30-kW microturbine with damper fully open**

Power demand setting (W)	Power output (W)	Efficiency (HHV)*	T <sub>air inlet</sub> (°F)	T <sub>exhaust</sub> (°F)	Engine speed (RPM)	ΔP (in. wc)	NO (ppm)	NO <sub>x</sub> (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	O <sub>2</sub> (%)	Voltage phases A, B, C (V)
30000	27678 ± 135	0.2313 ± 0.0011	27.6 ± 1.2	494.4 ± 0.5	88980 ± 183	0.34 ± 0.09	0	0	1.4	16	18.5	289, 288, 288
25000	24963 ± 87	0.2265 ± 0.0008	29.3 ± 0.9	484.0 ± 0.4	86048 ± 135	0.28 ± 0.07	0	0	1.4	33	18.6	289, 288, 288
20000	19987 ± 110	0.2178 ± 0.0012	29.2 ± 0.9	457.9 ± 0.6	80377 ± 131	0.23 ± 0.07	0	0	1.3	130	18.7	287, 286, 285
20000	20037 ± 97	0.2172 ± 0.0011	33.7 ± 0.5	463.0 ± 0.3	81264 ± 60	0.22 ± 0.05	0	0	1.3	127	18.7	289, 287, 287
15000	15040 ± 86	0.2044 ± 0.0012	35.4 ± 0.7	437.3 ± 0.4	75076 ± 69	0.16 ± 0.05	24	24	1.2	10	18.9	287, 286, 285
10000	9994 ± 71	0.1798 ± 0.0013	35.4 ± 0.8	407.7 ± 0.5	67461 ± 87	0.11 ± 0.04	19	19	1.1	17	19.1	286, 285, 284

\*Efficiency is based on natural gas higher heating value.

### 7.3 Suurnopeuskompressorit

Suurnopeuskompressorit ovat radiaalikompressoreja, joiden tarvitsema teho saadaan turbiinin liike-energiasta. Turbiini pyörii puolestaan kompressorissa puristetun ja lämmönsiirtimessä tai polttokammiossa lämmitetyn ilman avulla. Kompressorit puristaa ilman melko matalaan paineeseen, 2-8 bariin kuten kuvasta 10 näkyy. Parhain hyötysuhde mikroturbiinilla on vajaassa neljässä barissa. Kuitenkin kun sekä teho että hyötysuhde huomioidaan, todetaan parhaaksi käyttötilaksi 4,5 baaria. Ilma saapuu turbiiniin yleensä 650-900 °C:ssa riippuen siitä onko systeemissä rekuperaattoria.



**Kuva 10.** Turbec T100 mikroturbiinia vastaavan koneen toiminta-arvot eri painesuhteilla. (Koskelainen, 2008)

Suuren nopeuden vuoksi kompressorissa käytetään magneettilaakereita, jolloin etunäytäkompressoreihin nähden on järjestelmän öljyttömyys ja siten yksinkertaisempi rakenne.

Sekä suora että epäsuora menetelmä vaativat toimiakseen kompressorin palamisilman puristamiseksi riittävän korkealle tasolle. Korkea painesuhde mikroturbiinisysteemissä parantaa prosessin kokonaishyötysuhdetta tiettyyn pisteeseen saakka sekä itse palamista polttokammiossa. Kuten perinteisessä kaasuturbiinissa, myös mikrojärjestelmissä kompressorin akselille turbiiniin ja generaattorin kanssa. Kuvassa 9 on kuvattu perinteinen, yksinkertaistettu kaasuturbiinisysteemi. Laitteiden ollessa samalla akselilla generaattoria ja kompressoria pyöritetään turbiiniin liike-energialla, joka syntyy lämmönsiirtimessä tai polttokammiossa lämmitetyn ja kompressorilla tuotetun paineilman luovuttaessa energiansa turbiiniin siivistöille. Kompressorin materiaaleina voi käyttää esimerkiksi alumiinia tai titaniumia, sillä kompressorin akselit eivät vaadi yhtä suurta kuumuudenkestävyyttä, kuin esimerkiksi turbiini, turbiinin siivistö, lämmönsiirrin tai polttokammio. Näille on parempi valita keraaminen materiaali, jolla on suuri lämmönkestävyys. (Lymberopoulos. 2004)

Koska tässä työssä käsiteltävät voimalaitokset ovat verrattain pieniä, kompressoreiden ja muiden apulaitteiden sähköntarve korostuu entisestään. Mikäli omakäyttöhyötysuhde pienenee liikaa, prosessista saatava hyöty pienenee ja tällöin hankkeen kannattavuus heikkenee. Tämän takia apulaitteiden suunnitteluun tulee kiinnittää erityistä huomiota.

Paineistetuissa prosesseissa vaaditaan kompressori, jotta saavutettaisiin haluttu paine. Tämä kuitenkin edellyttää tehokasta kompressorisysteemiä, mikä puolestaan lisää selvästi laitoksen investointikustannuksia ja sähkönkulutusta. Tämän takia paineistettua kaasutusta ei juurikaan sovelleta pienissä voimalaitosprosesseissa, käytännössä jokainen pienen mittakaavan kaasutuslaitos käyttää ilmanpaineista kaasutinta.

#### **7.4 Laakerit**

Laakereiden merkitys on mikrojärjestelmissä suuressa arvossa suurien kuormien takia ja tutkimalla laakereiden toimintaa yritetään löytää sopivin käyttötarkoitukseen. Yleisesti suurnopeustekniikassa laitteen roottorissa käytetään öljyttömiä laakereita yksinkertaisuuden takia. Kuitenkin käyttämällä mikroturbiineissa öljyttyjä laakereita on tutkimuksissa saatu pyörimisnopeudeksi 1,4 miljoonaa kierrosta minuutissa. (Gas Turbine Laboratory)

Mikroturbiinien käyttöä tutkivan MIT:n kaasuturbiinilaboratorion ja mikrojärjestelmien teknologian laboratorion demonstraation perusteella halkaisijaltaan 4,2 mm piivalmisteinen roottori on saatu pyörimään keskeytyksittä suurnopeudella käyttämällä öljyttyjä laakereita. Nämä turbiinit saavuttavat nopeuden 300 m/s vastaten pyörimisnopeutta 1,4 miljoonaa kierrosta minuutissa. Näillä arvoilla turbiini saavuttaa lähes 5 W tehon ja yli 4000 MW/m<sup>3</sup> energiatihedden., joka on yli kaksinkertainen määrä nykyiseen lentokoneturbiinitekniikkaan nähden. Energiatiheyden suuruudesta on hyötyä mittasuhteita pienennettäessä. Tavoitteena on saada selville laakereiden ominaisuuksien stabiilius, jotta saataisiin aikaiseksi omavarainen energiantuotanto. Tutkimus pyrkii lisäksi tasaiseen tarkkuuteen ja yhdenmukaisuuteen prosessissa. Tarkoituksena on parantaa valmistustarkkuutta ja yhtäläisyyttä, jotta roottorin epätasaisuus vähenisi. Tämän tekniikan uskotaan tarjoavan asennuskaavan suureen energiatihedden MEMS-laitteille(Micro-Electro-Mechanical System) kuten pumpuille, kompressoreille, lämpökoneille ja kylmäkoneille. (Gas Turbine Laboratory)

## 7.5 Generaattori

Yleisesti vaihteistolla on jouduttu vähentämään nopeus 3600 kierrokseen minuutissa, jotta generaattori voi tuottaa siitä tehoa. Mikroturbiineilla ei kuitenkaan tarvita vaihteistoa, vaan niissä on muuntaja samalla akselilla turbiinin, kompressorin ja generaattorin kanssa. Tämä lisää tehokkuutta, sillä mikroturbiinille tyypillistä suurta kierrosnopeutta ei tarvitse pudottaa ja yksinkertaisen rakenteen vuoksi myös valmistuskustannukset pienenevät. (Laaksonen. 2004. s.33)

Mikroturbiinien korkean kierrosnopeuden takia generaattorin tuottama sähköteho on taajuusmuuttajalla ensin tasasuunnattava ja sitten vaihtosuunnattava verkkotaajuiseksi. On myös mahdollista kiinnittää tahtigeneraattorit suoraan verkkoon, jos nopeus on kunnolla säädelty. Kuitenkaan tätä vaihtoehtoa ei yleisesti käytetä mikroturbiineille. Kaikilla generaattoreilla täytyy aina olla verkkotaajuus ennen kuin generaattorin teho on käytettävissä. Yleensä tehokerroin on yksi, mutta nykyaikaisilla taajuusmuuttajilla on säätömahdollisuuksia. Energian tarve generaattorille eroaa kokoonpanosta riippuen. Mikroturbiini käynnistyy ja saavuttaa täyden tehonsa mallista riippuen joko minuuteissa tai noin puolessa tunnissa. Sopivilla ohjausjärjestelmillä varustettuna mikroturbiini pystyy säätämään tuotantoaan ja seuraamaan kuorman muutoksia. (Laaksonen. 2004. s.33)

## 7.6 Koelaitos

Ensimmäinen koelaitos Suomessa on asennettu ja käyttöön otettu syksyllä 2003 StoraEnson aloitteesta, Imatralla, Laurinniemen kaatopaikalla. Koelaitos on varustettu Capstone C30 Biogas mikroturbiinilla, biokaasukompressorilla, kuivaimilla, jäähdyttimillä ja vedenerottimilla. (Malkamäki. 2004)

Testiajot tällä kokoonpanolla ovat osoittaneet, että kaikki koetut häiriöt ovat johtuneet perinteisestä teknologiasta, eikä mikroturbiineihin liittyvästä uudesta teknologiasta. Myös mikroturbiinien etäohjaus on huomattavan kehittynyttä, sillä koelaitosta kyetään valvomaan täysin konttorista käsin. Mikroturbiiniteknologia vaikuttaa siis hyvin luotettavalta ja soveltuvalta teknologialta myös pohjoisiin olosuhteisiin. Kuitenkin oli huomattava, että koelaitoksen kaatopaikan pinta-ala (noin 5

hehtaaria) oli aivan liian pieni, ja se sisälsi hitaasti hajoavaa teollisuusjätettä ja kaasuntuottoa vaivasivat pakkaset. (Malkamäki. 2004)

Saadut tulokset ovat rohkaisevia tulevaisuuden kannalta. Kokemukset osoittavat, että biopolttoaineella ajettava voimalaitos voi toimia teknisesti järkevillä arvoilla. Onkin siis todennäköistä, että tulevaisuudessa biovoimalaitokset yleistyvät energiantuotannon yhtenä muotona.

## **7.7 Parannuksia**

Talbott's Heating on suunnitellut yhdessä Bowman Powerin kanssa parannuksia biomassan epäsuoraan polttoon tarkoitettuun kaasuturbiiniin. Systemi perustui Bowman TG50 50kW:n turbiiniin ja korkealämpöisellä lämmönsiirtimellä varustettuun a C3(S) kattilaan. Polttokammion kohdalla edellisten tutkimusten mukaan ongelmaksi selvisi suurilämpötilaisen ilman käsittely suurena määränä. Ongelman pohjalta tehtyjen laskelmien mukaan saatiin sopivat ilmakäytävien parametrit määritettyä ja näin polttoaineseos palamaan tehokkaasti. Biomassaa poltettaessa lämpötilat nousevat merkittävästi korkeammiksi ja näin tarvitaan paksut korkeatasoiset eristeet ja materiaalit lämpövuotojen estämiseksi.

Systemin säätöjärjestelmä arvioitiin uudelleen ja alettiin säätää palamisen painetta automatisoidulla järjestelmällä. Polttoaineensyöttöjärjestelmää päivitettiin lisäämällä turvallisuuspuoltaja ja valvontaa. Tuloksien mukaan kompressorin ja turbiinin sisäisiä putkistoja voidaan muokata siten, että painehäviöt vähenisivät ja kehittää sopiva polttokammio putkimutkia vähentämällä ja virtausreittiä parantamalla. Lämpörasitusta saadaan pienennettyä lisäämällä yksi ylimääräinen laajenemissauma rakenteeseen ja korvaamalla ilmajohdannaiset liitokset laipoilla, jotka sopivat vallitseviin lämpötiloihin ja paineisiin. Putkistot täytyy myös tarkastaa ja puhdistaa, jotta jätteet eivät päätyisi turbiinin sisälle.

Laturi lataisi käynnistämiseen tarvittavia akkuja käynnistysten välissä. Käynnistys kaasulla kestäisi enintään 2 minuuttia, mutta biomassalla noin 30 minuuttia. Biomassakäyttöiseen turbiiniin täytyisi siis lisätä generaattori huomioimaan pidentynyt käynnistysjakso. Tutkimuksesta selvisi myös, että generaattorin kotelon lämpötilat olivat korkeammat kuin kaasua käytettäessä, mikä johtuu

lisääntyneestä putkistopinta-alasta. Tämän tutkimuksen mukaan polttokammiossa biomassaa poltettaessa ei tarvita jäähdytystä alle 800 °C:ssa, vaan selvittää kestäville materiaaleilla ja päällysteillä.

Muutoksilla turbiiniprosessi saataisiin entistä tehokkaammaksi ja siten myös taloudellisemmaksi. Täten kehitys on tärkeää laitosmallin suosion kasvattamisessa. (Pritchard. 2005. s. 40)

## 8. TALOUDELLISUUS

Tässä työssä käsiteltävien energiantuotantosysteemien suuri kysymys taloudellisen kannattavuuden osalta on polttoaineen hankinta: mikäli biomassaa saadaan oman liiketoiminnan sivutuotteena, esimerkiksi metsätalouden hakkeena, niin prosessin taloudellisuus paranee huomattavasti verrattuna tilanteeseen, jossa polttoaine ostettaisiin muualta. Toinen ratkaiseva kysymys on tuotetaanko sähköä ja lämpöä vain omaan käyttöön vai myös ulkopuoliseen verkkoon, eli myyntiin. Mikäli sähkön hinta nousee entisestään, kalliiden laiteinvestointien riskitekijä pienenee selvästi, ja myös voimantuotannon kannattavuus paranee.

On laskettu, että 100 kilowatin ulkoisesti lämmitetyn mikroturbiinivoimalaitoksen takaisinmaksuaika olisi kolme vuotta (Pritchard. 2005. s. 40). Tähän on laskettu, että sähkö myytäisiin verkkoon ja biopolttoaine ostettaisiin maanviljelijöiltä. Polttoaineensaanti on siis turvattu tekemällä sopimus usean toimijan kanssa.

Kolmen vuoden takaisinmaksuajalla prosessi olisi järkevä ratkaisu. Laitoksen kokonaishyötysuhdetta voitaisiin kuitenkin parantaa selvästi jälkilämmöntalteenotolla, jonka avulla prosessin kokonaishyötysuhde saataisiin nostettua noin 25 prosentista 50 prosenttiin. Tämä lisäisi investointikustannuksia, mutta myös voittoja, mikäli alueella olisi kysyntää kaukolämmöntuotannolle. Toisaalta taulukon 10 lukujen pohjalta voidaan todeta, että kokonaishyötysuhde voi tietyissä tapauksissa yhteistuotannossa nousta jopa 85 prosenttiin. Hyötysuhteista ja käyttöarvoista on saatavilla hyvinkin erilaista tietoa, mikä selittyy tutkimuskohteen nuorella iällä.



Nykyisin mikroturbiinien kustannukset ovat noin 650 euroa/kW ja arviona vuodelle 2010 pidetään 200-300 euroa/kW. Noin puolet investointikustannuksista johtuu lämmön talteenotosta, sähkölaitteista, rakentamisesta ja asennuksesta ja loput itse kaasuturbiinista. 1 MW kaasuturbiinin käyttö- ja kunnossapitokustannukset ovat noin 1,0 c/kWh ja kustannukset suurenevat koon pienetessä. Käsitellyn noin 10 kW:n mikroturbiinin käyttö- ja kunnossapitokustannukset voisivat olla noin 2,0c/kWh. Edellä näkyy taulukoituna kaasuturbiinin kustannuksia(Taulukko 12), mutta täytyy huomata, että luvut on laskettu nimenomaan yhteistuotantovoimaloiden mukaan. Mikäli mikroturbiinien arvoja vertailee muihin saman kokoluokan tuotannolle ominaisiin tuotantomenetelmiin, voidaan todeta, että mikroturbiinit ovat kilpailukykyinen vaihtoehto pientuotantoon. Kannattavuus joudutaan arvioimaan uudelleen, mikäli energiantarve kasvaa paljon, sillä perinteiset polttomoottorit ovat tällä hetkellä paljon mikroturbiineja tehokkaampia. (Koskelainen. 2008)

**Taulukko 12:** Energiantuotannon vertailua eri menetelmillä (Koskelainen. 2008)

**Kiinteät ja muuttuvat kustannukset**

	Yksikkö- teho (kW) <sup>1</sup>	Sähkö- hyöty- suhde (%)	Lämpö- hyöty- suhde (%)	Käyttö- ikä (a) <sup>2</sup>	Huipun- käyttöaik a (h) <sup>3</sup>	Investointi (euro/kW) <sup>4</sup>	Tuotanto- kustannus (c/kWh) <sup>5</sup>
Aurinkolämpö	0,3...0,8	-	30...40	20	1000	800...1600	7...14
Lämpöpumput	4...45	-	60...75	20	3000	900...1800	4...8
Biomassakattilat	10...1000 0	-	70...90	20	1000/35 00	100...200	1...5
Kaasu- ja dieselmoottorit	3...10000	30...45	45...50	15	5000	450...1400	2,5...4
Mikroturbiinit	25...250	15...35	50...60	15	5000	1000...170 0	3...4
Stirling-moottorit	0,5...25	15...35	50...60	15	5000	1400...220 0	4...5
Höyrykoneet ja - turbiinit	0,5...1000 0	15...35	40...70	15	5000	1500...300 0	3...4

Lisäksi prosessien komponenttien hintaosuuksissa on suuria eroja. Taulukossa 13 on vertailtu järjestelmän suurimpien menoerien osuutta toisiinsa nähden. Kompressori, turbiini, polttokammio ja rekuperaattori muodostavat yhdessä yli puolet kuluista. Myös säätöyksikön hinta on selvä, mutta kotelon kuluihin kuluu yllättävän paljon pääomaa. Tämä selittyy kotelon lukuisilla sähkökytkennöillä sekä sen jäähdytysjärjestelmällä.

**Taulukko 13:** Pääkomponenttien osuudet kokonaiskustannuksista. (Lymeropoulos, 2004, s.8)

<b>Komponentti</b>	Kompressori ja turbiini	Poltto- kammio	Laakerit	Reku- peraattori	Generaattori	Säätö- yksikkö	Kotelo
<b>Osuus [%]</b>	14...17	9...12	3...4	21...24	7...9	15...18	23...26

Materiaalikysymyksiin liittyy myös prosessien kannattavuus: suoran prosessin materiaaliuongelmien takia epäsuora prosessi on vallannut markkinoita. Prosessien välille tulee eroa myös laiteinvestointien puolesta, sillä suora prosessi vaatii kalliin kaasuttimen hankkimista ja toistuvia puhdistuksia turbiinilla. Toisaalta epäsuoran menetelmän taloudellisena rasitteena on kalliin ja suunnittelun kannalta hankala lämmönsiirrin, jolla on suuri rooli prosessin tehokkuudessa.

## 9. JOHTOPÄÄTÖKSET

Biopolttoaineiden käyttö mikroturbiinirakenteissa on tulevaisuuden kannalta erittäin mielenkiintoinen tutkimus- ja kehityskohde. Uuden teknologian mukanaan tuomat haasteet ja mahdollisuudet mahdollistavat entistä tehokkaamman energiantuotannon yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon keinoin. Vaikkakin saatavat tehot ovat verrattain pieniä, niin mikroteknologialle on kysyntää laitteiston yksinkertaisuuden ja puhtauden takia. Lisäksi prosessin varmuus on houkutteleva tekijä sairaaloille ja vastaaville toimijoille, joille vakaan energiansaanti on kynnyskysymys.

Tulevaisuudessa suurimmat mielenkiinnonaiheet ovat materiaalikysymykset sekä lämmönsiirtimen suunnittelu- ja valmistusongelmat. Nämä kysymykset tulee ratkaista ennen kuin tekniikka yleistyy ja siitä tulee kannattavaa liiketoimintaa. Lisäksi tutkimusta tulee keskittää entisestään myös suorassa lämmityksessä polttoaineen kaasutukseen sekä epäsuoran menetelmän tapauksessa kaasutuksen sovellutukseen käytännön ja taloudellisten seikkojen kannalta.

Materiaalikysymysten lisäksi yksi tärkeimmistä kysymyksistä mikroturbiinilaitosten tulevaisuuden kannalta on sähkön hinnan kehitys, joka määrittelee lopulta kokonaisprosessin kannattavuuden. Päästökaupan vaikutusten kasvaessa biopolttoaineiden käyttö lisääntyy ja siten myös uusien, pienempien sovellusten suosio.

## LÄHTEET

Anheden, M. Analysis of Gas Turbine Systems for Sustainable Energy Conversion. 2000. Tukholma. KTH, Högskoletryckeriet. 71 sivua. ISSN 1104-3466.

Biomass Engineering. Development of a Micro-Turbine Plant to Run on Gasifier Producer Gas, Biomass Engineering Ltd.. Iso-Britannia. 2004. 101 sivua.

Cocco, D et al.. Performance evaluation of small size externally fired gas turbine (EFGT) power plants integrated with direct biomass dryers. Energy 31 (2006) 1459–1471. 13 sivua.

Euroopan komissio. Biofuel burning microturbines. Artigraf, Firenze, Italy. ISBN 88-89407-09-3

European commission. 2006. Innovation and technological development in energy. [verkkojulkaisu]. Saatavissa: [http://ec.europa.eu/energy/res/sectors/bioenergy\\_en.htm](http://ec.europa.eu/energy/res/sectors/bioenergy_en.htm). [päivitetty 12.3.2008]. [viitattu 15.04.2008]

Ferreira, S.B. et al. A Comparison of Different Gas Turbine Concepts Using Biomass Fuel. 2001. Turbo Expo. New Orleans. USA. 7 sivua.

Gas Turbine Laboratory and Microsystems Technology Laboratories. Demonstration of microfabricated high-speed turbine supported as gas bearings. Massachusetts Institute of Technology Cambridge. MA 02139

Huhtinen et al. Höyrykattilatekniikka. 6. painos. 2004. Helsinki. Edita Prima Oy. 379 sivua. ISBN 951-37-3360-2

Jolly, J.A. et al.. COHEX: a Computer Model for Solving the Thermal Energy Exchange in an Ultra High Temperature Heat Exchanger. Part A: Computational Theory. 1998. Applied Thermal Engineering 18 (1998) 1263-1276. 14 sivua.

Kautz, M.&Hansen, U. Simulation von extern gefeuerten Gasturbinen (EFGT-Cycle). Universität Rostock . 2006. 10 sivua.

Kautz, M.&Hansen, U. Applied Energy. Externally-Fired Gas- Turbine for decentralized use of biomass. University of Rostock. Applied Energy 84 (2007) 795–805. 2007. 11 sivua.

Koskelainen, L. Luentomateriaali, voimalaitosoppi. Lappeenranta. 2008.

Käyhkö, Tuija. 2003. Mikroturbiinit rynnistävät energian tuotantoon. [Verkkójulkaisu]. Tekniikka ja Talous 21.08.2003. saatavissa: <http://www.tekniikkatalous.fi/energia/article38426.ece>. [viitattu 20.02.2008]

Laaksonen, Hannu. 2004. Hajautetun tuotannon tilastollisuuden ja keskijänniteverkon aktiivisen jännitteensäädön huomioiminen verkostolaskennassa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere

Labinov, S. D. et al. Predictive Algorithms for Microturbine Performance for BCHP Systems. ASHRAE Transactions, v 108 Part 2, 2002. Honolulu, USA. 2002. ISSN: 0001-2505. 14 sivua.

Lehtimäki, Marjo. 1995. Biokaasulaitos eteläisellä pohjanmaalla. Diplomityö.Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Lappeenranta

Lymberopoulos N. 2004. Microturbines and their application in bio-energy. European Comission. [verkkójulkaisu]. [viitattu 17.04.2008]

Malkamäki, Matti. 2004. Seminaari Pietari. [Verkkójulkaisu]. Saatavissa: [www.jamk.fi/luva/tutkimus\\_ja\\_kehitys/materiaalia/mikro-chp-raportti\\_nro8.pdf](http://www.jamk.fi/luva/tutkimus_ja_kehitys/materiaalia/mikro-chp-raportti_nro8.pdf). [viitattu: 20.03.2008)

Nieminen, J., Kivelä, M.. Biomass CFB Gasifier Connected to a 350 MWa-I-I Steam Boiler Fired with Coal and Natural Gas--Thermie Demonstration Project in Lahti in Finland. Varkaus, Suomi. 1998. Biomass and Bioenergy Vol. 15, No. 3, pp. 251-257, 1998. 7 sivua.

Pritchard, D. Biomass Fuelled Indirect Fired Micro Turbine. 2005. Talbott's Heating Ltd. 54 sivua.

Raiko, Risto et al. Poltto ja palaminen. 2. painos. 2002. Jyväskylä. Teknillistieteelliset akatemit. 750 sivua. ISBN 951-666-604-3

Reed, T.B. et al., Biomass Gasification Principles and technologies. 1981. Energy Technology Review; no. 67. Park Ridge, New Jersey. Noyes Data Corporation. 401 sivua. ISBN 0-8155-0852-2.

Syred, C. et al. Cyclone gasifier and cyclone combustor for the use of biomass derived gas in the operation of a small gas turbine in cogeneration plants,. 2004. Fuel 83 (2004) 2381–2392. 12 sivua. Saatavissa [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

Traverso, A. et al.. Externally Fired Micro-Gas Turbine: Modelling and Experimental Performance. 2006. Applied Thermal Engineering. 7 sivua.

Tuomisto, Hanna. 2005. Biokaasun ja peltoenergian tuotannon ja käytön ympäristövaikutukset . [verkkajulkaisu]. Saatavissa:  
[http://wwwb.mmm.fi/julkaisut/tyoryhmuistiot/2006/siirto/trm2006\\_1\\_biokaasun%20ja%20peltoenergian%20tuotannon%20ja%20k%C3%A4yt%C3%B6n%20ymp%C3%A4rist%C3%B6vaikutukset.pdf](http://wwwb.mmm.fi/julkaisut/tyoryhmuistiot/2006/siirto/trm2006_1_biokaasun%20ja%20peltoenergian%20tuotannon%20ja%20k%C3%A4yt%C3%B6n%20ymp%C3%A4rist%C3%B6vaikutukset.pdf). [viitattu 08.04.2008]

Ylönen, Ulla. 2003. Stora Enso muuttaa oman metaanin sähköksi mikroturbiinilla. [Verkkajulkaisu]. Tekniikka ja Talous 06.11.2003. saatavissa:  
<http://www.tekniikkatalous.fi/energia/article22822.ece>. [viitattu: 20.02.2008]

Wilson Turbo Power. 2008. Wilson Microturbine. [Verkkajulkaisu]. saatavissa:  
[www.wilsonsurbopower.com/micro\\_overview.html](http://www.wilsonsurbopower.com/micro_overview.html). [viitattu 15.02.2008]