

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Pienet kaasuturbiinit hajautetussa energiantuotannossa

Small gas turbines in decentralized energy production

Työn tarkastaja: Ahti Jaatinen-Värri

Työn ohjaaja: Ahti Jaatinen-Värri

Lappeenranta 11.12.2019

Juhani Karjalainen

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Juhani Karjalainen

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Ahti Jaatinen-Värri

Kandidaatintyö 2019

Pienet kaasuturbiinit hajautetussa energiantuotannossa

27 numeroitua sivua, 7 kuvaa ja 1 taulukko

Hakusanat: hajautettu energiantuotanto, kaasuturbiini, mikroturbiini

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on selvittää pienten kaasuturbiinien rooli hajautetussa energiantuotannossa. Kaikki työssä käytetty aineisto on avoimesti saatavilla. Aluksi työssä käydään lyhyesti läpi hajautettu energiantuotanto pääpiirteittäin sekä siihen liittyviä tuotantomuotoja. Tämän jälkeen käsitellään lyhyesti kaasuturbiini käsitteenä ja sen toimintaperiaate sekä rakenne. Tämän jälkeen työssä käsitellään pieniä kaasuturbiineita eli mikroturbiineita, niiden rakennetta, toimintaperiaatetta, sovellus- ja kehityskohteita, etuja, haittoja sekä kustannuksia.

Mikroturbiinit ovat pieniä kaasuturbiineja, jotka polttavat kaasumaisia tai nestemäisiä polttoaineita ajaen generaattoria. Yleisin mikroturbiinin polttoaine on maakaasu. Tämän päivän mikroturbiiniteknologia on pitkälti lisävoimalaitteiden, turboahdinten ja autojen kaasuturbiinien kehitystyön lopputulosta, josta suuri osa tapahtui 1950-luvulla. Mikroturbiinit kykenevät polttamaan maakaasun lisäksi monia erilaisia polttoaineita ja sen modulaarisuus, mäntämootoreita alhaisemmat päästöt, liittämismahdollisuudet sekä korkea hyötysuhde sähkön- ja lämmön yhteistuotannossa tekevät siitä luotettavan ja varteenotettavan vaihtoehtoisen teknologian hajautetussa energiantuotannossa pienen teholuokan sovelluskohteissa.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	2
Sisällysluettelo	3
Lyhenneluettelo	4
1 Johdanto	5
2 Hajautettu energiantuotanto	6
2.1 Hajautetun energiantuotannon tuotantomuodot	7
3 Kaasuturbiini	9
3.1 Kaasuturbiinin rakenne ja toimintaperiaate	9
3.2 Brayton-prosessi	10
3.3 Mikroturbiini	12
3.3.1 Toimintaperiaate	12
3.3.2 Yksiakselinen mikroturbiini	13
3.3.3 Kaksiakselinen mikroturbiini	15
3.3.4 Polttoaine	16
4 Mikroturbiinien sovelluskohteet	18
4.1 Sähkön ja lämmön yhteistuotanto (CHP)	18
4.2 Luonnonvarojen hyödyntäminen	19
4.3 Aurinkovoima	19
4.4 Muut sovellukset	20
5 Edut ja haitat	22
6 Kustannukset	24
7 Johtopäätökset	25
8 Yhteenvedo	26
Lähdeluettelo	28

LYHENNELUETTELO

BTU British thermal unit

CHP Combined Heat and Power

EU Euroopan Unioni

kW Kilowatti

MW Megawatti

1 JOHDANTO

Tämän päivän energiantuotannossa on ajankohtaista uusiutuvien polttoaineiden käyttö, kasvihuonekaasujen vähentäminen ja resurssien hyödyntäminen mahdollisimman tehokkaasti. Perinteisesti keskitetyssä energiantuotannossa energia tuotetaan suurissa voimalaitoksissa, joista se siirretään verkon kautta kuluttajien saataville, välillä pitkienkin matkojen päähän. Keskitetyssä energiantuotannossa kuluttajat ovat passiivisessa roolissa energian vastaanottajina ja riippuvaisia ulkoisesta verkosta. Hajautetussa energiantuotannossa taas energiantuotanto tuodaan kulutuksen lähelle ja pyritään ensisijaisesti hyödyntämään paikallisia energianlähteitä kuten aurinko- ja tuulienergiaa, biopolttoaineita ja vesistöihin sitoutunutta energiaa. Paikallisia energianlähteitä käyttämällä edistetään omavaraisuutta ja sillä vältetään energian- ja polttoaineen siirtokustannuksia. Paikallisten energianlähteiden lisäksi hajautetussa energiantuotannossa käytetään uusiutuvia ja vähäpäästöisiä energianlähteitä sekä perinteisiä fossiilisia polttoaineita.

Pienen teholuokan kaasuturbiineja käytetään hajautetun energiantuotannon sovelluskohteissa, myös paikallisia energianlähteitä hyödyntäen. Näitä kyseisiä pieniä kaasuturbiineja kutsutaan myös mikroturbiineiksi. Tämän työn tarkoitus on selvittää, minkälainen rooli mikroturbiineilla on hajautetussa energiantuotannossa. Mikroturbiinien kokoluokalle ei ole tarkkaa määritelmää, mutta tässä työssä mikroturbiineita käsitellessä tarkoitetaan 30 – 350 kW kokoisia pieniä kaasuturbiineja. Työssä on kerrottu hajautetusta energiantuotannosta, kaasuturbiinista, mikroturbiinista ja sen eri sovellus- ja kehityskohteista, eduista ja haitoista sekä kustannuksista.

2 HAJAUTETTU ENERGIANTUOTANTO

Hajautetulla energiantuotannolla tarkoitetaan pienemmän kapasiteetin energiantuotantolaitosten sijoittamista lähelle energian kuluttajia. Se on luotettava ja tehokas vaihtoehto perinteiselle keskitetylle energiantuotannolle. Hajautettu energiantuotanto voi mahdollistaa yksittäisen rakennuksen omavaraisuuden sähkö-, lämpö- ja jäähdytysenergian suhteen. [Alanne&Saari, 2006]

Hajautettu energiantuotanto parantaa kokonaishyötysuhdetta, sillä polttoaineen kuljetus- ja energiansiirtomatkat lyhenevät. Hajautetussa energiantuotannossa tuontienergian tarve vähenee, jätteestä tehty energia vähentää jätteen kuljetuskustannuksia sekä liiketoimintamahdollisuudet kasvavat ja työpaikkojen määrä lisääntyy. Yhdistämällä useampi energiantuotantotapa hybridituotannoksi luodaan paikallisille tarpeille vahva energiantuotanto. Primäärienergian tehokas hyötykäyttö voidaan saavuttaa esimerkiksi siten, että toisen prosessin jäte-energia voi olla toisen prosessin energianlähde. [VTT, 2015]

World Alliance for Decentralized Energy määrittää hajautetuksi energiantuotannoksi kaiken loppukäyttökohteen läheisyydessä sijaitsevan sähköntuotannon tai CHP-tuotannon.

EU:n direktiivin mukaan hajautettuja uusiutuvaan energiaan liittyviä teknologioita ja varastointia kehitetään syrjimättömin edellytyksin ja vaikeuttamatta infrastruktuuri-investointien rahoitusta. [Euroopan unionin virallinen lehti, 2018]

2.1 Hajautetun energiantuotannon tuotantomuodot

Hajautetuissa energiajärjestelmissä voidaan käyttää lukuisia eri energiantuotantomuotoja, kuten uusiutuvaa energiaa, fossiilisia polttoaineita sekä energian varastointia. Monet teknologiat käyttävät uusiutuvia energianlähteitä. EU:n direktiivin mukaan uusiutuviin energianlähteisiin perustuvien energiamuotojen edistäminen on yksi unionin energiapolitiikan tavoitteista [Euroopan unionin virallinen lehti, 2018]. Uusiutuviin energianlähteisiin perustuviin hajautetun energian tuotantoyksiköihin kuuluvat esimerkiksi aurinko-, tuuli- ja vesivoima, biomassan hyödyntäminen sekä geoterminen lämpö, kun taas fossiilisiin polttoaineisiin perustuvat yksiköt sisältävät pääasiassa mäntämoottoreita ja mikroturbiineja. Energian varastointijärjestelmät, kuten akut, polttokennot, vauhtipyörät, pumpattu vesi, superkondensaattorit, vedyn tuotanto ja varastointi ovat myös osa hajautettua energiantuotantojärjestelmää. [Banshal 2017, 89]

Vaikka uusiutuvaan energiaan perustuvat hajautetut tuotantojärjestelmät ovat saaneet aikaisemmin paljon huomiota niiden ympäristöhyötyjen vuoksi, useimpien tekniikoiden puutteellinen toimituskelpoisuus on rajoittanut niiden leviämistä. [Banshal 2017, 89]

Taulukossa 1 on esitetty käytetyimpien hajautetun energiantuotannon teknologioiden teholuokkia.

Taulukko 1. Hajautetun energiantuotannon käytetyimpiä teknologioita ja niiden tyypillisiä teholuokkia. (Muokattu lähteestä Duláu et al. 2013, 688)

Teknologia	Tyypillinen saatavilla oleva teholuokka
Yhdistetyn syklin kaasuturbiini	35-400 MW
Polttomoottori	5 kW - 10 MW
Kaasuturbiini	1 - 250 MW
Mikroturbiini	30 kW - 350 kW
Polttokenno	1 kW - 5 MW
Energian varastointi	500 kW - 5 MW
Pieni hydro	1 - 100 MW
Mikro hydro	25 kW - 1 MW
Tuuliturbiini	200 W - 3 MW
Aurinkokennojärjestelmä	20 W - 100 kW
Biomassan kaasutus	100 kW - 20 MW
Geoterminen energia	5 - 100 MW
Aaltoenergia	100 kW - 5 MW

3 KAASUTURBIINI

Kaasuturbiini on lämpövoimakone, jolla tuotetaan sähköä ja lämpöä. Kaasuturbiini on löytänyt kasvavan alustan energiateollisuudessa viimeisen 60 vuoden aikana sekä yleishyödyllisten laitosten ja kauppalaitosten että petrokemian teollisuuden keskuudessa kaikkialla maailmassa. Sen kompaktius, pieni paino ja monipuolinen polttoaineen käyttö tekevät siitä luonnollisen voimalaitoksen myös avomerialustoille. Nykyään on olemassa kaasuturbiineja, jotka toimivat maakaasulla, dieselpolttoaineella, naftaanilla, metaanilla, raakaöljyllä, vähän BTU:ta sisältävillä kaasuilla, höyrystyneillä polttoöljyillä ja biomassakaasuilla.

Viimeisten 20 vuoden aikana kaasuturbiinitekniikka on kasvanut voimakkaasti. Kasvua on nopeuttanut materiaalitekniikan, uusien päällysteiden, uusien jäähdytysjärjestelmien ja yhdistetyn syklin voimalaitosten kasvu. [Boyce Meherewan P 2012]

Koska hajautettu energiantuotanto on hyvin paikkakohtaista, kustannukset vaihtelevat ja täten kaasuturbiinijärjestelmien asennuksen perusteet vaihtelevat. Hajautetun tuotannon kohteet vaihtelevat suurista pääkaupunkiseuduista Himalajan vuorijonojen rinteisiin. Sähköntuotannon taloudellisuus riippuu polttoainekustannuksista, käyttötehokkuudesta, ylläpitokustannuksista ja alkuperäisistä kustannuksista tässä järjestyksessä. Kohteen valinta riippuu ympäristönäkökohdista, kuten päästöistä, melusta, polttoaineen saatavuudesta, koosta ja painosta. [Boyce Meherewan P. 2012]

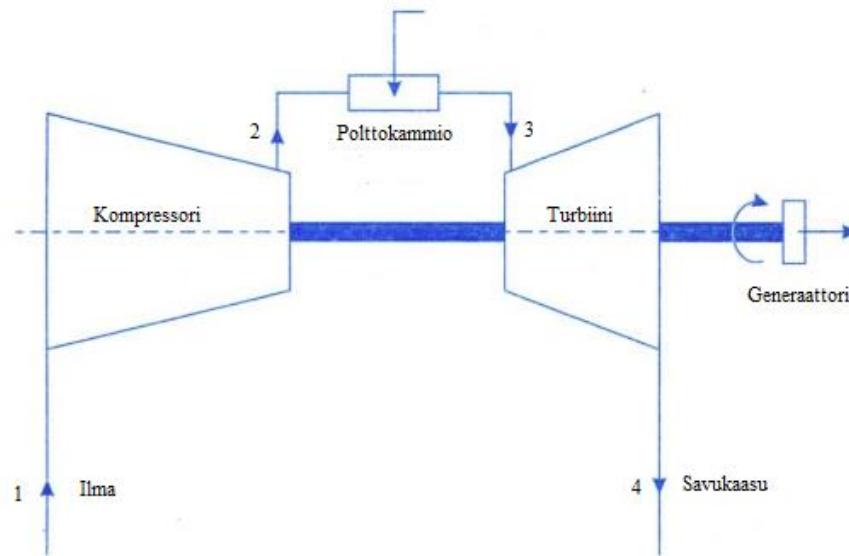
3.1 Kaasuturbiinin rakenne ja toimintaperiaate

Kaasuturbiini koostuu kolmesta pääkomponentista, jotka sijaitsevat samalla akselilla: kompressori, polttokammio ja turbiini. Kompressori voi olla joko aksiaalinen tai radiaalinen. Aksiaalikompressorit ovat yleisempiä sähköntuotannossa, koska niiden hyötysuhteet ovat korkeampia. Aksiaalikompressorit koostuvat useista roottorin ja staattorin sisältävistä vaiheista, joiden läpi ilma kulkee pyörimisakselin suunnan mukaisesti paineistuen vähitellen jokaisessa vaiheessa. Suhteellisen nopeuden hidastuminen pyörivissä siivissä ja staattoreiden diffuusio nostaa painetta. Vaikka lämpöä ei lisätä, ilman puristus aiheuttaa myös lämpötilan nousua. Polttoaine ja paineilma voidaan esisekoittaa tai paineilma viedä suoraan polttokammioon. Polttoaine-ilma-seos

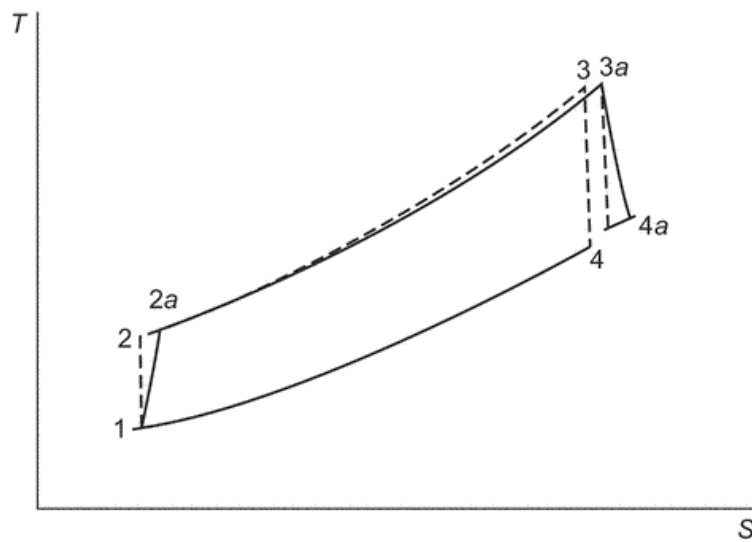
syttyy vakioaineolosuhteissa ja kuumat palamistuotteet johdetaan turbiinin läpi, missä ne laajenevat nopeasti ja pyörivät akselia. Turbiini koostuu vaiheista, joissa jokaisessa on rivi paikallaan olevia siipiä (tai suuttimia) laajentuvien kaasujen ohjaamiseksi, jota seuraa rivi liikkuvia siipiä. Akselin pyöräminen saa kompressorin imemään ilmaa sisään ja puristamaan enemmän ilmaa jatkuvan palamisen ylläpitämiseksi. Jäljellä oleva akseliteho käytetään sähköä tuottavan generaattorin käyttämiseen. Noin 55-65 prosenttia turbiinin tuottamasta tehosta käytetään kompressorin käyttämiseen. Kineettisen energian siirron optimoimiseksi palamiskaasuista akselin pyöräilyyn kaasuturbiineilla voi olla useita kompressoreita ja turbiinivaiheita. [Wärtsilä 2019]

3.2 Brayton-prosessi

Kaasuturbiinin kiertoprosessia kuvataan Brayton-prosessilla. Brayton-prosessi koostuu kahdesta isentrooppisesta ja kahdesta isobaarisesta vaiheesta. Kompressorissa tapahtuu työaineen eli ilman isentrooppinen puristus, jonka jälkeen työaineeseen tuodaan lämpöä vakioaineessa polttokammiossa (palaminen). Tämän jälkeen tapahtuu isentrooppinen paisunta turbiinissa. Paisunnan jälkeen työaineesta poistuu lämpöä vakioaineessa. Ideaalisen Brayton-prosessin termien hyötysuhde on vain painesuhteen funktio. Todellisessa kaasuturbiinin kiertoprosessissa puristus kompressorissa ja paisunta turbiinissa ovat häviöllisiä, sekä termien hyötysuhde riippuu lisäksi mm. imuilman lämpötilasta, kompressorin painesuhteesta, turbiinin tulolämpötilasta sekä kompressorin ja turbiinin isentrooppisista hyötysuhteista. Todellinen kaasuturbiini voi olla rakenteeltaan avoin tai suljettu. Avoimessa kierrossa savukaasut poistetaan ympäristöön paisunnan jälkeen, suljetussa ne ohjataan takaisin prosessiin käyttöön. Avoin kierto on esitetty kuvassa 1. Kuvassa 2 on esitetty sekä Brayton-prosessi että todellinen kaasuturbiinin kiertoprosessi. Brayton-prosessi on esitetty kuvassa katkoviivalla ja todellinen prosessi kokonaisella viivalla. Tilapisteet 12 kuvaavat puristusta kompressorissa, 23 palamista polttokammiossa, 34 paisuntaa turbiinissa ja 41 lämmönpoistoa työaineesta.



Kuva 1. Avoin kaasuturbiiniprosessi. [Muokattu lähteestä Rajput 2010, 1344].



Kuva 2. Ideallinen ja todellinen Brayton-prosessi esitettyinä lämpötilan ja entropian funktiona [Boyce Meherewan P, 2012].

3.3 Mikroturbiini

Mikroturbiinit ovat pieniä kaasuturbiineja, jotka polttavat kaasumaisia tai nestemäisiä polttoaineita ajaen generaattoria. Ne ovat olleet kaupallisesti saatavana yli kymmenen vuoden ajan. Tämän päivän mikroturbiinitekнологia on lisävoimalaitteiden, turboahdinten ja autojen kaasuturbiinien kehitystyön lopputulosta, josta suuri osa tapahtui 1950-luvulla. Mikroturbiinien kehitystä vauhditti suurten turboahdinten suunnittelun samankaltaisuus ja se loi perustan mikroturbiinien suunnittelulle ja tuotannolle. [EPA 2015, 1]

1990-luvulla useat yritykset kehittivät kilpailevia mikroturbiinituotteita, jotka tulivat tai suunnittelivat tulevansa markkinoille. Markkinoiden kypsyessä yritykset yhdistyivät, muuttivat nimiään tai jättäytyivät pois markkinoilta. Tämä markkinoiden kypsyminen ja vakautuminen johti kahteen mikroturbiinien päävalmistajaan, jotka ovat molemmat amerikkalaisia yrityksiä, Capstone Turbine Corporation ja FlexEnergy. [EPA 2015, 1] Capstone on kuitenkin suurin mikroturbiineja valmistava yritys maailmassa [European Comission 2015, 24]. Euroopassa kaksi suurinta mikroturbiinivalmistajaa ovat Turbec ja Bowman Power. [European Comission 2015,18]

Mikroturbiinit soveltuvat erinomaisesti hajautetun energiantuotannon sovelluksiin johtuen niiden joustavuusominaisuuksista liittämistekniikoissa sekä mahdollisuudesta kytkeä ne rinnakkain suurempia kuormia varten. Lisäksi mikroturbiinit kykenevät tarjoamaan tasaista ja luotettavaa tehoa sekä niillä on alhaisemmat päästöt mäntämootoreihin verrattuna. [EPA 2015, 1-2]

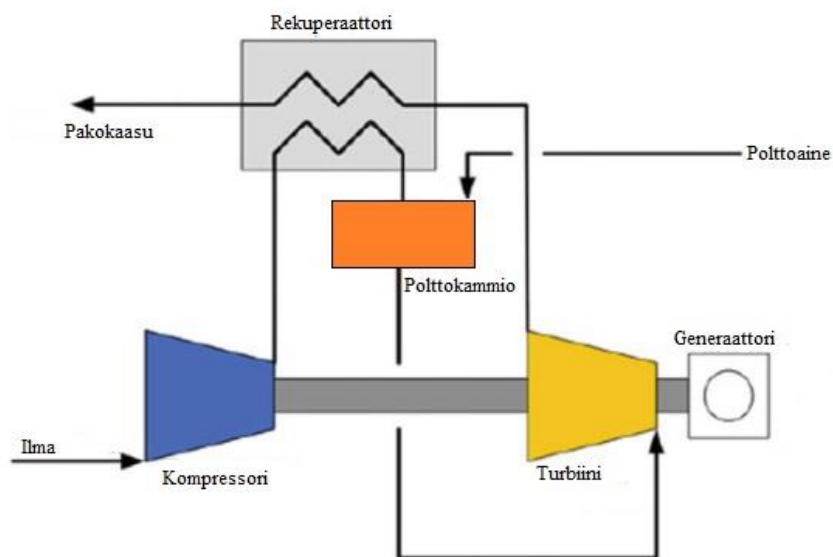
3.3.1 Toimintaperiaate

Mikroturbiinien toiminta perustuu Brayton-prosessiin ja sen pääkomponentit ovat samat kuin isoilla kaasuturbiineilla [EPA 2015, 2]. Useimmissa mikroturbiineissa on yksivaiheinen radiaalinen turbiini ja kompressori [Banshal 2017, 90]. Mikroturbiinit ovat kooltaan pienempiä ja niillä on tyypillisesti alhaisempi painesuhde kuin isoilla kaasuturbiineilla ja ne operoivat alhaisemmissa palamislämpötiloissa. Hyötysuhteen parantamiseksi mikroturbiineissa käytetään rekuperaattoria, jonka avulla pakokaasujen

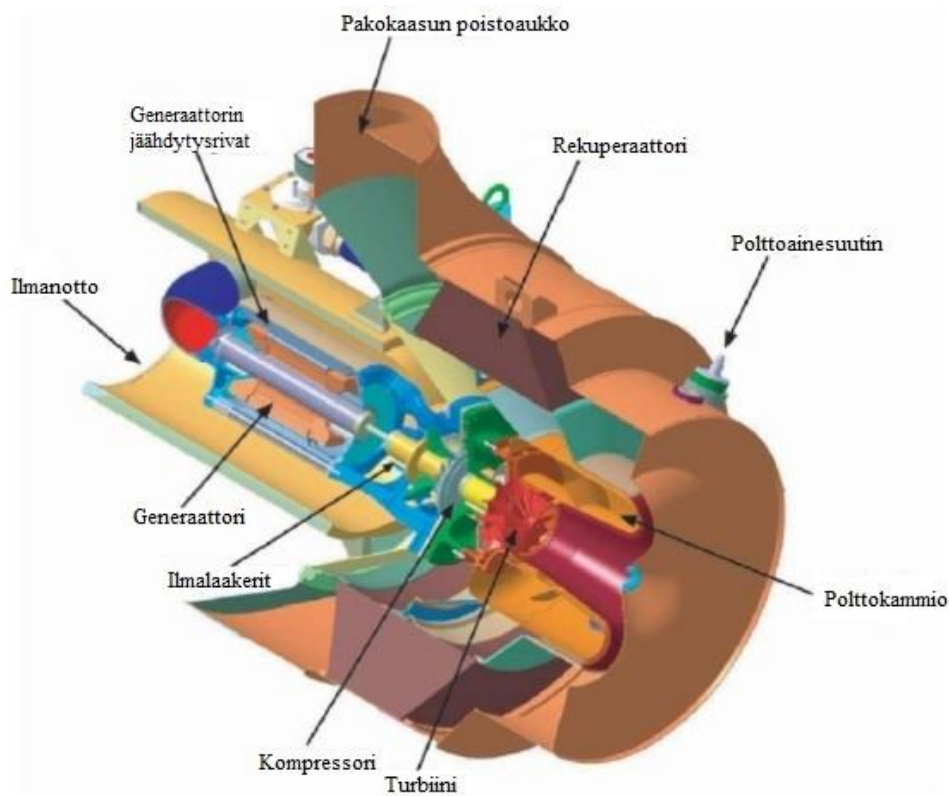
lämpöenergiaa hyödynnetään turbiinille menevien kaasujen lämmityksellä. [EPA 2015, 3]

3.3.2 Yksiakselinen mikroturbiini

Mikroturbiinit voidaan yleisesti luokitella akselien lukumäärän perusteella. Yksiakselinen mikroturbiini koostuu kompressorista, rekuperaattorista, polttokammioista, turbiinista ja generaattorista. Yksiakselinen mikroturbiini on helppo mutta kallis rakentaa. Kaavio yksiakselisesta mikroturbiinista on esitettyä kuvassa 3. [Banshal 2017, 90] Capstonen valmistaman yksiakselisen mikroturbiinin poikkileikkauspiirros on esitettyä kuvassa 4.



Kuva 3. Yksiakselinen mikroturbiini koostuu kompressorista, rekuperaattorista, polttokammioista, turbiinista ja generaattorista. [Muokattu lähteestä Banshal 2017, 90]



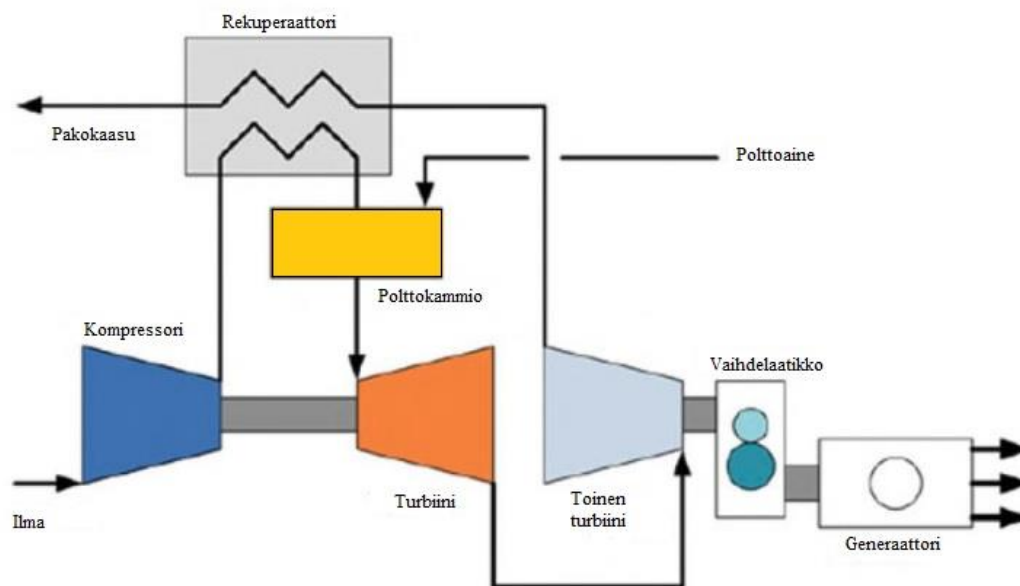
Kuva 4. Mikroturbiinin poikkileikkauspiirros. [Muokattu lähteestä EPA 2015, 5]

Kuten kaasuturbiinissakin, mikroturbiinissa ilma puristetaan kompressorissa korkeaan paineeseen. Korkeapaineinen ilma esilämmitetään rekuperaattorissa käyttämällä pakokaasuja. Korkeapaineinen ja lämmitetty ilma sekoitetaan polttoaineeseen polttokammiossa. Polttokammiossa syntyy palamisen seurauksena palamiskaasuja, jotka johdetaan turbiinille. Turbiini pyörittää generaattoria ja tuottaa sähköä. Yksiakselinen mikroturbiini pyörii korkeilla pyörimisnopeuksilla 50 000 – 120 000 kierrosta minuutissa. [Banshal 2017, 90-91] Korkeilla pyörimisnopeuksilla pyörivä akseli voidaan kytkeä joko korkeanopeuksiseen vaihtovirtageneraattoriin tai pyörimisnopeutta alentavaan vaihdelaatikkoon, johon on kytkettynä synkroninen generaattori. Korkeanopeuksinen vaihtovirtageneraattori tarvitsee taajuusmuuttajan synkronoimaan taajuuden sähköverkon mukaan joko 50 tai 60 Hz. Tätä ratkaisua käyttää Capstone. Flexenergy puolestaan käyttää vaihdelaatikkoa ja synkronista generaattoria. [EPA 2015, 3]

Jännitteentasaaja ja korkeanopeuksinen vaihtovirtageneraattori aiheuttavat yksiakseliselle mikroturbiinille korkeat investointikustannukset. Koska korkeanopeuksisia tasavirtageneraattoreita on helppo valmistaa, niitä voidaan myös käyttää yksinkertaisen invertterin kanssa tuottaen vaihtovirtasähköä. [Banshal 2017, 90-91]

3.3.3 Kaksiakselinen mikroturbiini

Kaksiakselisessa mikroturbiinissa kompressorin akseli erotetaan generaattorin akselista lisäämällä systeemiin toinen turbiini ja vaihdelaatikko. Ensimmäinen turbiini sijaitsee kompressorin kanssa samalla akselilla ja toinen turbiini generaattorin ja vaihdelaatikon kanssa samalla akselilla. Kaksiakselisen mikroturbiinin kaavio on esitettyä kuvassa 5. Ensimmäisen akselin pyörimisnopeus yksiakselisen mikroturbiinin tavoin on korkea, 50 000 – 120 000 kierrosta minuutissa. Toinen akseli, jossa generaattori on kytketty vaihdelaatikkoon, pyörii alhaisimmilla nopeuksilla 3000 – 3600 kierrosta minuutissa. Vaikka kaksivaiheinen mikroturbiini johtaa yleensä alhaisempiin investointikustannuksiin koska vältetään nopean generaattorin ja taajuusmuuntajan käyttö, lisäosien kuten toisen turbiinin ja akselin sekä vaihdelaatikon hankinta johtaa suurempiin ylläpitokustannuksiin. [Banshal 2017, 91-92] Vaihdelaatikon sijaan kaksiakselisessa mikroturbiinissa voidaan käyttää myös korkeanopeuksista vaihtovirtageneraattoria ja hoitaa verkkokytkeä taajuusmuuttajalla.



Kuva 3. Kaavio kaksivaiheisesta mikroturbiinista. [Muokattu lähteestä Banshal 2017, 91]

3.3.4 Polttoaine

Mikroturbiinit on suunniteltu käyttämään maakaasua pääpolttoaineenaan. Kuljetussovelluksiin suunnitellut sovellukset hyödyntävät tyypillisesti nestemäistä polttoainetta kuten metanolia. Ne pystyvät kuitenkin toimimaan monilla polttoaineilla kuten propanin ja butaanin nestekaasuseoksella, prosessoimattomalla luonnollisella kaasulla, biokaasulla, teollisuusjätekaasulla sekä valmistetulla kaasulla. [EPA 2015, 16] Vedystä mikroturbiinien polttoaineena on myös kiinnostuttu. Yhdysvaltojen patenti- ja tavaramerkkivirasto on myöntänyt tänä vuonna kaksi uutta patenttia mikroturbiinivalmistajalle Capstonelle. Patentit tukevat Capstonen aloitteita, jotka kohdistuvat useiden polttoaineiden käyttöönottoon. Toinen patenteista koskee useille polttoaineille soveltuvaa injektoria, jonka avulla olisi mahdollista polttaa vetyä ja vetyperäisiä polttoaineita mikroturbiineilla [Capstone Turbine Corporation 2019]. On myös tutkittu, että käytössä olevilla kaupallisilla mikroturbiineilla on teknillisesti mahdollista polttaa vetyä vain injektoria muokkaamalla [García-Conde 2014].

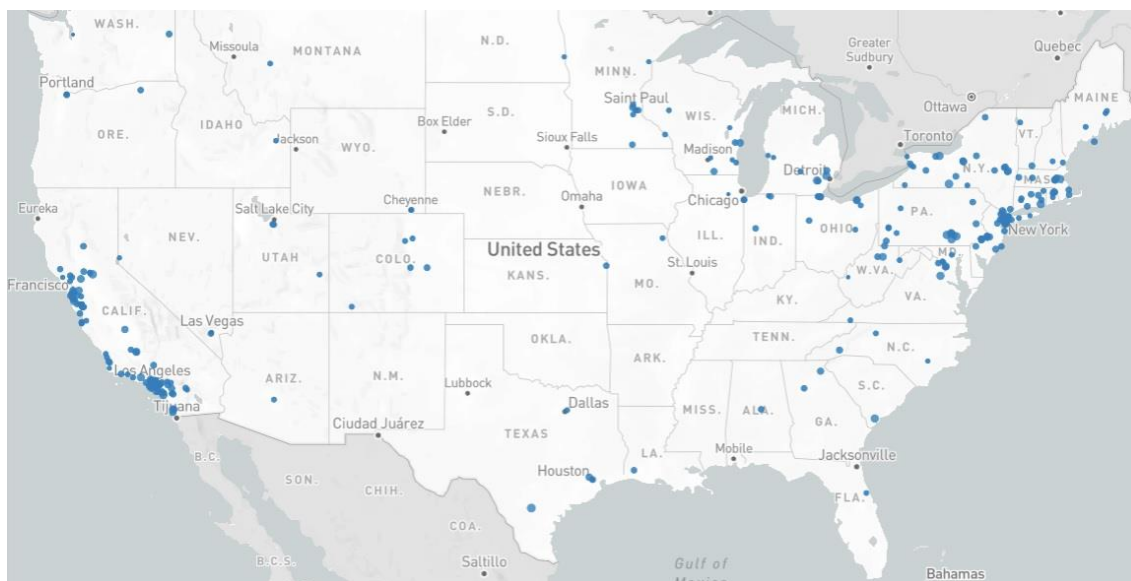
Joidenkin jättepolttoaineiden ainesosat aiheuttavat epäpuhtauksia. Poltossa halogeeni- ja rikkiyhdisteet muodostavat halogeenihappoja, rikkidioksidia, jotkut rikkitrioksidia ja jotkut jopa rikkihappoa. Hapot voivat myös syövyttää loppupään laitteita. Kiinteiden hiukkasten lukumäärä täytyy pitää alhaisena komponenttien korroosion ja eroosion

estämiseksi. Erilaisia polttoaineen pesu- ja pisaranerotus- ja suodatusvaiheita vaaditaan, jos polttoaineen epäpuhtauspitoisuudet ylittävät valmistajan ohjeet. Erityisesti kaatopaikkakaasu sisältää usein klooriyhdisteitä, rikkiyhdisteitä, orgaanisia happoja ja piiyhdisteitä mikä määrää polttoaineen esikäsittelyn. Erityinen huolenaihe jätevesien käsittelyssä ja kaatopaikkakäytössä on siloksaaniyhdisteiden hallinta. Siloksaanit ovat yleinen ihmisen aiheuttama orgaaninen yhdiste, jota käytetään monissa tuotteissa, ja lopulta ne päätyvät kaatopaikoille ja jätevesiin. Kun siloksaanit altistetaan korkeille lämpötiloille turbiinin poltto- ja pakokaasujen sisällä, ne muodostavat kovia piidioksidisaostumia, jotka voivat lopulta johtaa turbiinin rikkoutumiseen. [EPA 2015, 16]

4 MIKROTURBIINIEN SOVELLUSKOHTEET

4.1 Sähkön ja lämmön yhteistuotanto (CHP)

Mikroturbiinit soveltuvat hyvin käytettäväksi sähkön ja lämmön yhteistuotannossa, sillä pakokaasun lämpö voidaan ottaa talteen lämmöntalteenottokattilassa tai kuumia pakokaasuja voidaan käyttää suoraan. Yhdysvalloissa on käytössä yli 360 toimilaitosta, jotka käyttävät mikroturbiineja sähkön- ja lämmön yhteistuotannossa [U.S DOE 2016]. Nämä toimilaitokset ovat jakautuneet sijainniltaan siten, että suurin osa sijaitsee Kalifornian osavaltiossa ja New Yorkin alueella sekä Yhdysvaltojen koillisosassa ja loput tasaisesti jakautuneena ympäri Yhdysvaltoja. [U.S DOE 2019] Yhdysvalloissa käytössä olevien mikroturbiinien sijainnit on esitetty kuvassa 6.



Kuva 4. Mikroturbiinien CHP-sovelluskohteet Yhdysvalloissa sijaitsevat suurimmaksi osaksi Kalifornian osavaltiossa sekä Yhdysvaltojen koillisosassa. [Muokattu lähteestä U.S DOE 2019]

Tyypilliset maakaasukäyttöiset CHP-kohteet voidaan jakaa kaupallisiin, instituutionaalisiin ja teollisiin käyttökohteisiin. Kaupallisia käyttökohteita ovat hotellit, hoitokodit ja kuntosalit, instituutionaalisia julkiset rakennukset kuten sairaalat ja koulut ja teollisia pienet laitokset, jotka tarvitsevat kuumaa vettä tai matalapainehöyryä pesuveteen kuten elintarvike- ja tuotantosektorilla. [EPA 2015, 2]

Invertteripohjaisten generaattoreiden johdosta tehon laadun hallinta voidaan lisätä CHP- ja sähköntuottolaitoksiin. Tämä mahdollistaa järjestelmän olevan osa keskeytymätöntä tehonlähdejärjestelmää tarjoten varavirtaa sähköverkon ollessa alhaalla. Järjestelmä pystyy myös tarjoamaan jännitteen sekä muuta tehon laadun hallintaa. Tällaiset toiminnot ovat hyödyllisiä sovelluksissa, joissa on korkeat katkaisukustannukset ja herkkä virrantarve kuten sairaaloissa, hoitokodeissa ja monissa muissa kohteissa, joissa on kriittiset toimintavaatimukset. [EPA 2015, 2]

4.2 Luonnonvarojen hyödyntäminen

Mikroturbiinien kyky polttaa erilaisia polttoaineita tekee siitä hyödyllisen luonnonvarojen hyödyntämissovelluksen. Näitä sovelluskohteita ovat kaatopaikkakaasu, mäntäkaasu, öljy- ja kaasukenttien pumppaus ja sähkösovellukset sekä hiilikaivosmetaanin käyttö. [EPA 2015, 2] Mikroturbiinijärjestelmät ovat myös suunniteltu tarjoamaan lämpöhäpätusta sovelluksille, jotka tarvitsevat metaania tai haihtuvien orgaanisten yhdisteiden tuhoamista kuten kaatopaikkakaasut tai muut jätekaasut. [EPA 2015, 2]

Pirkanmaan Jätehuolto Oy:lla Tarastenjärvellä on käytössä Euroopan suurin kaatopaikkakaasulla toimiva mikroturbiinilaitos. Mikroturbiinin käyttöönotolla tehostetaan kaasun hyötykäyttöä. Laitoksessa on viisi kappaletta Capstonen 200 kW:n turbiiniyksikköä, biokaasupumppaamo mikroturbiinilaitoksen yhteydessä sekä erillinen biokaasupumppaamo. Laitoksen turbiini tuottaa 1 MW sähköä sekä 1,5 MW lämpöä. Lämpö hyödynnetään alueen rakennusten lämmityksellä ja sähköä kuluu eniten jätteen esikäsittelylaitoksessa. Oman sähkönkäytön lisäksi sitä syötetään myös valtakunnan verkkoon. Kyseisessä mikroturbiinilaitoksessa on aktiivihiilisuodatus kaatopaikkakaasujen pitoisuuksien vähentämistä varten. [Sarlin 2019]

4.3 Aurinkovoima

EU:n rahoittamat tutkijat muuttavat tilannetta sähköntuotannossa keskittyneen aurinkoenergian tuotannossa korvaamalla Stirling-moottorit mikroturbiineilla. Suunnitellun järjestelmän tulisi kattaa kotitalous- ja pienkaupallisten sovellusten energiantarve. Euroopan komissio on tunnistanut keskitetyn aurinkovoiman potentiaalin

Euroopan vähähiilisessä energiavoitossa ja toisaalta huomannut tähän tekniikkaan liittyvät haasteet. Haasteisiin kuten aurinkoenergian tehokkaaseen käyttöön, lämmönvaihtimen valintaan ja komponenttien optimointiin puututaan EU:n rahoittamassa projektissa ”optimoitu mikroturbiinaurinkovoimasysteemi”. Järjestelmä on modulaarinen ja se tuottaa sähköä välillä 3 – 10 kW. Suurempia energiantarpeita varten järjestelmäyksiköt voidaan yhdistää modulaarisuuden takia. Lisäksi järjestelmä voidaan integroida keskipitkän ja pitkän aikavälin energian varastointiin sekä rinnakkaispoltoon tavanomaisten polttoaineiden kanssa. Viimeiseksi mainittu vaihtoehto erottaa järjestelmän muista pienimuotoisen uusiutuvan tuotannon muodoista, koska siirrettävä tuotanto on välttämätöntä uusiutuvien osuuden kasvattamiseksi. Valmistuttuaan järjestelmän tulisi luotettavuuden suhteen ylittää samanlaiset pienimuotoiset järjestelmät, jotka perustuvat Stirling-moottoreihin. Tämä järjestelmä edistää EU:n sitoutumista tuottamaan 20 prosenttia energiantarpeesta uusiutuvilla energianlähteillä ja vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä 20 prosenttia vuoteen 2020 mennessä. [CORDIS 2017]

4.4 Muut sovellukset

Mikroturbiineja voidaan käyttää itsenäisinä virtalähteinä etäsovelluksissa missä verkkovirta ei ole saatavilla tai se on todella kallista. Ne voivat myös toimia varavirtana tai rajoittaa huipputehoa, kuitenkin kyseinen käyttö on rajattua. [EPA 2015, 2]

Mikroturbiinit ovat invertteripohjaisia, ja sopivat siksi hyvin mikroverkkojen käyttöön tarjoamaan verkon tukea ja verkkoviestinnän toimintoja. Tämä käyttöalue on sähkö- ja elektroniikkayritysten kehitys- ja esittelyvaiheessa. [EPA 2015, 2]

Mikroturbiinin käytettävissä oleva pakokaasun lämpötila mahdollistaa tehokkaan käytön absorptiojäähdytyslaitteiden kanssa, joita ohjaa joko matalapainehöyry tai suora pakokaasulämpö. Jäähdytys voidaan lisätä sähkön ja lämmön yhteistuotantoon useissa kaupallisissa ja instituutionaalisissa sovelluksissa tarjoamaan sekä jäähdytystä että lämmitystä. [EPA 2015, 2]

Tutkimusta on tehty myös tuuli-mikroturbiinihybridistä, joka koostuu mikroturbiinisysteemistä ja tuulienergian muuntojärjestelmästä. Hybridiä testattiin

MATLAB-tietokoneohjelmistolla, missä testattiin hybridin suorituskykyä vaihtelevilla tuulen nopeuksilla. Simulaation tulokset osoittavat, että hybridi pystyy toimittamaan jatkuvan virransyötön kuormalle riippumatta tuulen nopeudesta. Kyseinen systeemi myös muuttaa sen polttoainenkulutustaan kuorman vaihteluiden mukaan, mikä johtaa alhaisempaan polttoainenkulutukseen. Tuuli-mikroturbiinihybridi soveltuu itsenäiseen toimintaan, eli se pystyy operoimaan sähköverkon ulkopuolella. Tulevaisuuden tutkimusta kuitenkin tarvitaan, jotta voidaan tutkia hybridin käyttäytymistä sähköverkkoon kytkemistä varten. [Jain Alok et al. 2016, 6]

Mikroturbiineja voidaan myös käyttää merisovelluksissa lisätehon tuottamiseksi aluksella tai kantaman pidentäjinä sekä lukusjahdeille että kauppa-aluksille. Maakaasun käyttöä merisovelluksissa on lisätty, sillä mikroturbiinit voivat käyttää maakaasusäiliöläivoista höyrystyvää maakaasua polttoaineenaan, mikä muuten menisi hukkaan. [Capstone Turbine Corporation 2019]

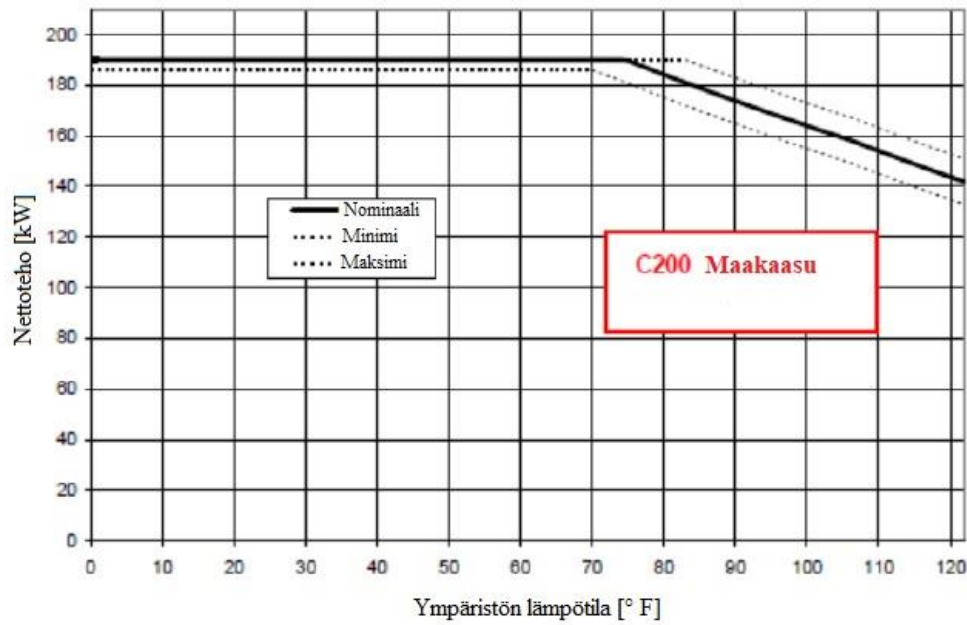
5 EDUT JA HAITAT

Mikroturbiineilla on monia etuja, jotka tekevät siitä houkuttelevan. Taloudellisesta näkökulmasta mikroturbiinit ovat halvempia rakentaa ja käyttää verrattuna suurempiin tavanomaisiin kaasu- tai dieselkäyttöisiin generaattoreihin. Teknologia tunnetaan hyvin ja sitä on toteutettu monissa sovelluksissa monissa eri maissa. Ne ovat myös suhteellisen edullisia, helppo valmistaa sekä niissä on vain vähän liikkuvia osia. [EPA 2013, 1] Käytössä olevat mikroturbiinijärjestelmät ovat yleensä osoittaneet korkeaa järjestelmän saatavuutta. Perussuunnittelun ja pieni liikkuvien osien lukumäärä edistää korkeaa saatavuutta: valmistajat ovat asettaneet tavoitteeksi saatavuudelle 98-99 prosenttia [EPA 2015, 16]. Yhtenä etuna mikroturbiineissa on niiden kestävyys ja luotettavuus: niiden käyttöikä on noin 40 000 tuntia ja ne vaativat vain vähän huoltoa. Ne ovat myös toimintavalmiita kymmenen minuutin jälkeen käynnistyksestä. Mikroturbiinit tuottavat suuren määrän energiaa suhteessa niiden kokoon. Pienen kokonsa vuoksi ne on helpompi sijoittaa lähelle kulutuspaikkaa. Niitä voidaan käyttää yksittäin tai kytkettynä rinnakkain. [EPA 2013, 1] Rinnankytkentöjen tai varayksiköiden avulla voidaan parantaa entisestään koko laitoksen saatavuutta [EPA 2015, 16]. Jos rinnankytketyssä systeemissä yksi mikroturbiini vioittuu, se ei välttämättä tarkoita, että kaikki mikroturbiinit vioittuvat. [EPA 2013, 1] Mikroturbiineilla on alhaisemmat hyötysuhteet kuin mäntämootoreilla ja polttokennoilla, mutta ne pääsevät korkeampiin CHP-hyötysuhteisiin. [EPA 2015, 7]

Ympäristön näkökulmasta päästöjä syntyy vähemmän ja ne vievät vähemmän tilaa. Mikroturbiiniteknologia tukee kasvihuonekaasujen vähentämistä ja on sen takia vahvasti poliittisesti tuettuna. Toinen päämikroturbiinivalmistajista, Capstone on Yhdysvaltojen ympäristönsuojeluviraston vahvasti tukema yritys.

Yhtenä mikroturbiinien haittapuolena on rajoitettu käynnistysten lukumäärä. Mikroturbiinit käyvät erittäin suurilla nopeuksilla ja korkeilla lämpötiloilla aiheuttaen melusaasteita lähiasukkaille ja potentiaalisia riskejä operaattoreille ja huoltohenkilöstölle. Koska mikroturbiinit ovat suhteellisen pienitehoisia, voidaan tarvita useita mikroturbiineja rinnankytkettynä, jotta saadaan riittävästi tehoa esimerkiksi pienelle jätevedenpuhdistamolle. [EPA 2013, 1]

Ympäristön olosuhteilla (lämpötila ja paine), joissa mikroturbiini toimii, on huomattava vaikutus sekä tehoon että hyötysuhteeseen. Kun ympäristön lämpötila kasvaa, sekä teho että hyötysuhde laskevat. Kuvan 7 kuvaajasta nähdään lämpötilan vaikutus nettotehoon.



Kuva 7. Ympäristön lämpötilan vaikutus Capstonen C200-LP mikroturbiiniin. (Muokattu lähteestä EPA 2015, 9)

Lämpötilan noustessa massavirta pienenee, sillä ilman tiheys laskee lämpötilan noustessa. Hyötysuhde puolestaan laskee, koska kompressorin tarvitsee enemmän tehoa vähemmän tiheään ilman puristuksessa. Lämpötilan laskiessa tapahtuu päinvastoin: lämpötila ja hyötysuhde kasvavat. [EPA 2015, 8] Imuilman jäähtyminen voi vähentää tehon ja hyötysuhteen alenemista. Jäähtyminen ei kuitenkaan ole vielä ominaisuutena tämän päivän mikroturbiineissa, mutta markkinoille tulevat tai käytössä olevat jäähtytstekniikat suurilla kaasuturbiineilla saattavat toimia seuraavan sukupolven mikroturbiinien jäähtytstekniikan suunnannäyttäjinä. [EPA 2015, 11] Ilman tiheys pienenee myös korkeuden kasvaessa. Toisin kuin lämpötilan kasvu, korkeuden kasvulla tietyssä lämpötilassa ei ole suurta vaikutusta hyötysuhteeseen. Eli korkeammalle sijoitettuna mikroturbiini operoi melkein samalla hyötysuhteella mutta pienemmällä teholla. [EPA 2015, 11]

6 KUSTANNUKSET

Tässä osassa tarkastellaan tutkimusta arvioiduista mikroturbiini-CHP -laitosten kustannuksista. Oletuksena on, että mikroturbiinin pakokaasusta otettu lämpöenergia käytetään kuuman veden tuottamiseen. On korostettava, että asennuskustannukset voivat vaihdella merkittävästi riippuen esimerkiksi laitoksen laajuudesta, maantieteellisestä sijainnista, vallitsevista markkinaolosuhteista, päästörajoitusvaatimuksista, vallitsevasta työllisyysasteesta sekä siitä, onko systeemi uusi vai uudelleen asennettu. Mikroturbiinin peruspaketti koostuu mikroturbiinista ja siihen liittyvästä elektroniikasta. Kaikki kaupalliset ja lähes kaupalliset yksiköt tarjoavat perusliitännät ja rinnakkaistoiminnot osana pakettikustannuksia. Kokonaiskustannukset koostuvat laitteiden kokonaiskustannusten lisäksi asennuskustannuksista ja materiaaleista (mukaan lukien työpaikat), suunnittelusta, projektin hallinnasta (mukaan lukien lisensointi, vakuutukset ja käyttöönotto) ja varastoinnista tyypillisen kolmen kuukauden rakennusjakson aikana. Laitteiden peruskustannuksiin kuuluu generaattoripaketti, rekuperaattori sekä savukaasujen puristus- ja kytkentälaitteet. CHP-järjestelmän asennuksesta aiheutuvat kustannukset asiakkaalle sisältää joukon muita kustannuksia, jotka lisäävät kokonaiskustannuksia 70-80 prosenttia. Materiaali- ja työvoimakustannuksiin kuuluvat rakenteelliset- ja rakennustöiden kustannukset, mekaanisten ja sähköisten töiden kustannukset sekä niihin liittyvien materiaalien kustannukset kuten johdotukset, putkistot ja kanavat. Lisäksi aiheutuu myös useita muita kustannuksia, joita kutsutaan yleensä pehmeiksi kustannuksiksi, jotka vaihtelevat laajasti asennuksen ja projektijohtamisen lähestymistavan mukaan. Kokonaiskustannukset yhteensä tämän arvion mukaan ovat mikroturbiinisysteemistä riippuen 2271 – 3906 €/kW. [EPA 2015, 13]

Kaliforniassa keskimääräinen asennuskustannus 116:sta ei-uusiutuvaa polttoainetta käyttävälle mikroturbiinisysteemille vuosina 2001-2008 oli 2861 €/kW. Samalla aikavälillä uusiutuvaa polttoainetta käyttävien 26:n mikroturbiinisysteemin keskimääräinen asennuskustannus oli 3606 €/kW. [EPA 2015, 13]

Jätekaasu- ja nestemäisten polttoaineiden sovellukset saattavat vaatia useampia tarkastuksia ja komponenttien vaihtoa verrattuna maakaasua polttoaineena käyttäviin systeemeihin, jolloin ylläpitokustannukset nousevat. [EPA 2015, 15]

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Mikroturbiinit ovat integroituneet osaksi hajautettua energiantuotantoa ja ovat tänä päivänä jo kiinteä osa sitä. Muihin hajautetun energiantuotannon teknologioihin verrattuna ne ovat pienitehoisia. Mikroturbiinit sopivat monien eri ominaisuuksiensa vuoksi todella hyvin osaksi hajautettua energiantuotantoa, ja ne ovat jo löytäneet vakiintuneen paikkansa lukuisissa eri hajautetun energiantuotannon sovelluskohteissa. Tärkeimpiä mikroturbiinien ominaisuuksia hajautetun energiantuotannon kannalta ovat niiden korkea hyötysuhde CHP-kohteissa, kyky polttaa useita erilaisia polttoaineita, modulaarisuus, rinnankytkentämahdollisuus sekä kyky toimia itsenäisenä virranlähteenä verkkovirran ulkopuolella. Optimaalisia sovelluskohteita mikroturbiineille hajautetussa energiantuotannossa ovat juurikin pienen CHP-kohteet korkean hyötysuhteen takia.

Tulevaisuudessa kaupallisilla mikroturbiineilla tullaan todennäköisesti polttamaan muiden polttoaineiden lisäksi myös vetyperäisiä polttoaineita ja itsessään vetyä. Vetyä poltettaessa lopputuotteena syntyy pelkästään vettä, joten polttoaineena se olisi täysin päästötöntä. Lisäksi mikroturbiinien valmistajat jatkavat korkeamman sähköntuottohyötysuhteen kehittämistä, sillä nykyiset sähköntuottohyötysuhteet ovat mikroturbiineilla varsin alhaisia. Useiden viime vuosien aikana mikroturbiinivalmistajat ovat myös kehittäneet suuremman kapasiteetin mikroturbiinisysteemeitä parantaakseen talouttaan korkeampien hyötysuhteiden ja alhaisempien pääoma- ja ylläpitokustannusten avulla.

8 YHTEENVETO

Tässä työssä selvitettiin, mikä rooli pienen teholuokan kaasuturbiineilla eli mikroturbiineilla on hajautetussa energiantuotannossa. Hajautetulla energiantuotannolla tarkoitetaan pienemmän kapasiteetin energiantuotantolaitosten sijoittamista lähelle energian kuluttajia. Monet hajautetun energiantuotannon teknologiat perustuvat uusiutuviin energianlähteisiin. EU:n direktiivin mukaan uusiutuviin energianlähteisiin perustuvien energiamuotojen edistäminen on yksi energiapolitiikan tavoitteista. Fossiilisiin polttoaineisiin perustuvat hajautetun energiantuotannon yksiköt sisältävät pääasiassa mäntämootoreita ja mikroturbiineja. Vaikka mikroturbiinien yleisin polttoaine on maakaasu, mikroturbiiniteknologia tukee kasvihuonekaasujen vähentämistä ja on sen takia vahvasti poliittisesti tuettuna.

Mikroturbiinien toiminta perustuu Brayton-prosessiin ja sen pääkomponentit ovat samat kuin isoilla kaasuturbiineilla. Mikroturbiinit ovat kooltaan pienempiä ja niillä on tyypillisesti alhaisempi painesuhde kuin isoilla kaasuturbiineilla ja ne operoivat alhaisemmissa palamislämpötiloissa. Hyötysuhteen parantamiseksi mikroturbiineissa käytetään rekuperaattoria, jonka avulla pakokaasujen lämpöenergiaa hyödynnetään turbiinille menevien kaasujen lämmityksellä.

Mikroturbiineilla on lukuisia eri sovelluskohteita sähkön- ja lämmön yhteistuotannossa. Tyypilliset maakaasukäyttöiset CHP-kohteet jaettiin työssä kaupallisiin, instituutionaalisiin ja teollisiin käyttökohteisiin. Kaupallisia käyttökohteita ovat hotellit, hoitokodit ja kuntosalit, instituutionaalisia julkiset rakennukset kuten sairaalat ja koulut ja teollisia pienet laitokset, jotka tarvitsevat kuumaa vettä tai matalapainehöyryä pesuveteen kuten elintarvike- ja tuotantosektorilla.

Mikroturbiinien eduiksi voidaan mainita sen yksinkertainen rakenne, pitkä käyttöikä, pieni koko sekä korkea järjestelmän saatavuus. Haittapuolina mikroturbiineissa on alhainen hyötysuhde, mahdolliset melusaasteet ja ympäristön olosuhteiden vaikutus sekä tehoon hyötysuhteeseen.

Mikroturbiinit sopivat monien eri ominaisuuksiensa vuoksi todella hyvin osaksi hajautettua energiantuotantoa, ja ne ovat jo löytäneet vakiintuneen paikkansa lukuisissa

eri hajautetun energiantuotannon sovelluskohteissa. Tulevaisuudessa mikroturbiineilla tullaan todennäköisesti polttamaan myös vetyperäisiä polttoaineita ja itsessään vetyä, mikä edistää kasvihuonekaasujen vähentämistä. Mikroturbiinien alhaista hyötysuhdetta tullaan myös valmistajien mukaan parantamaan.

LÄHDELUETTELO

Alanne Kari, Saari Arto, 2006. Distributed energy generation and sustainable development. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 10, s. 539-558. Viitattu: 1.10.2019. Saatavissa:

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.131.9860&rep=rep1&type=pdf>

Banshal Ramesh, 2017. *Handbook of Distributed Generation. Electric Power Technologies, Economics and Environmental Impacts*. ISBN 978-3-319-16909-5, e-ISBN 978-3-319-16910-1.

Boyce Meherewan P, 2012. *Gas Turbine Engineering Handbook, Fourth Edition. Part 1. Design: Theory and Practice*. ISBN 978-0-12-383842-1, e-ISBN 978-0-1238-3843-8.

Capstone Turbine Corporation, 2019. Capstone Turbine issued two new patents for multiple fuel applications – including hydrogen and liquid fuel ultra-low emissions capabilities. Viitattu 26. 11. Saatavissa: <https://www.capstoneturbine.com/news/press-releases/detail/3688/>

Capstone Turbine Corporation, 2019. *Solutions. Marine*. Viitattu 26.10. Saatavissa: <https://www.capstoneturbine.com/solutions/marine>

CORDIS, 2017. *Community Research And Development Information Service. Optimised Microturbine Solar Power System*. Viitattu 15.10.2019. Saatavissa: <https://cordis.europa.eu/project/rcn/106967/brief/en>

Dulău Lucian Ioan, 2013. *Distributed generation technologies and optimization*. Viitattu 20.11.2019.

EPA, 2013. U.S Environmental Protection Agency. *Renewable Energy Fact Sheet: Microturbines*. Viitattu 2.11.2019. Saatavissa: https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-08/documents/microturbines_fact_sheet_p100il8p_0.pdf

EPA, 2015. U.S Environmental Protection Agency. Combined Heat and Power Partnership. Catalog of CHP Technologies. Section 5. Technology Characterization – Microturbines. Viitattu 1.10.2019. Saatavissa: https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/catalog_of_chp_technologies_section_5_characterization_-_microturbines.pdf

Euroopan unionin virallinen lehti, 2018. EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON DIREKTIIVI (EU) 2018/2001, uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä (uudelleenlaadittu). Viitattu 10.10.2019. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=en>

European Comission, 2015. Study. Microturbines and their application in bioenergy. Viitattu 11.11. 2019. Saatavissa: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2004_microturbines_bioenergy.pdf

García-Conde Antonio González, 2014. Modifications of an existing microturbine to use hydrogen as fuel. Viitattu 26.11.2019. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/290165494_Modifications_of_an_existing_microturbine_to_use_hydrogen_as_fuel

Jain Alok, Singh Bhanu Pratap, Bhullar Suman, Verma M.K, 2016. Performance of Hybrid Wind-Microturbine Generation System in Isolated Mode. Viitattu 10.11.2019. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/299824159_Performance_of_Hybrid_Wind-Microturbine_Generation_System_in_Isolated_Mode

Sarlin, 2019. Asiakascaset. Pirkanmaan Jätehuolto Oy – lämpöä ja sähköä kaatopaikkakaasusta mikroturbiinilla. Viitattu 1.11.2019. Saatavissa: <https://www.sarlin.com/asiakascaset/kanteleen-voima/>

U.S DOE, 2019. U.S Department of Energy. Combined Heat and Power Installation Database. Viitattu 26.11.2019. Saatavissa: <https://doe.icfwebservices.com/chpdb/>

U.S. DOE, 2016. U.S Department of Energy. Energy Efficiency & Renewable Energy. Combined Heat and Power Technology Fact Sheet Series. Microturbines. Viitattu 1.11.2019. Saatavissa: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/09/f33/CHP-Microturbines_0.pdf

VTT, 2015. Technical Research Centre of Finland. Distributed Energy Systems – DESY, s. 3. Viitattu 4.10.2019. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2015/T224.pdf>

Wärtsilä, 2019. Gas Turbine for Power Generation: Introduction. Viitattu 3.10.2019. Saatavissa: <https://www.wartsila.com/energy/learn-more/technical-comparisons/gas-turbine-for-power-generation-introduction>