

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0201 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

**Materiaalivalintojen vaikutus mikrokaasuturbiinin
suorituskykyyn**

**Effect of material selections on performance of micro
gas turbine**

Lappeenranta 2.12.2015

Mika Roitto

TIIVISTELMÄ

Mika Roitto

Materiaalivalintojen vaikutus mikrokaasuturbiinin suorituskykyyn

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2015

30 sivua, 8 kuvaa ja 2 taulukkoa.

Hakusanat: mikrokaasuturbiini, turbiini, rekuperaattori, lämmönjohtuminen, materiaali

Mikrokaasuturbiini on potentiaalinen vaihtoehto hajautettuun energiantuotantoon. Laitteessa erityisesti turbiinin ja rekuperaattorin materiaalivalinnoilla on merkittävä vaikutus siitä saatavaan suorituskykyyn.

Kandidaatintyössä tarkastellaan mikrokaasuturbiinin turbiinin ja rekuperaattorin materiaalivalintoja ja niiden vaikutusta laitteen suorituskykyyn. Lisäksi työssä pohditaan materiaalivalintoihin läheisesti yhteydessä olevaa lämmönjohtumista mikrokaasuturbiineissa. Suorituskyvyssä kiinnitetään erityisesti huomiota laitteen sähköntuotannon hyötysuhteeseen, luotettavuuteen ja käyttöikänsä vaikuttaviin tekijöihin. Työssä käydään läpi sekä kaupallisissa mikrokaasuturbiineissa käytettäviä että tutkimusten kohteina olevia materiaaleja turbiinin ja rekuperaattorin osalta. Työn tavoitteena on tuottaa kokonaiskuva materiaalivalintojen tekemisestä ja tehtyjen valintojen vaikutuksista mikrokaasuturbiineissa.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	2
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	4
1 JOHDANTO	5
2 MIKROKAASUTURBIININ TOIMINTA	7
2.1 Prosessin periaate ja pääkomponentit.....	7
2.2 Prosessin hyötysuhteet	9
2.3 Mahdolliset polttoaineet	10
2.4 Haasteet korkean suorituskyvyn tavoittelussa.....	10
3 TURBIINI	12
3.1 Käytetyt turbiinityypit ja turbiinin erityispiirteet	12
3.2 Turbiinin materiaalivalinnat	13
3.2.1 Metalliset turbiinit.....	14
3.2.2 Keraamiset turbiinit.....	16
3.2.3 Pinnoitetut turbiinit	17
4 REKUPERAATTORI	20
4.1 Rekuperaattorityypit	20
4.2 Rekuperaattorin sisääntulolämpötila	21
4.3 Rekuperaatioaste	22
4.4 Rekuperaattorin materiaalivalinnat	23
4.4.1 Metalliset rekuperaattorit	23
4.4.2 Keraamiset rekuperaattorit	25
5 LÄMMÖNJOHTUMINEN MIKROKAASUTURBIINEISSA	27
6 YHTEENVETO	29
LÄHDELUETTELO	31

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

c_p	ominaislämpökapasiteetti [kJ/kgK]
h	entalpia [kJ/kg]
k	materiaalin lämmönjohtavuus [W/mk]
p	paine [Pa], [bar]
R	aineen kaasuvakio [kJ/kgK]
T	lämpötila [K], [°C]

Kreikkalaiset aakkoset

Φ	lämpöteho [W]
ϵ	rekuperaatioaste [-], [%]
η	hyötysuhde [-], [%]

Alaindeksit

2	kompressorin jälkeinen
2'	rekuperaattorin jälkeinen ilma
3	turbiinia edeltävä
4	turbiinin jälkeinen
el	sähkö
gen	generaattori
k	kompressori
mek	mekaaninen
p	polytrooppinen
pk	polttokammio
pt	polytrooppinen
t	turbiini
th	terminen

1 JOHDANTO

Hajautettu energiantuotanto on maailman laajuisesti kasvava teknologian ala. Sen ominaispiirteinä ovat energiantuotanto käyttökohteen lähellä ja verrattain pienet energiantuotantolaitokset (Motiva 2010, 6).

Mikrokaasuturbiinit ovat yksi mahdollisuus paikalliseen pienimuotoiseen energiantuotantoon. Niillä pystytään tuottamaan hyvin monenlaisilla polttoaineilla joko sähköä, tai sähköä ja lämpöä yhteistuotannossa. Mikrokaasuturbiinien sähköntuotannon hyötysuhde on kuitenkin jäänyt teollisen kokoluokan vastaaviin verrattaessa vaatimattomaksi ja yksikkökustannukset ovat vielä korkeat. Tulevaisuuden mikrokaasuturbiinien hyötysuhdetta kuitenkin tavoitellaan kehittää nykyisten laitteiden noin 30 %:sta teollisen kokoluokan vastaavien tasolle, noin 40 %:iin. Lisäksi laitteen yksikkökustannusten on arvioitu laskevan tulevaisuudessa merkittävästi (Vartiainen et al. 2002, 20).

Tällä hetkellä Diesel- ja Ottomootorit dominoivat pienien generaattorisettien markkinoita. Näiden on arvioitu säilyttävän dominoivan asemansa vielä pitkään. Kasvaville markkinoille kehitetään kaasuturbiinien lisäksi myös muita vaihtoehtoja kuten poltto-kennoja ja Stirling-moottoreita. (McDonald 2007, 60.) Voidaan siis todeta, että vaatimukset suorituskyvyille ja kilpailukyvyille tulevat vuosien saatossa vielä kasvamaan, jotta mikrokaasuturbiinit pääsisit valtaamaan alaa markkinoista.

Merkittävä tapa parantaa mikrokaasuturbiinin hyötysuhdetta on kasvattaa turbiinin sisään tulolämpötilaa. Tässä lämpötilan kasvatuksessa olennaisessa asemassa ovat turbiinissa ja turbiinin jälkeisessä rekuperaattorissa käytettävät materiaalit. (McDonald ja Wilson 1995, 635.)

Kandidaatintyössä pohditaan mikrokaasuturbiinin turbiinin ja rekuperaattorin mahdollisia materiaalivaihtoehtoja ja näiden materiaalivalintojen vaikutusta koko laitteen suorituskykyyn. Suorituskyvystä kiinnitetään erityisesti huomiota laitteesta saatavaan sähköntuotannon hyötysuhteeseen, sekä laitteen käyttöikään ja luotettavuuteen. Lisäksi materiaalivalinnoista aiheutuvat valmistuskustannukset otetaan vertailussa huomioon. Työssä pohditaan materiaalivalintojen osalta sekä kaupallisissa mikrokaasuturbiineissa

käytettyjä ratkaisuja että tutkittuja ja mahdollisia tulevaisuuden materiaaleja. Työn tavoitteena on tuottaa kokonaiskuva materiaalivalintojen tekemisestä ja tehtyjen valintojen vaikutuksista mikrokaasuturbiineissa.

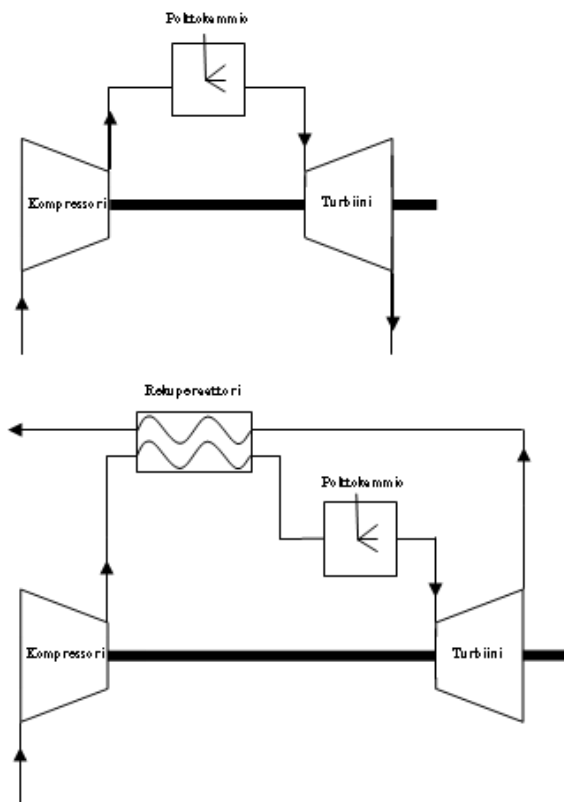
Työ käsittää mikrokaasuturbiinin toiminnan tarkastelun, turbiinin ja rekuperaattorin tarkastelun, näissä käytettyjen materiaalien tarkastelun sekä materiaalivalintojen perustelun. Lisäksi pohditaan materiaalivalintojen vaikutusta lämmönsiirtoon komponenttien välillä.

2 MIKROKAASUTURBIININ TOIMINTA

Mikrokaasuturbiineissa on teollisen kokoluokan kaasuturbiineihin verrattaessa paljon yhteistä, mutta myös eroavaisuuksia löytyy. Tässä luvussa esitetään mikrokaasuturbiinin pääkomponentit, prosessin periaate, mahdolliset polttoaineet ja prosessin hyötysuhteet. Lisäksi pohditaan laitteen haasteita korkean suorituskyvyn tavoittelussa.

2.1 Prosessin periaate ja pääkomponentit

Perinteiseen kaasuturbiiniin kuuluu kolme pääkomponenttia; kompressori, turbiini ja polttokammio. Mikrokaasuturbiineissa on useasti näiden komponenttien lisäksi myös muita osia, esimerkiksi pakokaasun hukkalämpöä talteen ottava rekuperaattori tai regeneraattori. ICR-kaasuturbiiniin (engl. intercooled and recuperated) kuuluu näiden lisäksi kompressorin välijäähdytys. (Backman ja Larjola 2002, 5-8.) Kuvassa 1 on periaatteellisesti esitetty perinteisen teollisen kokoluokan kaasuturbiinin ja rekuperaattorilla varustetun mikrokaasuturbiinin ilman ja pakokaasun kierto komponenttien välillä.

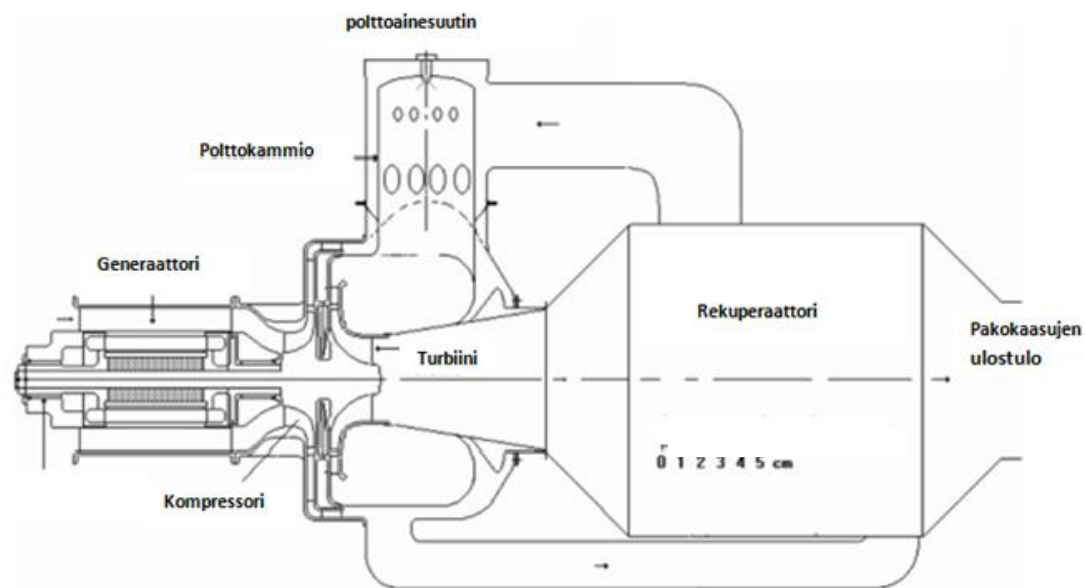


Kuva 1. Perinteisen ja rekuperoidun kierron kaasuturbiinien periaatekuvat. Ylempänä perinteinen ja alempana rekuperaattorilla varustettu kaasuturbiini.

Kuvan 1 periaatekuvioista nähdään rekuperaattorin aiheuttama ilman ja pakokaasun monimutkaisempi kierto mikrokaasuturbiinissa verrattuna perinteiseen kaasuturbiiniin. Kaasuturbiiniprosessin tavoin mikrokaasuturbiinin prosessi perustuu Brayton-prosessiin. Kompressorilla ilma puristetaan korkeaan paineeseen. Polttokammiossa syötetään polttoainetta, joka kompressorilla puristetun ilman avulla palaa korkealämpötilaiseksi pakokaasuksi. Pakokaasu johdetaan turbiiniin, jossa pakokaasun sisältämä energia muunnetaan paisuntaprosessissa akselin mekaaniseksi energiaksi. Akselin mekaanisesta energiasta osa käytetään kompressorin pyörittämiseen ja loput saadaan hyödynnettyä joko sähköenergiaksi tai mekaaniseksi energiaksi.

Mikrokaasuturbiineissa käytettävä paine on teollisen kokoluokan vastaaviin verrattuna pieni, tyypillisesti 3-5 baaria (Backman ja Larjola 2002, 7). Pieni paine aikaansaa korkean turbiinin jälkeisen lämpötilan, jolloin tämän hukkalämmön talteenotto esimerkiksi rekuperaattorilla on välttämätöntä pyrittäessä korkeisiin hyötysuhteisiin (Visser et al. 2011, 2). Rekuperaattorin avulla saadaan otettua pakokaasun hukkalämpöä talteen kompressorin jälkeiseen ilmaan, jolloin polttokammiossa tarvitaan vähemmän polttoainetta tuottamaan tarvittu pakokaasun lämpötila ennen turbiinia. (Backman ja Larjola 2002, 6-8.)

Kuva 2 esittää rekuperaattorilla varustetun sähköteholtaan 7 kW:n mikrokaasuturbiinin suunnitellun rakenteen. Kuvasta käy ilmi myös laitteen kokoluokka.



Kuva 2. Rekuperattorilla sekä radiaalisella kompressorilla ja -turbiinilla varustetun mikrokaasuturbiinin rakennekuva (McDonald ja Rodgers 2007, 69).

Rekuperoidun kierron lisäksi mahdollisia muita kiertovaihtoehtoja ovat myös esimerkiksi jälkipoltollinen kierto, erilaiset kombikierrat ja ulkoista polttokammiota käyttävä mikrokaasuturbiini. Erilaisia kiertovaihtoehtoja on kehitelty lukuisasti, mutta tässä työssä keskitytään lähinnä rekuperattorilla varustettuihin mikrokaasuturbiineihin.

2.2 Prosessin hyötysuhteet

Brayton-prosessissa terminen eli teoreettinen hyötysuhde η_{th} lasketaan yhtälöllä (1) (Backman ja Larjola 2002, 27).

$$\eta_{th} = \frac{P_t - P_k}{\Phi_{pk}} \quad (1)$$

,missä

P_t	turbiinista saatava teho [W]
P_k	kompressorin vaatima teho [W]
Φ_{pk}	polttokammioon tuotu lämpöteho [W]

Sähköntuotannon hyötysuhteessa η_{el} huomioidaan mekaaniset häviöt ja generaattorin häviöt. Se lasketaan yhtälöllä (2) (Backman ja Larjola 2002, 27).

$$\eta_{el} = \eta_{th}\eta_{mek}\eta_{gen} \quad (2)$$

,missä

η_{mek}	mekaaniset häviöt huomioiva hyötysuhde
η_{gen}	generaattorin häviöt huomioiva hyötysuhde

2.3 Mahdolliset polttoaineet

Käytettävien polttoainevaihtoehtojen lukumäärä kaupallisissa mikrokaasuturbiineissa on suuri. Polttoaineet voivat olla joko kaasumaisessa muodossa tai nesteinä. Polttoainevaihtoehtoja mikrokaasuturbiineissa ovat esimerkiksi maakaasu, biokaasu, nestekaasu, diesel ja lentopetroli (Capstone Turbine Corporation).

Biokaasu on uusiutuvana polttoaineen ympäristön kannalta kiinnostava polttoaine. Biokaasulla lämpöarvo on kuitenkin maakaasua matalampi ja riippuvainen tuotannon raaka-aineista, sekä tuotantotavasta. Tämä tuo lisähaasteita pyrittäessä poltossa pieniin NO_x -päästöihin sekä korkeaan polton hyötysuhteeseen. (Adachi et al. 2006, 3132.)

Myös poltossa syntyvien savukaasujen koostumus on eri polttoaineilla erilainen. Tällä puolestaan on vaikutusta polttokammion jälkeisiin osiin, turbiiniin ja rekuperaattoriin. Mikäli tulevaisuudessa käytetään vaihtoehtoisia polttoaineita, kuten kaatopaikkakaasua, voi polttoaineen sisältämä suurempi määrä rikkiä tai klooria yhdessä vesihöyryn kanssa aiheuttaa materiaalien hapettumisen kestävyydelle lisähaasteita. (Maziasz et. al 2006, 3622.)

2.4 Haasteet korkean suorituskyvyn tavoittelussa

Tavoiteltaessa korkeaa sähköntuotannon hyötysuhdetta, mikrokaasuturbiinin pienestä koosta aiheutuu tiettyjä ongelmia verrattuna teollisen kokoluokan kaasuturbiineihin. Kaupallisten rekuperatiiviseen kiertoon perustuvien mikrokaasuturbiinien sähköntuottohyötysuhde on jäänyt noin 30 %:iin, kun teollisen kokoluokan kaasuturbiineilla vastaava luku on noin 40 % (Backman ja Larjola 2002, 4). Jotta mikrokaasuturbiineilla voitaisiin päästä vastaaviin hyötysuhteisiin täytyvät nämä häviöt minimoida, tai tavalla tai toisella kompensoida.

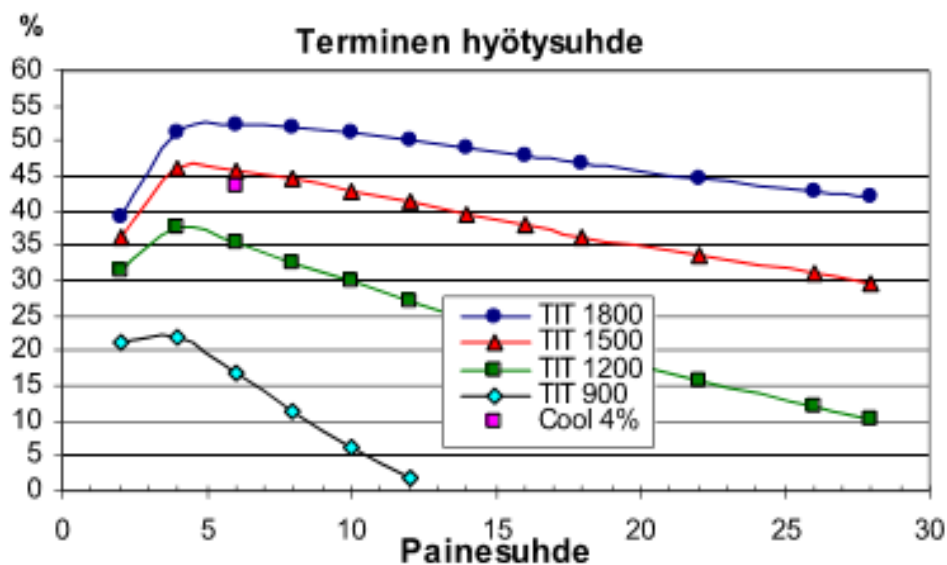
Pienillä kaasuturbiinilla hyötysuhdetta heikentää aerodynaamisesti kompressorin ja turbiinin siipien matala korkeus, pieni Reynoldsin luku, osien suhteellisesti suurempi väly ja osien valmistustoleranssit, sekä pinnan viimeistely. Ilmiö korostuu mitä pienempiin mikrokaasuturbiineihin mennään. (McDonald 2007, 63.)

Turbiinin sisääntulolämpötilat ovat mikrokaasuturbiineilla jääneet teollisen kokoluokan vastaaviin verrattuna huomattavasti pienemmäksi. Tällä hetkellä kaupallisissa 100 kW:n kokoluokan mikrokaasuturbiineissa turbiinin sisääntulolämpötilat ovat noin 950 °C, kun teollisen kokoluokan kaasuturbiineissa lämpötilat voivat olla jopa 1400 °C (Ansaldo Energia), (Backman ja Larjola 2002. 5).

3 TURBIINI

Turbiinin materiaalivalinnalla on merkittävä vaikutus mikrokaasuturbiinin suorituskykyyn, koska materiaalivalinta pääosin määrittää turbiinin suurimman mahdollisen sisääntulolämpötilan, eli turbiinin korkeimman lämpötilan. Turbiinin sisääntulolämpötilalla puolestaan on suorituskykyyn merkittävä vaikutus (Backman ja Larjola 2002, 5).

Kuvassa 3 on esitetty laskennallisesti termistä hyötysuhdetta painesuhteen funktiona turbiinin sisääntulolämpötilan ollessa parametrina rekuperoidun kierron kaasuturbiineilla. Kuvasta huomataan turbiinin sisääntulolämpötilan voimakas vaikutus laitteen termiseen hyötysuhteeseen. Rekuperoidulla kierrolla korkeat termiset hyötysuhteet saavutetaan matalalla, alle 5 painesuhteella ja korkealla turbiinin sisääntulolämpötilalla.



Kuva 3. Terminen hyötysuhde painesuhteen funktiona rekuperoidulla kierrolla. Parametrina turbiinin sisääntulolämpötila TIT. Kuvassa esitetty myös kuvitteellisen turbiinin jäähdytyksen vaikutus (Cool 4 %). (Backman ja Larjola 2002, 31.)

3.1 Käytetyt turbiinityypit ja turbiinin erityispiirteet

Virtaustyyppiltään radiaaliturbiini on usein katsottu aksiaaliturbiinia paremmaksi vaihtoehdoksi pienissä, alle 100 kW:n kaasuturbiineissa, kun tavoitteena on mahdollisimman hyvä valmistuskustannusten ja suorituskyvyn suhde. Etuina ovat myös yksinkertaisuus, sekä asennettavuus. Myös radiaali- ja aksiaaliturbiinin välimuoto, sekaturbiini (engl. mixed flow) on katsottu soveltuvaksi turbiinityypiksi. (McDonald ja Rodgers 2007, 65.)

Radiaaliturbiinia vastaavalla isentrooppisella hyötysuhteella toimivalla aksiaaliturbiinilla on kuitenkin pienempi halkaisija ja kehänopeus, jolloin myös rasitukset ovat pienempiä. (McDonald ja Rodgers 2007, 65.)

Tämän päivän mikrokaasuturbiinit toimivat pääsääntöisesti kierrosnopeusvälillä 60000-150000 rpm. Pyörimisnopeuden valinnassa saatetaan joutua tekemään kompromissi kompressorin ja turbiinin aerodynaamisessa optimoinnissa. (McDonald ja Rodgers 2007, 66.)

Mikrokaasuturbiinissa luonnollisesti myös komponentit ovat perinteisiä teollisen kaasuturbiinin komponentteja huomattavasti pienempiä. Tästä aiheutuu tiettyjä ongelmia kaasuturbiinin suunnittelussa. Esimerkiksi erittäin pienen radiaaliturbiinin jäähditys on hankalampaa toteuttaa kuin suuren kokoluokan aksiaaliturbiinin, eikä jäähditystä kaupallisissa mikroturbiineissa toteutetakaan. Tällöin jotta päästäisiin korkeampiin turbiinin sisääntulolämpötiloihin ja sitä kautta korkeampaan hyötysuhteeseen, joudutaan etsimään korkeamman lämpötilan kestäviä materiaaleja. (McDonald 2003, 1464.)

Tässä jäähdytyksen puuttumisessa voidaan nähdä myös positiivisia puolia. Turbiinin jäähditys vaatii ilmaa kompressorilta ja aiheuttaa näin laitteen hyötysuhdetta heikentävän energiahäviön (kuva 3). Nykyaikaisilla keraamisilla komponenteilla jäähditys olisi mahdollista jättää pois turbiinin rakenteesta myös korkeammilla lämpötiloilla, jolloin terminen hyötysuhde kasvaisi myös tämän johdosta. (Sakakida et al. 1994, 2.) Jäähdytyksen vaikea toteuttaminen voi olla siis myös ajavana tekijänä korkean lämpötilan materiaalien kehittämisessä ja virtauksen toteuttamisessa mikrokaasuturbiineissa.

3.2 Turbiinin materiaalivalinnat

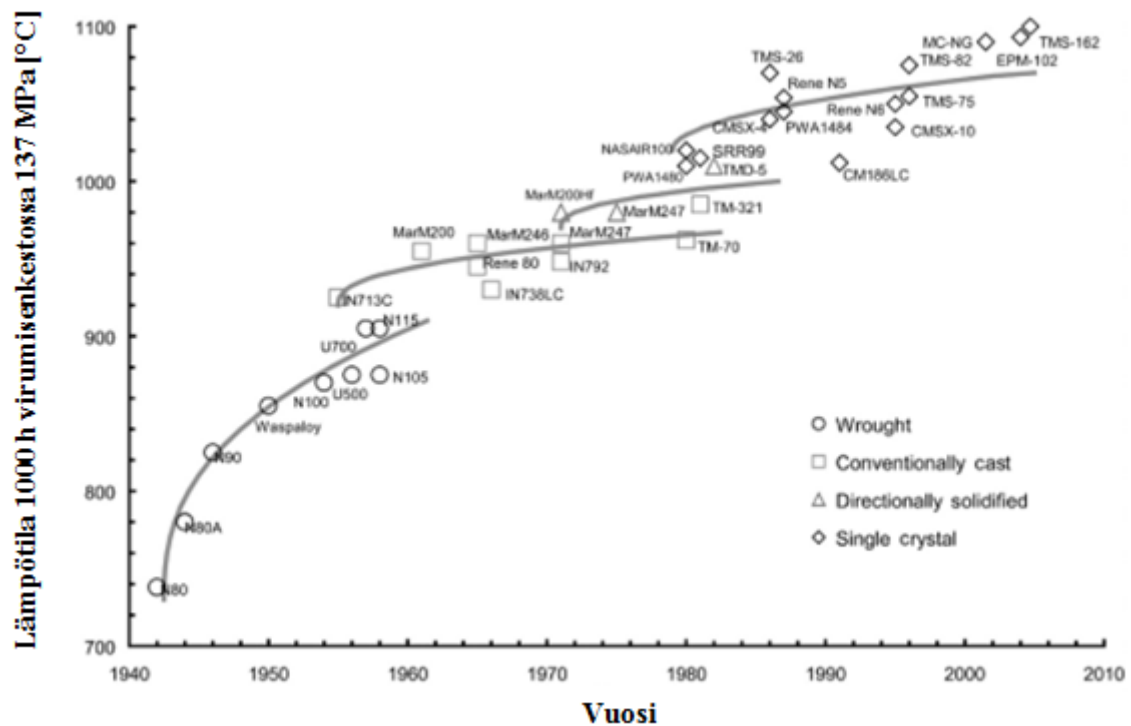
Pelkkä materiaalin kyky selviytyä eheänä tietyssä korkeassa lämpötilassa ei ole riittävä mittari turbiinin materiaalin ja rakenteen suunnittelussa. Erityisesti täytyy huomioida materiaalin rakenteellinen lujuus liikkeen ja lämpötilan yhdessä aikaansaamassa rasituksessa, turbiinin aerodynaaminen suorituskyky, sekä rasituksia osaltaan lisäävä paino (Fu et al. 2014, 41). Huomioitavaa on myöskin turbiinin käyttöikä. Turbiinimateriaalilla

täytyy olla hyvä virumisen kesto, sekä hyvä vastustuskyky hapettumista ja korroosiota vastaan.

3.2.1 Metalliset turbiinit

Mikrokaasuturbiinien turbiinimateriaaleina käytettävät metalliseokset ovat ns. superseoksia. Superseoksia ovat nikkeli-, rauta-nikkeli- ja kobolttipohjaiset yhdisteet, joita käytetään yli 540 °C lämpötilassa. Rauta-nikkelipohjaiset superseokset ovat useimmiten taottuja. Nikkeli-, sekä kobolttipohjaiset superseokset voivat olla joko taottuja tai valettuja. (Donachie ja Donachie 2002, 2.)

Kuvassa 4 on kuvattu superseosten kehittymistä 60 vuoden ajalta niiden ilmaantumises- ta 1940-luvulta lähtien. Kuvasta voidaan havaita superseosten virumisenkestolämpötilan johdonmukainen kasvu. Kasvunopeus on kuitenkin kuvan mukaan hidastunut superseosten kehityksen alkuaikoihin verrattuna.

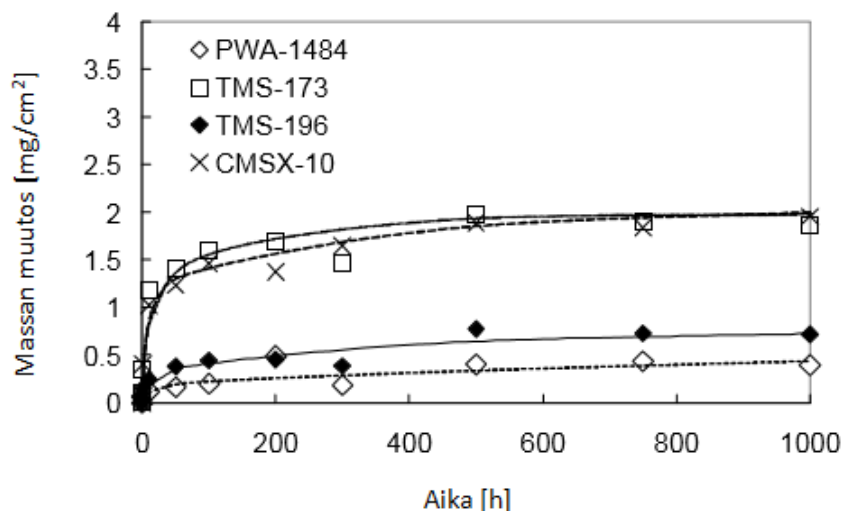


Kuva 4. Superseosten kehittyminen niiden alkuajoilta 1940-luvulta 2000-luvun puoleen väliin (Reed 2006, 19).

Rauta-nikkelipohjaisten superseosten kehitys on aikoinaan lähtenyt ruostumattoman teräksen lujuuden kehittämisestä korkeisiin lämpötiloihin. Niitä ei voida käyttää aivan yhtä korkeissa lämpötiloissa kuin nikkeli- tai kobolttipohjaisia seoksia, mutta niiden kustannukset ovat huomattavasti alhaisemmat. Nikkeli ja koboltti, sekä seosteina käytetyt kromi, volframi, molybdeeni, renium, hafnium jne. ovat usein kalliita metalleja. Niiden saatavuus ja hinta voivat myös vaihdella ajan mukaan paljon. (Donachie ja Donachie 2002, 1,8.)

Superseoksista kaikkein korkeimmille lämpötiloille päästään nikkelipohjaisilla superseoksilla (Donachie ja Donachie 2002, 8). Nikkelipohjaisella, valetulla, Inconel 713C -superseoksella voidaan saavuttaa erinomainen lujuus jopa 1000 °C:n lämpötilaan asti. Sen etuina ovat erinomaiset valettavuus, hapettumiskestävyys, lämpöväsytymisen kestävyys, sekä rakenteellinen vahvuus. Näiden ominaisuuksien ansiosta se onkin ollut turbiinin materiaalina hyvin tavanomainen. (Visser et al. 2011, 1.), (Nickel Institute, 3.) Kuvassa 4 uusimpana ja lämmönsiedoltaan parhaimmalla nikkelipohjaisella materiaalilla TMS-162 on hyvin stabiilina pysynyt mikrorakenne vielä 1000 tunnin ja 1100 °C:n lämpötilan virumisenkestotestin jälkeen.

Turbiinin kestävyys ja pitkäikäisyys kannalta on tärkeää materiaalin hapettumiskestävyys. Hapettumista voidaan selvittää altistamalla testikappale materiaalia haluttuun korkeaan lämpötilaan ja mittaamalla massanmuutoksia pinta-alaa kohden analyysikappaleessa. Koe voidaan tehdä pitämällä lämpötila vakiona tietyn ajan, tai esimerkiksi toistuvilla tunnin mittaisilla rasiustesteillä, jolloin kappaleen annetaan jäähtyä välissä. (Sato et al. 2008, 136.) Kuvassa 5 on esitetty TMS-196 ja muutaman muun kehittyneen turbiinimateriaalin 1000 tunnin isoterminen hapettumistesti 900 °C:n lämpötilassa.



Kuva 5. Eräiden kehittyneiden turbiinimateriaalien 1000 tunnin ja 900 °C:n lämpötilan isotermissen hapettumistestin tulokset (Sato et al. 2008, 136)

Viimevuosikymmenellä käytössä olleet kokonaan metalliset, rekuperoidut, kokoluokaltaan 30-100 kW:n kaasuturbiinit ovat toimineet noin 30 %:n hyötysuhteella. 100 kW:n kokoluokassa hyötysuhdetta 35 % on pidetty saavutettavana käytännön ylärajana sen hetken kokonaan metallisille kaasuturbiineille. (McDonald 2007, 62.) Kuvan 4 superseosten kehityskäyrä osoittaa että seosten kehitys ei kuitenkaan ole pysähtynyt, vaan pikkuhiljaa mennään kohti yhä suurempaa turbiinin materiaalin lämpötilan kestoa ja tätä kautta kohti suurempaa hyötysuhdetta.

3.2.2 Keraamiset turbiinit

Pienillä painesuhteilla toimivilla rekuperoiduilla mikrokaasuturbiineilla on keraamisten komponenttien käyttöä pidetty välttämättömänä, jotta 40 %:n terminen hyötysuhde voitaisiin saavuttaa (McDonald 2007, 60-61). Näiden käyttöä on tutkittu jo useita vuosikymmeniä. Kuitenkin tuotantostandardien kehitys ja tavoite keraamisten komponenttien valmistuksen saattamiseksi taloudellisesti kannattavaksi on edennyt hitaasti. (Walsh ja Fletcher 2004, 18)

Saavutettavat turbiinin sisääntulolämpötilat voivat olla keraamisilla turbiineilla huomattavasti metallisten turbiinien vastaavia suurempia. Eurooppalaisessa AGATA-tutkimusprojektissa selvitettiin mm. keraamisen turbiinin suorituskykyä 60 kW:n mikrokaasuturbiinissa. Tässä ohjelmassa keraamiselle CSN 101 HIPed Si₃N₄ materiaalista

valmistetulle radiaaliturbiinille laskettiin mahdolliseksi turbiinin sisääntulolämpötilaksi 1350 °C, kierrosnopeuden ollessa 125000 rpm. (Lundberg ja Ferrato 1999, 3.)

AGATA-tutkimusprojektissa käytetyn turbiinimateriaalin AC Cerama CSN 101 HIPed Si₃N₄ valmistaja on ruotsalainen AC Cerama AB. Materiaalin suorituskykyä kuvaavat tiedot on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Materiaalin AC Cerama CSN 101 HIPed Si₃N₄ ominaisuudet. (Lundberg ja Ferrato, 1999, s.3)

Tiheys	3,22 g/cm ³
Kovuus	19 GPa
Taivutuslujuus (huoneen lämpötila)	955 Mpa
Weibullin kerroin (huoneen lämpötila)	28
Taivutuslujuus (1350 °C)	630 MPa
Murtolujuus	6 MPa√m
Lämpölaajenemiskerroin	3,7·10 ⁻⁶ K ⁻¹ (20-800 °C)
Lämmönjohtumiskerroin	40 W/mK

Taulukossa 1 esitetyt materiaalin ominaisuudet lupaavat kyseiselle materiaalille hyvää soveltuvuutta korkean lämpötilan kaasuturbiineissa. Lisäksi materiaalilla on mahdollista saada monimutkaisia muotoja alhaisin kustannuksin. (Lundberg ja Ferrato 1999, 3).

Piinitridin (Si₃N₄) tavoin myös piikarbidia (SiC) on tutkittu mikroturbiinin materiaalina. Molemmilla materiaaleilla on suuri lujuus korkeissa lämpötiloissa, pieni tiheys ja hyvä hapettumiskesto. Molempien materiaalien käyttöä on kuitenkin rajoittanut teknologian puute valmistaa virheettömiä kappaleita kohtuulliseen hintaan. Suurimpana mahdollisena lämpötilana piikarbidille pidetään noin 1500 °C. (Epstein 2004, 207.)

3.2.3 Pinnoitetut turbiinit

Korkeampaa turbiinin sisääntulolämpötilaa tavoiteltaessa voidaan turbiini pinnoittaa materiaalilla, joka fysikaalisesti ja kemiallisesti suojaa itse pohjamateriaalia (Kim et al. 2009, 129). Pinnoite toimii myös eristeenä pohjamateriaalin ja kuumen savukaasuvirtauksen välillä. Esimerkiksi lentokoneissa käytettyjen suuremman kokoluokan ja suuremmalla turbiinin sisääntulolämpötilalla toimivien kaasuturbiinien turbiinin siivekkeiden pohjamateriaalin lämpötilaa on onnistuttu laskemaan jopa useita satoja asteita pinnoituksen avulla. (Varis ja Vuoristo 2015, 9.)

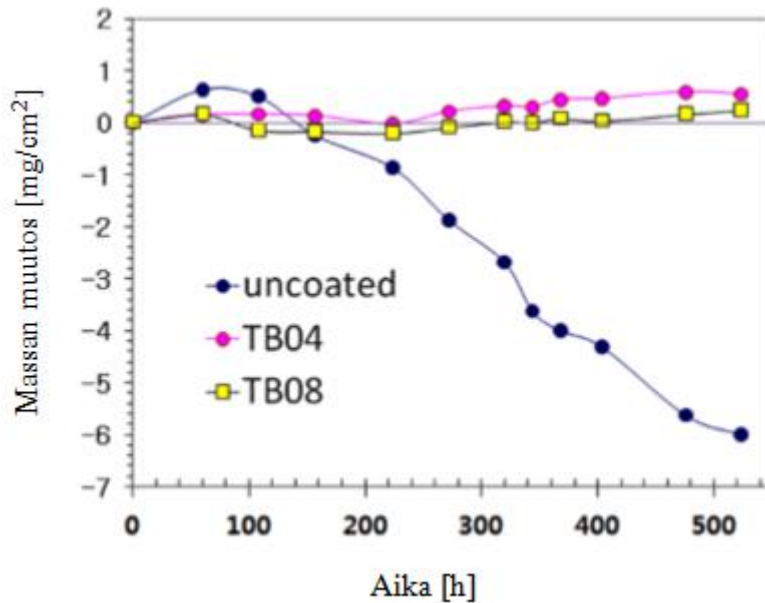
TBC-menetelmä (engl. Thermal barrier coating) on suojaavaan oksidi kalvoon perustuva menetelmä. Erityisesti yttriumilla stabiloitu zirkonia (YSZ) yhdistettynä komponentteihin (Ni(Pt)Al) tai (MCrAlY) on laajalti käytetty suuremman kokoluokan kaasuturbiinien komponenttien superseosten suojauksessa korkeissa lämpötiloissa. (Kim et al. 2009, 129.)

Perinteisen TBC-pinnoitteen valmistus vaatii kuitenkin erityisen laitteiston ja pinnoitus on integroitu yleensä jo osien valmistusprosessin yhteyteen. Se vie aikaa ja on kustannuksiltaan melko kallista. Tämän vuoksi on tutkittu myös toisenlaisia vaihtoehtoja luoda superseoksen päälle suojaava kerros. Kuvan 6 aksiaaliturbiinin siivet on päällystetty mikrokaasuturbiinin käydessä, lisäämällä polttoaineeseen (nestekaasu) organopiiyhdistettä, tetraetyyliortosilikaattia (TEOS, $\text{SiO}_4(\text{C}_2\text{H}_5)_4$) ja polttamalla se yhdessä polttoaineen kanssa polttokammiossa. (Kim et al. 2009, 129.)



Kuva 6. TEOS:lla päällystetty mikrokaasuturbiinin aksiaaliturbiini. Altistusaikana 8 tuntia ja TEOS:n massaosuudella 2,3 % nestekaasun ja TEOS:n yhteismassasta. (Kim et al. 200, 131.)

Kuvassa 6 näkyvän sinertävän oksidisuojauskerroksen paksuus on turbiinin kärjessä noin 7 μm , painepuolella noin 14 μm ja imupuolella noin 12 μm . Kuvassa 7 on esitetty Inconel 713 -superseoksen, sekä TEOS:lla päällystettyjen saman materiaalin koekappaleiden hapettumistesti 1050 °C:n lämpötilassa.



Kuva 7. Inconel 713 -superseoksen ja TEOS:lla päällystettyjen saman materiaalin koekappaleiden hapettumistesti 1050 °C:n lämpötilassa. Kuvassa TB04 on 4 tunnin altistusajalla TEOS:lle ja TEOS:n osuudella 5,4 m-% TEOS:n ja nestekaasun kokonaismassasta. TB08:lla vastaavat luvut ovat 8 tuntia ja 2,3 m-%. (Kim et al. 2009, 130-131.)

Kuvasta 7 nähdään Inconel 713 -materiaalin voimakas hapettuminen ilman suojausta 1050 °C:n lämpötilassa jo 500 tunnin altistusajalla. Sen sijaan päällysteen avulla tämä hapettumisongelma on onnistuneesti poistettu ja materiaalin mahdollista käyttölämpötilaa nostettu. Kuvassa näkyvä koekappaleiden painon lisääntyminen selittyy suojaavan oksidikerroksen muodostumisella.

4 REKUPERAATTORI

Rekuperattori on nykyisin välttämätön osa mikrokaasuturbiineissa, mikäli halutaan päästä siedettäviin hyötysuhteisiin. Nykyisten metallisten rekuperattorien kustannukset edustavat noin 30 %:a koko laitteen kustannuksista (McDonald 2007, 67). Toisaalta rekuperattorin vaikutus koko laitteen hyötysuhteeseen on suuri (Visser et al. 2011, 2). Tämän johdosta täytyy erityisesti rekuperattorin rakennetta ja materiaaleja suunniteltaessa pohtia, minkälaisella rekuperattorikokoonpanolla saadaan mahdollisimman hyvä suorituskyky mahdollisimman kustannustehokkaasti.

4.1 Rekuperattorityypit

Mikrokaasuturbiinissa toimivaksi rekuperattoriksi on vaihtoehtoina useita erilaisia lämmönsiirintyyppjä. Kolme erityyppistä vastavirtauslämmönsiirintä on todettu erittäin kelvollisiksi pienissä kaasuturbiineissa. Nämä ovat primääripinta- (engl. primary-surface), levy-ripa (engl. plate-fin) ja putkilämmönsiirrin. (McDonald 2003, 1467.)

Primääripintalämmönsiirrin on käytetyin malli lämmönsiirtimistä pienissä kaasuturbiineissa. Sen on katsottu antavan parhaan yhdistelmän painoon ja hyötysuhteeseen. (Visser et al. 2011, 5.) Tärkeimmiksi ominaisuuksiksi mainitaan myös 100 %:n tehoinen lämpöpinta, jossa lämpimän ja kylmän kanavien pinnat ovat vaikutuksissa vain keskenään, ei ympäristön kanssa, sekä kustannuksiltaan tehokas rakenne. (McDonald 2003, 1467.)

Myös levy-ripa -malli nähdään potentiaalisesti vaihtoehdoksi tulevaisuuden huipputehokkaana rekuperattorina (McDonald 2003, 1467). Kuitenkin primääripintarekuperattori on nähty parempana vaihtoehtona, sen kustannustehokkuuden ja keveyden vuoksi. Suorituskyvyltään levy-ripa rekuperattoria vastaava primääripintainen rekuperattori voi olla tilavuudeltaan ja massaltaan noin 50 % pienempi, lisäksi valmistusprosessin katsotaan olevan yksinkertaisempi ja halvempi. (Traverso 2005, 2070.)

Putkilämmönsiirtimen etuina ovat puolestaan kyky sietää korkeitakin paineita, korkea suorituskyky ja rakenteellinen eheys syklisissä kierroissa, sekä pieni paino. Se kiinnos-

taa tutkijoita erityisesti korkeamman painesuhteen ICR-kaasuturbiineiden rekuperaattoreina. (McDonald 2003, 1468)

Myös myötävirtaan toimivia lämmönsiirtimiä on pohdittu rekuperaattoreiksi. Myötävirtaan toimivalla lämmönsiirtimellä saataisiin materiaalin keskilämpötila pienemmäksi, mutta haittavaikutuksena on rekuperaatioasteen ja tätä kautta koko prosessin hyötysuhteen heikkeneminen. Myös jäädytysilman käyttö rekuperaattorin kuumimman osan materiaalin jäädytykseen on mahdollista. Tällä jäädytyksellä on kuitenkin prosessin hyötysuhdetta heikentävä vaikutus. (Sommers et al. 2010, 1278.)

4.2 Rekuperaattorin sisääntulolämpötila

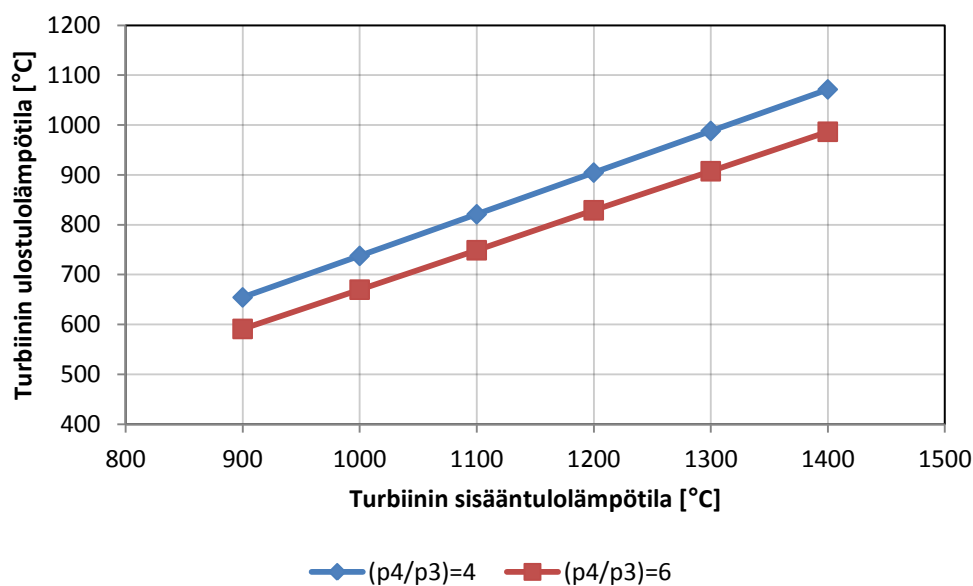
Mikäli turbiinin sisääntulolämpötilaa onnistutaan kasvattamaan, kasvaa myös turbiinin jälkeinen, rekuperaattorin menevän pakokaasun lämpötila. Turbiinin jälkeinen ja rekuperaattoriin lähtevän pakokaasun lämpötila T_4 voidaan laskea yhtälöllä (3) (Backman ja Larjola 2002, 23).

$$T_4 = T_3 \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{R\eta_{pt}}{c_p}} \quad (3)$$

,missä

T_3	Turbiinin sisääntulolämpötila [K]
p_4	Paine turbiinin jälkeen [Pa]
p_3	Paine turbiinia ennen [Pa]
R	Aineen kaasuvakio [kJ/kgK]
c_p	Fluidin ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa [kJ/kgK]
η_{pt}	Turbiinin polytrooppinen hyötysuhde

Kuvassa 8 on esitetty yhtälöllä (3) lasketut turbiinin ulostulolämpötilat turbiinin sisääntulolämpötilan funktiona. Parametrina kuvaajassa toimii painesuhde, jolle on valittu arvoiksi 4 ja 6. Kuvasta voidaan nähdä painesuhteen voimakas vaikutus turbiinin ulostulolämpötilaan. Korkeammalla painesuhteella aikaansaadaan siis matalampi turbiinin ulostulolämpötila, jolloin rekuperaattorissakin voidaan käyttää yksinkertaisempia ja halvempia materiaaleja.



Kuva 8. Turbiinin ulostulolämpötilan riippuvuus turbiinin sisääntulolämpötilasta painesuhteilla 4 ja 6.

4.3 Rekuperaatioaste

Korkean lämpötilan keston lisäksi, täytyy huomioida myös rekuperaattorin rekuperaatioaste. Rekuperaatioaste tarkoittaa rekuperaattorin hyötysuhdetta. Se määritetään yhtälöllä (4) (Moran ja Shapiro 2006, 401).

$$\varepsilon = \frac{h_{2'} - h_2}{h_4 - h_2} \quad (4)$$

,missä

$h_{2'}$	ilman entalpia rekuperaattorin jälkeen [kJ/kg]
h_2	ilman entalpia kompressorin jälkeen [kJ/kg]
h_4	pakokaasun entalpia rekuperaattoria ennen [kJ/kg]

Tyypillisesti rekuperaattoriaste ε saa arvon väliltä 0,6-0,9 (Backman ja Larjola 2002, 26).

4.4 Rekuperaattorin materiaalivalinnat

Rekuperaattorissa kuumen puolen materiaalin korkeimman siedettävän lämpötilan määrää materiaalin ominaisuudet kyseisessä lämpötilassa. Tällaisia ominaisuuksia ovat materiaalin lujuus, korroosion ja hapettumisen vastustuskyky sekä virumisenkestävyys. (Pilavanchi 2002, 2009.)

Mikrokaasuturbiinien rekuperaattorit voidaan jakaa materiaalivalintojen perusteella metallisiin ja keraamisiin rekuperaattoreihin. Nykyiset kaupallisissa mikrokaasuturbiineissa käytettävät rekuperaattorit ovat poikkeuksetta metallisia, mutta keraamisille rekuperaattoreille on tulevaisuudessa arvioitu olevan suuri rooli. (McDonald 2007, 68.)

Lämmönsiirtimen lämpöpintojen päällystäminen pohjamateriaalia suojaavalla päällysteellä ei onnistu aivan yhtä ongelmitta, kuin turbiinin siipien tapauksessa. Pinnoitteella pystytään suojaamaan itse pinta korroosiolta, mutta pienellä lämmönjohtumiskertoimella pinnoite muodostaa lämmönsiirtoa heikentävän termisen vastuksen pintaan, jolloin myös itse rekuperaattorin suorituskyky heikkenee. (Sommers et al. 2010, 1278.)

4.4.1 Metalliset rekuperaattorit

Perinteisissä rekuperaattoreissa lämpöpintojen materiaalina on tyypillisesti käytetty ruostumatonta terästä. Tällaista ruostumattomasta teräksestä koostuvaa rekuperaattoria voi kuitenkin käyttää vain, jos rekuperaattoriin tulevien pakokaasujen lämpötila on alle 650 °C. (Pilavanchi 2002, 2009.) Kuitenkin jo 650 °C lämpötilassa on liiallista virumista ja voimakasta hapettumista ollut havaittavissa. Suurimmat ongelmat ovat materiaalin levyissä ja kalvoissa vesihöyryn aiheuttama kiihtynyt hapettuminen, viruminen, sekä repeily ja halkeilu. Virumismuodonmuutoksen johdosta virtaavien fluidien reitit voivat pienentyä, repeily tai halkeilu aiheuttaa puolestaan laitteeseen vuotoja. (Maziasz et. al 2006, 3622.)

Korkeampiin lämpötiloihin mentäessä kysymykseen tulevat superseokset. Alle 800 °C lämpötiloissa kaupallisista materiaaleista Inconel 625 ja HR120 nähdään sopivina materiaaleina. Yli 800 °C lämpötiloihin soveltuvaksi materiaaliksi on pohdittu laatua HR214. Tämä materiaali on kuitenkin melko kallis vaihtoehto.

Inconel 625 on laajalti kokeiltu mikrokaasuturbiinien rekuperaattoreissa. Seoksella on todella hyvä hapettumisen kestävyys ja lujuus korkeissakin lämpötiloissa ja kosteissa olosuhteissa. (Maziasz et. al. 2006, 3623.) Ylärajana materiaalin käytölle rekuperaatorissa on pidetty noin 800 °C. Tämän materiaalin ongelmina ovat kuitenkin olleet huomattavasti suuremmat kustannukset ja muokattavuus verratessa ruostumattomaan teräkseen. (Visser et al. 2011, 5.)

Myös materiaali HR120 on ollut mielenkiinnon kohteena. Sen vastustuskyky hapettumista vastaan on erinomainen, mutta kustannukset ovat olleet vain hiukan Inconel 625 matalammat. Inconel 625 on puolestaan tätä materiaalia vahvempi (Maziasz et. al, 2006, s.3623).

Taulukossa 2 on vertailtu suuntaa antavasti levy-ripa -rekuperaattorin soveltuvien materiaalien vetolujuutta, virumisenlujuutta, hapettumisen sietoa ja ripojen aalloitusta, kun lämpötila nousee. Taulukossa on esitetty myös materiaalin kustannusten vertailu kehittyneisiin ferriittisiin ruostumattomiin teräksiin verrattuna. Nämä teräkset ovat kehitettyjä materiaalilaadusta SUS430 ja ne ovat kehitettyjä käytettäväksi 650 °C:n lämpötila-alueella. (Takase et al. 2002, 1013-1014.) Huomattavaa on, että vertailu on tehty 2000-luvun alkupuolella. Myöskin taulukossa esitetyt eri metalliryhmät sisältävät paljon eri laatuja joilla voi olla kyseisissä ominaisuuksissa paljonkin eroja. Taulukko antaa kuitenkin hyvän yleiskuvan eri metalliryhmien tyypillisistä ominaisuuksista korkeissa lämpötiloissa

Taulukko 2. Levy-ripa -rekuperaattorin materiaalin ominaisuudet, kun sisääntulolämpötilaa kasvatetaan. Hintavertailu tehty SUS430 -materiaalista kehitettyjä 650 °C:n lämpötiloja hyvin kestäviä ferriittejä kohtaan. (Takase et al. 2002, 1314.)

Sisääntulolämpötila [°C]	Materiaali	Veto- lujuus	Virumis- lujuus	Hapettumi- sen sieto	Ripojen aalloitus	Hinta- vertailu
500	SUS430, SUH409	Erin- omainen	Erin- omai- nen	Erinomainen	Hyvä	0,6X
650	Kehittyneet fer- riitit	Hyvä	Hyvä	Hyvä	Hyvä	X
800	SUS347	Tyydyt- tävä	Hyvä	Hyvä	Hyvä	1,2X
	Kehittyneet aus- teniitit	Hyvä	Hyvä	Erinomainen	Tyydyttävä	2,1X
950	Nikkelipohjaiset	Tyydyt- tävä	Huono	Tyydyttävä		
	>950	Keraamit	Hyvä	Hyvä	Hyvä	-

4.4.2 Keraamiset rekuperaattorit

Tutkimustyötä keraamisten rekuperaattoreiden parissa on tehty jo useita vuosikymmeniä. Teknologian kehitys on kuitenkin ollut hidasta ja vaatimatonta, ja kehitystyötä on syytä jatkaa. (McDonald 2007, 67.) Keraamisten materiaalien käytöllä rekuperaattorin lämpöpintojen materiaalina on kaksi pääetua metalleihin verrattuna; huomattavasti suurempi lämmönsietokyky ja korroosion vastustuskyky (Sommers et al. 2010, 1278).

Keraamisista materiaaleista piikarbidi (SiC) nähdään erittäin lupaavana materiaalina keraamisissa lämmönsiirtimissä. Sen hajoamislämpötila on noin 2500 °C. Tosin piin (Si) sulamispiste rajoittaa käyttölämpötilan 1425 °C:n alapuolelle. Materiaalilla on hyvä sieto lämpöshokkeja vastaan, se säilyttää taivutusvetolujuutensa korkeissakin lämpötiloissa ja on kemiallisesti inertti. (Sommers et al. 2010, 1278.)

Myös piinitridin (Si₃N₄) käyttöä korkean lämpötilan lämmönsiirtimissä on pohdittu. Materiaalilla on erittäin hyvä lujuus ja virumisvastus korkeissakin toimintalämpötiloissa. Yli 1000 °C:n lämpötiloissa sillä on kuitenkin todettu hapettumisongelmia. (Sommers et al. 2010, 1278.)

Kompaktin, suuren lämpötilan keraamisen rekuperaattorin, jonka rakenne soveltuu massatuotantoon ja jonka valmistuskustannukset ovat alhaiset, uskotaan olevan avainasemassa tulevaisuuden seuraavan sukupolven mikrokaasuturbiineissa (McDonald 2007, 68).

5 LÄMMÖNJOHTUMINEN MIKROKAASUTURBIINEISSA

Kaasuturbiineilla lämmönjohtumisella kuumien ja kylmien komponenttien välillä, sekä laitteesta ympäristöön on merkitystä laitteesta saatavaan tehoon ja hyötysuhteeseen. Mikrokaasuturbiinin pienen koon, mutta kuitenkin suurien lämpötilaerojen johdosta komponenttien välillä, nämä häviöt korostuvat. Lämpöhäviöihin vaikuttavat sekä laitteen materiaalivalinnat, että laitteen rakenteelliset ratkaisut. (Verstraete ja Bowkett, 2014, 445, 448.)

Turbiinista johtumalla poistuva lämpö vähentää siitä saatavaa energiaa. Toisaalta turbiinin suurempi lämmönjohtavuus viilentää itse turbiinia lämpövirralla kompressoriin ja laitteen vaippaan, mikä mahdollistaa suuremman turbiinin sisääntulolämpötilan ja tätä kautta parantaa laitteen termistä hyötysuhdetta. (Verstraete ja Bowkett 2006, 447.) Keraamisilla turbiineilla lämpötilan kesto on niin suuri, että tätä jäähdystä ei välttämättä tarvita, jolloin pieni lämmönsiirtokerroin on etu. Metalleilla asia on huomattavasti monimutkaisempi.

Mikrokaasuturbiinin komponenttien materiaalina on käytetty useita eri metalleja ja metalliyhdisteitä, myös keraameja kuten piikarbidi ja piinitridit. Käytetyn materiaalin lämmönjohtavuutta kuvaa lämmönjohtavuuskerroin k , jonka suuruudella on merkitystä lämmönjohtumiseen komponenttien sisällä ja komponenttien välillä. (Verstraete ja Bowkett 2006, 447.) Materiaalin lämmönjohtuvuuskerroin k ei kuitenkaan ole vakio vaan riippuu toimintalämpötilasta.

Turbiinin ja kompressorin materiaalien lisäksi myös akselin lämmönjohtavuuden kasvu aiheuttaa merkittävän vaikutuksen mikrokaasuturbiinin turbiinin ja kompressorin polytrooppisiin hyötysuhteisiin η_p (Verstraete ja Bowkett 2006, 447).

Laitteen vaipan lämmönjohtavuudella on todettu olevan pienempi vaikutus kuin itse roottorikokoonpanon välisellä lämmönjohtavuudella. Vaikutuksen osuus kuitenkin kasvaa mentäessä edelleen pienemmän lämmönjohtavuuden roottorikokoonpanoihin. (Verstraete ja Bowkett 2006, 447.)

Mitä pienempitehoisiin mikrokaasuturbiineihin mennään, sitä suurempi on lämmönjohtavuuden vaikutus laitteen suorituskykyyn. Lisäksi suuremmilla turbiinin sisääntulolämpötiloilla vaikutus edelleen kasvaa. (Verstraete ja Bowkett 2006, 448-449.) Mikäli tulevaisuudessa päästään edelleen korkeampiin turbiinin sisääntulolämpötiloihin mikrokaasuturbiineissa voi siis komponenttien materiaalivalinnoissa myös lämmönjohtavuus saada yhä enemmän huomiota.

6 YHTEENVETO

Työssä tavoitteena on pohtia mikrokaasuturbiinin turbiinin ja rekuperaattorin mahdollisia materiaalivaihtoehtoja ja näiden materiaalivalintojen vaikutusta koko laitteen suorituskykyyn.

Turbiinin ja rekuperaattorin materiaalivalinnoilla voidaan vaikuttaa merkittävästi mikrokaasuturbiinin sähköntuotannon hyötysuhteeseen, käyttöikään ja luotettavuuteen. Potentiaalia hyötysuhteen kasvattamiseen on turbiinin sisääntulolämpötilan kasvattamisessa. Sisääntulolämpötilan kasvaessa kuitenkin turbiinin ja rekuperaattorin olosuhteet muuttuvat niissä käytetyille materiaaleille haastaviksi, jolloin täytyy etsiä materiaaleja jotka omaavat korkeassa lämpötilassa mm. riittävän vetolujuuden ja virumisen kestävyyden, sekä riittävän hapettumisen ja korroosion sietokyvyn.

Turbiinin sisääntulolämpötilan kasvattaminen materiaalivalintojen kautta on monimutkainen ja ongelmallinen prosessi. Kasvattamalla turbiinin sisääntulolämpötilaa, kasvaa myös rekuperaattoriin menevän kaasuvirtauksen lämpötila. Mikäli lämpötila kasvaa suuremmaksi kuin rekuperaattorin lämpöpintojen korkein mahdollinen sietolämpötila, joudutaan rekuperaattorin materiaalikin vaihtamaan. Tämä puolestaan tuo omat haasteensa, sillä nykyisin rekuperaattori on hyvin kallis osa mikrokaasuturbiinia ja edustaa noin 30 % koko laitteen valmistuskustannuksista.

Turbiinissa mahdollisia materiaaleja ovat ns. superseokset ja keraamit. Lisäksi turbiinin materiaali on mahdollista päällystää itse pohjamateriaalia suojaavalla kerroksella. Tällä hetkellä korkeimpana mahdollisena turbiinin sisääntulolämpötilana on superseoksille pidetty 1100 °C:tta, vaikkakin kaupallisissa alle 100 kW:n mikrokaasuturbiineissa sisääntulolämpötila ovat jääneet noin 950 °C:een. Keraameilla sisääntulolämpötila on mahdollista nostaa useita satoja asteita korkeammaksi, mutta keraamisista materiaaleista ei ainakaan vielä pystytä osia valmistamaan taloudellisesti kannattavasti. Toisin sanoen tällöin tuotetun yksikkötehon hinta on liian suuri.

Mahdollisia rekuperaattorin materiaaleja ovat ruostumaton teräs, superseokset ja keraamit. Rekuperaattorin sisääntulolämpötila määrää, minkälaisia materiaaleja lämpöpöin-

noilla on mahdollista käyttää. Rekuperaattorin sisääntulolämpötila on tiiviissä suhteessa turbiinin sisääntulolämpötilaan, sekä painesuhteeseen. Nykyisin käytetään metallisia rekuperaattoreita, mutta tulevaisuudessa keraaminen kompakti rekuperaattori on nähty osana mikrokaasuturbiineja.

Materiaalivalinnat vaikuttavat myös lämmönsiirtoon laitteen komponenttien välillä. Tämä ilmiö korostuu, mitä pienempiin roottorikokoonpanoihin ja korkeampiin turbiinin sisääntulolämpötiloihin mennään. Erilaiset metallit ja keraamit omaavat hyvin erilaisen lämmönsiirtokyvyn. Toisaalta turbiinilta akselin kautta kompressorille johtuva lämpövirta voi olla hyötysuhdetta laskeva häviö, toisaalta turbiinin mahdollista sisääntulolämpötilaa kasvattava hyöty.

Nykyisin keraamisilla materiaaleilla sekä turbiinissa, että rekuperaattorissa, nähdään erittäin suuri potentiaali tutkijoiden keskuudessa. Nykyistä 30 %:n hyötysuhdetta pidetään mahdollisena nostaa metallisia materiaaleja käyttäen 35 %:iin, mutta mikäli halutaan päästä 40 %:n hyötysuhteeseen, joudutaan etsimään keinoja valmistaa keraamisia materiaaleja matalammin kustannuksin.

LÄHDELUETTELO

Adachi Sadamasa et al. 2006. Emissions in combustion of lean methane-air and biomass-air mixtures supported primary hot burned gas in a multi-stage gas turbine combustor. Proceedings of the Combustion Institute 31. Elsevier. Japan.

Ansaldo Energia. [valmistajan www-sivuilla]. [viitattu 13.10.2015]. Saatavissa: <http://www.ansaldoenergia.it/easynews/newsleggi.asp?newsid=11>

Backman Jari ja Larjola Jaakko 2002. Kaasuturbiinikytkennät ja niiden laskenta. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, teknillinen tiedekunta. ISBN 951-764-682-8.

Capstone Turbine Corporation. [valmistajan www-sivuilla]. [viitattu 13.10.2015]. Saatavissa: <http://www.capstoneturbine.com/products>.

Donachie Matthew J. ja Donachie Stephen J. 2002. SUPERALLOYS A Technical Guide. Second Edition. ASM International. ISBN 978-0-87170-749-9.

Epstein Alan H. 2004. Millimeter-scale, micro-electro-mechanical systems gas turbine engines. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. Vol. 126.

Fu Lei et al. 2014. Experimental validation of an integrated optimization design of a radial turbine for micro gas turbines. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering). Kiina. ISSN 1673-565X

Kim Min Tae, Kim Doo Soo ja Oh Won Young 2009. In-Situ Deposition of Silica Layers during the Operation of a Micro-Gas Turbine and Their Effect on the Oxidation of Superalloy Blades. Metals and Material International. Vol 16. Korea.

Lundberg Robert ja Ferrato Marc. 1999. Ceramic component for AGATA. ASME Paper 99-GT-392. USA

Maziasz P.J. et al. 2006. Advanced alloys for compact, high-efficiency, high-temperature heat exchangers. International Journal of Hydrogen Energy 32. Elsevier. USA.

McDonald Colin F. ja Wilson David Gordon 1995. The utilization of recuperated and regenerated engine cycles for high-efficiency gas turbines in the 21st century. Applied Thermal Engineering 16. Elsevier. USA.

McDonald Colin F. 2003. Recuperator considerations for future higher efficiency microturbines. Applied Thermal Engineering 23. Elsevier. USA.

McDonald Colin F. ja Rodgers Colin 2007. Small recuperated ceramic microturbine demonstrator concept. Applied Thermal Engineering 28. Elsevier. USA.

Moran Michael J. ja Shapiro Howard N. 2006. Fundamentals of Engineering Thermodynamics. 5th edition. England: John Wiley & Sons Ltd. ISBN 978-0-470-03037-0.

Motiva 2010. Selvitys hajautetusta ja paikallisesta energiantuotannosta erilaisilla asuinalueilla. [Viitattu 13.10.2015]. Saatavissa:

Vartiainen Eero et al. 2002. Hajautettu energiantuotanto: teknologia, polttoaineet, markkinat ja CO₂-päästöt. Helsinki: Gaia Group Oy. ISBN 952-91-4465-2.

Nickel Institute. Engineering Properties of ALLOY 713C. [viitattu 14.10.2015] Saatavissa:

http://www.nickelinstitute.org/~~/media/Files/TechnicalLiterature/Alloy713C_337_.ashx

Pilavachi P.A. 2002. Mini- and micro-gas turbines for combined heat and power. Applied Thermal Engineering 22.

Reed Roger C. 2006. The superalloys: fundamentals and applications. Cambridge University Press. ISBN-13 978-0-521-85904-2. USA.

Sakakida Masaru et al. 1994. 300 kW class ceramic gas turbine development (CGT 301). The American Society of Mechanical Engineers 94-GT-125.

Sato Akihiro et al. 2008. A 5th Generation SC Superalloy with Balanced High Temperature Properties and Processability. Superalloys 2008.

Sommers et al. 2010. Ceramics and ceramic matrix composites for heat exchangers in advanced thermal systems -review. Applied Thermal Engineering 30.

Takase Kenjiro, Furukava Hideo ja Nakano Kimiaki 2002. A preliminary study of an inter-cooled and recuperative microgasturbine below 300 kW. ASME paper GT-2002-30403.

Traverso Alberto ja Massardo Aristide F. 2005. Optimal design of compact recuperators for microturbine application. Applied Thermal Engineering 25. Elsevier. Italy.

Varis Tommi ja Vuoristo Petri 2015. Terminen ruiskutus – menetelmät, pinnoitteet ja teolliset sovellukset. Teräsrakenneyhdistys.

Verstraete Dries ja Bowkett Carlos 2014. Impact of heat transfer on the performance of micro gas turbines. Applied Energy 138. Elsevier. Australia.

Visser W. P. J. Shakariyants S. A. ja Oostveen M. 2011. Development of a 3 kW Microturbine for CHP Applications. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. Vol. 133.

Walsh P.P ja Fletcher P. 2004. Gas Turbine Performance. Second Edition. UK: Blackwell Science Ltd a Blackwell Publishing company. ISBN 0-632-06434-X.