

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0201 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

Mikro ORC-voimalan potentiaaliset sovelluskohteet

Potential applications of micro ORC-power plant

Työn tarkastaja: Teemu Turunen-Saaresti

Työn ohjaajat: Teemu Turunen-Saaresti ja Antti Uusitalo

Lappeenranta 1.3.2014

Ville-Matti Rissanen

TIIVISTELMÄ

Ville-Matti Rissanen

Mikro ORC-voimalan potentiaaliset sovelluskohteet

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2013

48 sivua, 18 kuvaa, yksi taulukko ja yksi yhtälö

Hakusanat: ORC-prosessi, mikro ORC, kaasuturbiini, biomassa, aurinkokeräin, hukkalämpö, polttomoottori, kaukolämpö, mikro CHP

Tavoitteet energiatehokkuuden parantamisesta ja energiantuotannon ympäristövaikutusten vähentämisestä ovat nostaneet kiinnostusta hajautettua energiantuotantoa kohtaan. Pienissä kokoluokissa ei kuitenkaan sähköntuottaminen ole kannattavaa perinteisillä menetelmillä kuten vesihöyryprosessilla. Mikrokokoluokassa (alle 50 kW_e) yksi varteenotettavimmista keinoista sähköntuotantoon on mikro ORC-prosessi.

Tässä kandidaatintyössä on tavoitteena löytää mikro ORC-voimaloiden potentiaalisimpia sovelluskohteita ja ratkaisuja niiden hyödyntämiseen. Selvitystyön perusteella mikro ORC-voimaloiden potentiaalisimpia sovelluskohteita ovat hukkalämpöjen hyödyntäminen teollisuus- ja energiantuotantoprosesseissa, pienet CHP-laitokset, pienet lämpölaitokset, ajoneuvojen polttomoottorit, syrjäisten kohteiden sähköntuotanto sekä aurinkokeräimien ja kaukolämpöverkon hyödyntäminen rakennusten energiaomavaraisuuden parantamisessa.

SISÄLLYSLUETTELO

Symbolit ja lyhenteet	3
1 Johdanto	4
2 ORC-prosessi	6
2.1 ORC-prosessin osat	8
2.2 Lämmöntuontivaihtoehdot ORC-prosessiin	12
2.3 Orgaaniset kiertoaineet	14
2.4 Suurnopeus ORC-voimala	19
3 ORC-voimaloiden valmistajat	21
4 Mikro ORC-voimalat ja niiden sovelluskohteet	25
4.1 Kaasuturbiinit	26
4.2 Pienet biomassakattilat	27
4.3 Aurinkokeräimet	28
4.4 Teollisuuden hukkalämpö	30
4.5 Polttomoottorit	32
4.6 Kaukolämpöverkko	35
5 Pohdinta	36
6 Yhteenveto	39
Lähteet	41

SYMBOLIT JA LYHENTEET

Symbolit

N_s	ominaispyörimisnopeus	
q_v	tilavuusvirta	[m ³ /s]
s	entropia	[J/kgK]
T	lämpötila	[°C][K]
Δh_s	isentrooppinen ominaisentalpian muutos	[kJ/kg]
ω	kulmanopeus	[rad/s]

Alaindeksit

2	ulostulo
e	sähkö

Lyhenteet

CHP	yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto
GWP	ilmaston lämpenemisen edistämisaikutus
ODP	otsonikadon edistämisaikutus
ORC	orgaaninen Rankine kierto-prosessi

1 JOHDANTO

Energiankulutuksen kasvu ja hinnannousu, energiantuotannon ympäristövaikutusten vähentäminen sekä lainsäädännön ohjauskeinot ovat johtaneet pyrkimykseen käyttää eri energialähteitä mahdollisimman tehokkaasti ja uusiutuvia energianlähteitä on alettu suosimaan fossiilisten polttoaineiden sijaan (Energiateollisuus 2008, 1–3). Energiantuottajat ja -suurkuluttajat ovatkin joutuneet miettimään keinoja prosessiensa energiatehokkuuden parantamiseksi, jonka toteuttamiseksi yksi keino on hukkalämpöjen talteenotto. Teollisuudessa hukkalämpöjen kautta voidaan menettää jopa 20–50 % käytetystä energiasta. Hukkalämmöistä kuitenkin suurin osa (~60 %) on matalan lämpötilatason hukkalämpöjä, joiden hyödyntäminen perinteisillä lämmöntalteenottomenetelmillä on haastavaa. (BCS 2008, 3 & 54.) Sähkön hinnan nousu on lisännyt kiinnostusta sähkön tuottamiseen myös energian pientuotannossa, kuten lämpölaitoksissa ja kotitalouksissa. Myöskään pientuotannossa perinteisillä keinoilla sähkön tuottaminen lämmön lisäksi ei välttämättä ole kannattavaa. (Karjalainen 2012, 1 & 20–21.)

Yksi ratkaisu edellä mainittuihin ongelmiin ovat mikro ORC-voimalat. Termillä mikro viitataan voimaloiden kokoluokkaan, joka on yleisesti alle 50 kW_e. Mikro ORC-voimalat pystyvät käyttämään useita eri lämmönlähteitä sekä hyödyntämään matalienkin lämpötilatasojen hukkalämpöjä. Lisäksi mikro ORC-voimalat pystyvät toimimaan hyvin myös osakuorma-ajossa. (Campana et al. 2013, 244.)

Mikro ORC-voimaloista, niiden erilaisista lämmöntuontitavoista ja niiden toiminnasta on jonkin verran tutkimuksia, mutta mikro ORC-voimaloiden valmistajia tai kaupallisia sovelluksia on kovin vähän. Tällöin voimaloiden toiminnasta ja tehokkuudesta käytännönsovelluksissa on varsin vähän tietoa.

Tässä kandidaatintyössä esitellään kirjallisuus- ja muihin lähteisiin perustuen mikro ORC-voimaloiden mahdollisia sovellus- ja käyttökohteita. Eri mikro ORC-prosessin sovelluskohteita ei vertailla keskenään tai laiteta paremmuusjärjestykseen, sillä

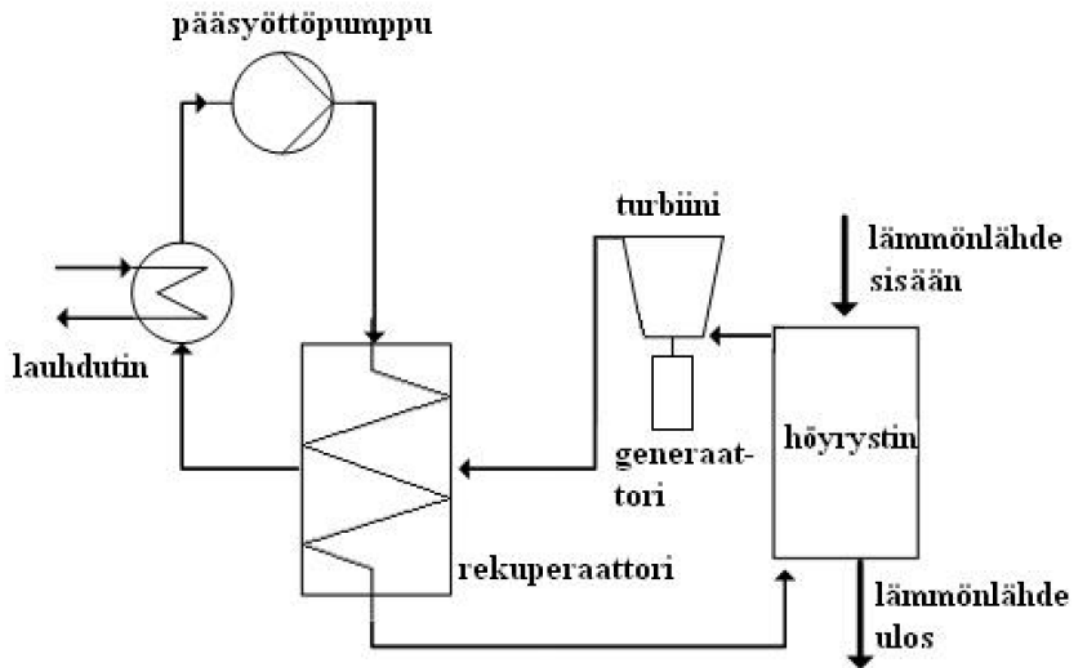
lämmönlähteet ja käyttökohteet ovat kovin eriäviä eri sovelluksissa. Työssä ei myöskään oteta kantaa siihen onko mikro ORC-prosessi kannattavin ja tehokkain valinta tiettyyn sovelluskohteeseen, vaan pyritään esittelemään potentiaalisia sovelluskohteita mahdollisimman laajasti.

Tämän kandidaatintyön luvussa 2 esitellään yleisesti ORC-prosessia ja siihen liittyviä huomionarvoisia asioita, jolloin mikro ORC-voimaloiden toimintaa on helpompi hahmottaa. Mikro ORC-voimaloiden perustoiminta-ajatus on täysin vastaava tavalliseen ORC-prosessiin verrattuna, mutta niiden teknisessä toteutuksessa voi olla eroavaisuuksia. Eroavaisuudet johtuvat pitkälti erilaisista lämpötila- ja painetasoista sekä käyttökohteiden eriävyydestä.

Luvussa 3 luetellaan nykyisiä suurimpia ORC-voimaloiden valmistajia, sekä näiden käyttämiä tekniikoita ja sovelluskohteita. Luku 4 keskittyy itse mikro ORC-voimaloihin ja niiden sovelluskohteisiin. Luvussa esitellään yleisesti mikro ORC-voimaloita ja lisäksi sovelluskohteita esitellään omissa alaluvuissaan. Luvussa tarkastellaan mikro ORC-voimaloiden erilaisia teknisiä ratkaisuja vain pintapuoleisesti, sillä ne eivät ole oleellisin osa tätä kandidaatintyötä. Työn lopussa esitetään vielä pohdinnassa mahdollisia käyttökohteita mikro ORC-voimaloille.

2 ORC-PROSESSI

ORC-prosessi (Organic Rankine Cycle) on Rankine-prosessi, jossa kiertoaineena käytetään veden sijasta orgaanista ainetta, kuten tolueenia. ORC-prosessi soveltuu hyvin matalillekin lämpötilatasoille, mikä on selvä etu verrattuna Rankine-prosessiin. ORC-prosessi on suunniteltu tuottamaan sähköenergiaa erilaisista hukkalämmönlähteistä, joten se ei kuluta omaa polttoainetta ja näin ollen lisää prosessien energiatehokkuutta. ORC-voimalasta saatua sähköä voidaankin näin ollen pitää hiilidioksidipäästöttömänä ja sitä voidaan verrata uusiutuviin energianlähteisiin kuten tuulivoimaan (Reunanen et al. 2000, 4–8.) Alla olevassa kuvassa 1 esitetään ORC-prosessin toimintaperiaate.



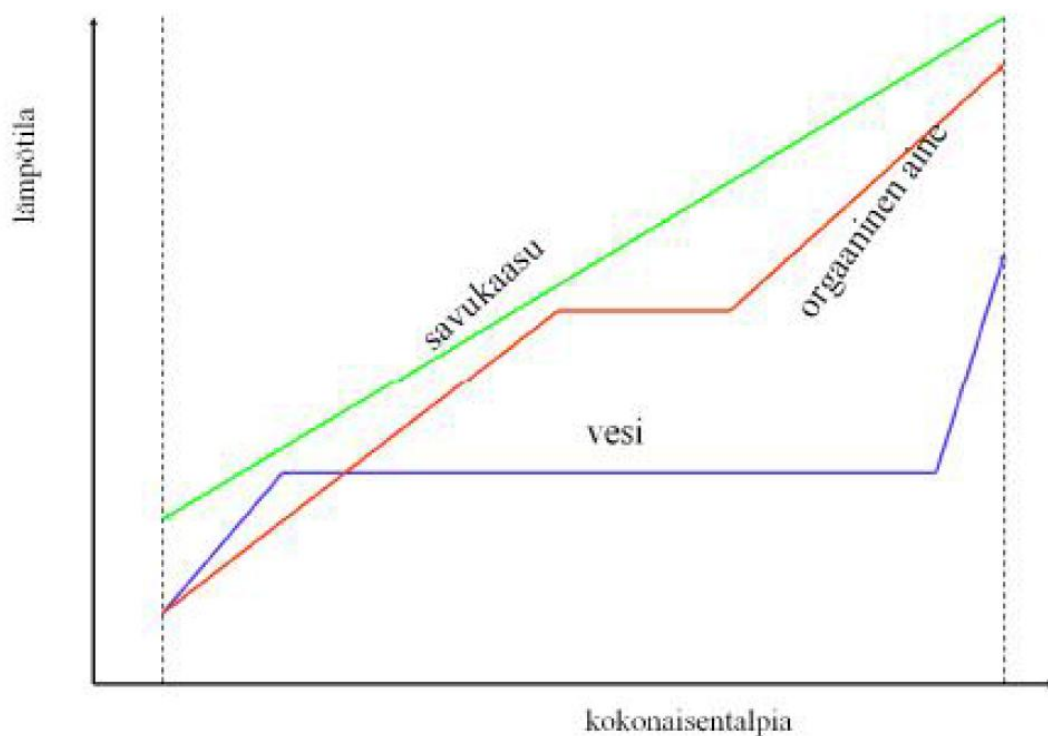
Kuva 1. ORC-prosessin periaate suoralla lämmöntuonnilla (Uusitalo 2010, 41).

Suurimmassa osassa ORC-voimaloita tuotetaan sähköä matalan lämpötilatason lämmönlähteillä tai hukkalämmöllä. Tyypillisiä lämmönlähteitä ovat geoterminen lämpö sekä polttomoottorien, kaasuturbiinien ja teollisuusprosessien hukkalämpö. Lisäksi ORC:tä voidaan käyttää, kun poltetaan pieniä määriä biomassaa,

kaatopaikkakaasua tai biokaasua, sekä hyödyntäessä aurinkokeräimien tuottamaa lämpöä. (Larjola 2011, 206–207.)

Veden sijaan orgaanisen kiertoaineen käytön merkittävin etu on höyryn tulistuminen turbiinissa paisumisen aikana. Tällöin vältetään lauhtumisen aiheuttamat ongelmat, joita esiintyy vesihöyryturbiineissa matalilla painetasoilla. Kiertoaineen tulistumisen vuoksi rekuperaattoria käytetäänkin ORC-prosessissa tulistuksen poistoon ennen lauhtutinta, jolla samalla esilämmitetään kiertoainetta ennen kattilaa. (Larjola 2011, 207.)

Orgaanisilla kiertoaineilla suhteellinen höyrystyslämpö on pienempi kuin vedellä, jolloin prosessilämpötila saadaan lähemmäksi lämmönlähteen lämpötilaa ja näin ollen suurempi osa energiasta saadaan hyötykäyttöön (Heinimö & Jäppinen 2005, 11–12). Tätä havainnollistetaan kuvassa 2.



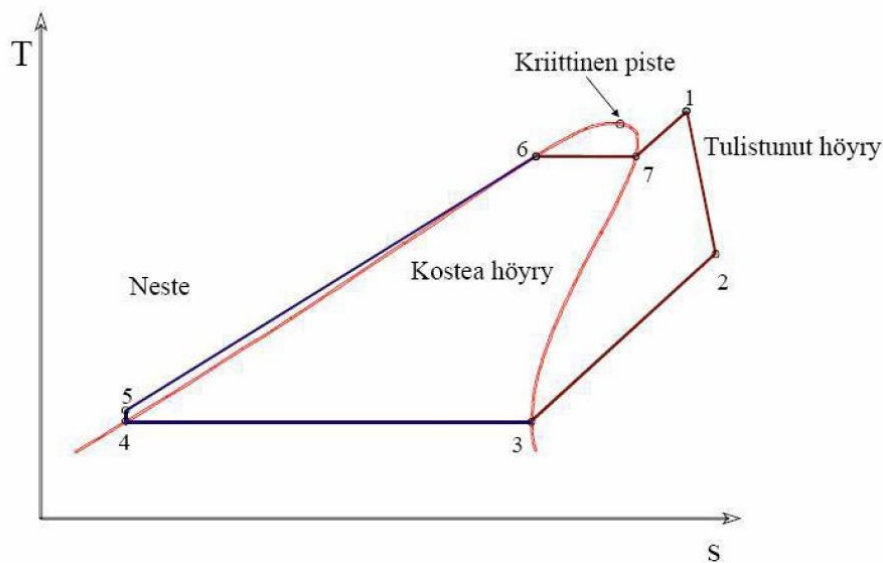
Kuva 2. ORC- ja vesihöyryprosessien kattilan lämpötiladiagrammien vertailu. Höyrystysvaiheet ovat kuvassa vaakasuorat osuudet. (Reunanen et al. 2000, 7).

Pienemmän suhteellisen höyrystyslämmön ansiosta on ORC-prosessin maksimilämpötila mahdollista saada korkeammaksi kuin vastaavassa vesihöyryprosessissa. Ominaisentalpian pudotus turbiinissa puolestaan saadaan pienemmäksi, jolloin on mahdollista käyttää yksivaiheisia turbiineja. (Heinimö & Jäppinen 2005, 11–12.) Yksivaiheisten turbiinien etuja ovat niiden pienemmät valmistuskustannukset ja yksinkertaisempi rakenne, joka helpottaa valmistamista (Aoun 2008, 43).

2.1 ORC-prosessin osat

ORC-prosessi esitetään alla olevassa kuvassa 3 lämpötila-entropiatasossa. Kuvan prosessi on ideaalinen, eli siinä ei ole huomioitu lämpö- ja painehäviöitä. Kuvan numeroidut osavaiheet ovat:

- 1–2: höyryn paisunta turbiinissa
- 2–3: tulistuksen poisto rekuperaattorissa
- 3–4: kylläisen höyryn lauhtuminen lauhduttimessa
- 4–5: nesteen paineenousu syöttöpumpussa
- 5–6: nesteen esilämmitys rekuperaattorissa ja kattilassa
- 6–7: höyrystyminen kattilassa
- 7–1: tulistuminen kattilassa.



Kuva 3. ORC-prosessi T, s -tasossa (Reunanen et al. 2000, 6).

Kuten edellä mainittiin, turbiinissa tapahtuvassa paisunnassa kiertoaine tulistuu, toisin kuin tavallisessa vesihöyryprosessissa. Orgaanisten kiertoaineiden ominaisentalpian pudotus turbiinissa on verrattain pieni, mikä mahdollistaa suuren massavirran käytön. Tämä yksinkertaistaa turbiinin suunnittelua ja rakennetta. Turbiinin suunnittelussa voidaan hyödyntää ominaispyörimisnopeutta N_s , joka esitetään alla olevassa yhtälössä 1. Hyvän hyötysuhteen saavuttamiseksi ominaispyörimisnopeuden tulisi olla yli 0,3–0,5, riippuen turbiinin rakenteesta. (Larjola 2011, 217–218.)

$$N_s = \frac{\omega \sqrt{q_{v,2}}}{\Delta h_s^{0,75}} \quad (1)$$

N_s = ominaispyörimisnopeus

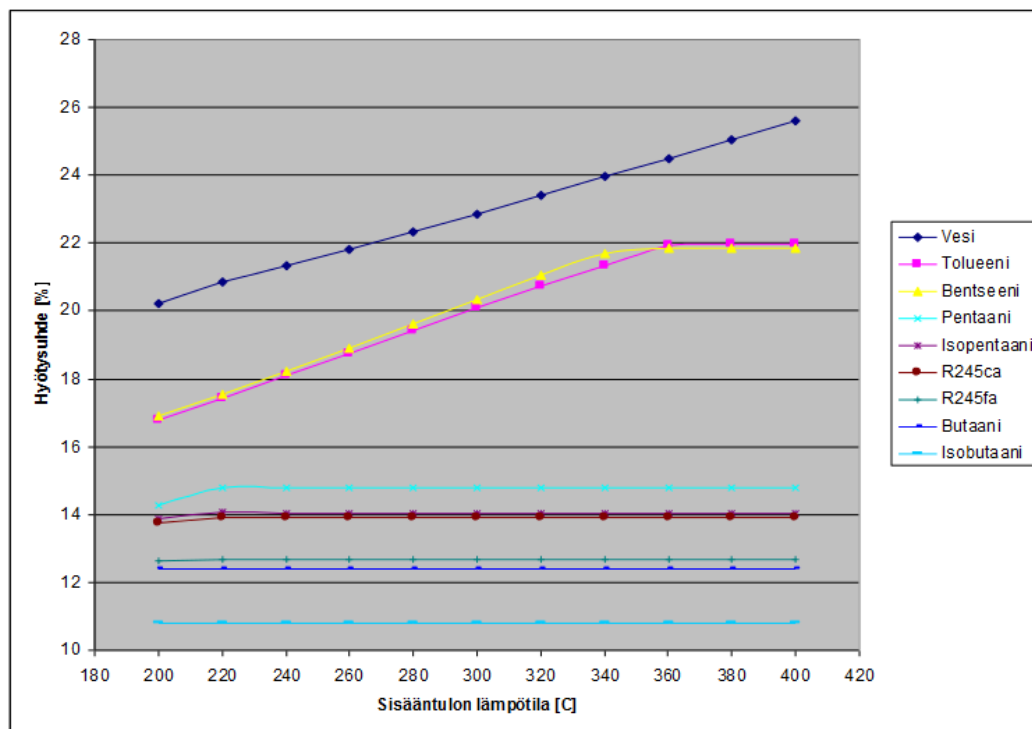
ω = akselin kulmanopeus [rad/s]

$q_{v,2}$ = tilavuusvirta turbiinin ulostulossa [m^3/s]

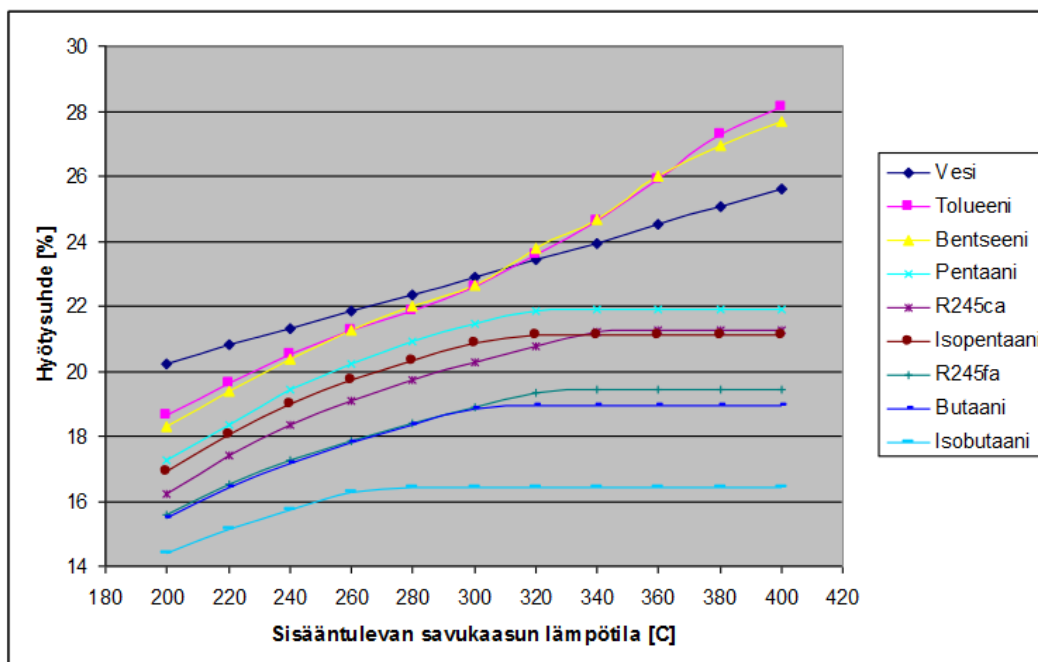
Δh_s = isentrooppinen ominaisentalpian muutos [kJ/kg]

Orgaanisella kiertoaineella ominaispyörimisnopeus saadaan helposti yli vaaditun rajan, mutta vesihöyryllä, jolla on suuri ominaisentalpian muutos, tämän saavuttamiseksi täytyy käyttää suurta pyörimisnopeutta tai useampi vaiheista turbiinia. ORC-prosessissa voidaankin saavuttaa korkea hyötysuhde käyttäen yksivaiheista turbiinia, kun vesihöyryprosessissa tarvitaan usein kolmivaiheinen turbiini. (Larjola 2011, 217–218.)

Lähes kaikissa ORC-voimaloissa turbiinilta tulevan paisuneen höyryn energia kannattaa hyödyntää kattilaan menevän nesteen esilämmitykseen rekuperaattorissa, kun kiertoaineena käytetään ainetta, joka tulistuu paisuessaan. Rekuperaattorilla voi olla useamman prosenttiyksikön vaikutus prosessihyötysuhteeseen, kuten voidaan huomata kuvista 4 ja 5.



Kuva 4. Prosessihyötysuhde ilman rekuperaattoria (Purhonen 2010, 21).



Kuva 5. Prosessihyötysuhde, kun käytössä on rekuperaattori (Purhonen 2010, 22).

Rekuperaattorina käytetään yleisesti rivallista levylämmönsiirintä niiden käytännöllisen koon vuoksi ja koska rekuperaattoriin tulevan nesteen ja höyryn lämmönsiirtoluvut voivat poiketa toisistaan merkittävästi. Tällöin rivoilla saadaan kasvatettua lämmönsiirtopinta-alaa, jolloin lämmönsiirrollisten ominaisuuksien erot tasoittuvat. (Aoun 2008, 74.)

ORC-voimalassa lauhdutin ja syöttöpumppu toimivat samalla periaatteella kuin tavallisessa vesihöyryvoimalassa. ORC-voimaloissa suositetaan lauhduttimina rekuperaattorien tavoin levylämmönsiirtimiä (Aoun 2008, 44). Levylämmönsiirtimien käytännöllisen koon ja yksinkertaisen rakenteen vuoksi ne ovat investointikustannuksiltaan halvempia kuin muut tähän tarkoitukseen sopivat lämmönsiirtimet.

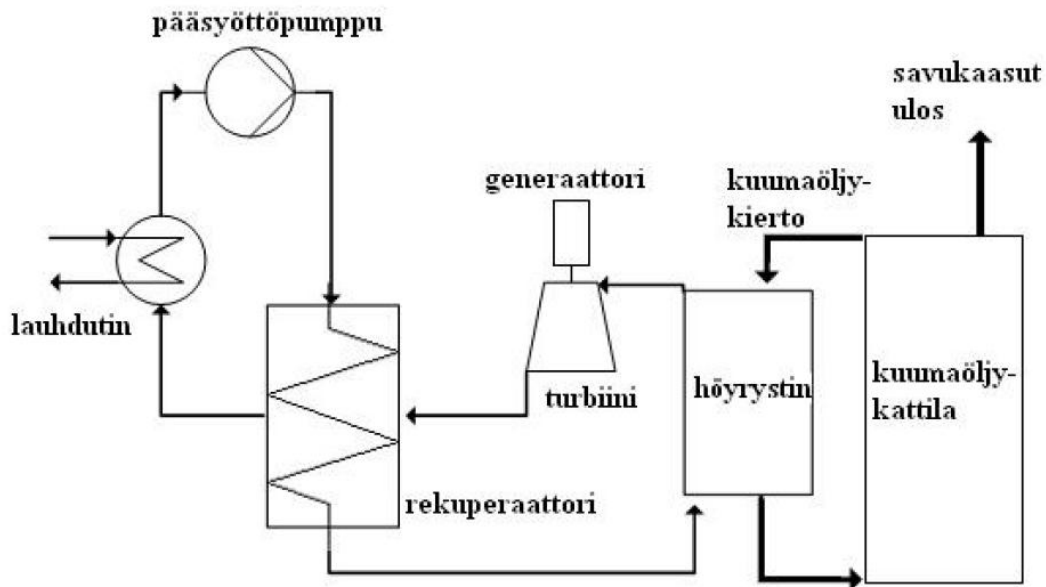
ORC-voimaloissa syöttöpumpun tulee kuitenkin olla suurempi kuin vastaavassa vesihöyryvoimalassa ORC-voimaloissa käytettävän suhteellisesti suuremman

massavirran vuoksi. Tämä nostaa pumpun osalta kustannuksia ja pienentää hyötysuhdetta pumpun sähkön käytön vuoksi. (Vankeirsbilck et al. 2011, 3.)

2.2 Lämmöntuontivaihtoehdot ORC-prosessiin

Lämmöntuonti ORC-prosessiin tapahtuu joko suoraan lämmönlähteestä ORC-prosessin höyrystimelle tai erillisen termooiljypiirin kautta (Heinimö & Jäppinen 2005, 16). ORC-prosessissa suorassa lämmöntuonnissa höyrystimessä voidaan yhdellä lämmönsiirtimellä hoitaa kiertoaineen esilämmitys, höyrystyminen ja tulistus. Lämmönlähteenä voidaan käyttää esimerkiksi jonkin toisen prosessin savukaasuja. (Uusitalo 2010, 40.)

Termooiljypiirirytkentä on tapa, jota käytetään kaikissa tähän mennessä toteutetuissa biomassaa käyttävissä ORC-voimalaitoksissa ja monissa teollisuuden hukkalämpöä käyttävissä laitoksissa. Termooiljypiirissä lämpö siirretään ensin lämmönlähteessä termooiljypiiriin, josta vasta lämpö siirretään ORC-prosessiin. Tällöin pystytään tasoittamaan lämmönlähteen tehon vaihteluita ja suojaamaan ORC-prosessin kiertoainetta mahdolliselta savukaasujen liian korkealta lämpötilalta. (Heinimö & Jäppinen 2005, 21–23.) ORC-prosessi termooiljypiirirytkennällä esitetään kuvassa 6.



Kuva 6. ORC-prosessin periaate termooiljyriikitykennällä (Uusitalo 2010, 42).

Termooiljypiirin etuna on myös mahdollisuus pitää ORC-prosessin ja kattilan suunnittelu erillään, jolloin esimerkiksi biomassakattilaa ei tarvitse suunnitella orgaanista kiertoainetta varten. Tällöin saadaan aikaiseksi yksinkertaisempi systeemi. Lähes kaikki ORC-voimaloiden valmistajat tarjoavat prosessejaan pääasiassa termooiljyriillä. (Larjola 2011, 222–230.)

Termooiljypiirissä lämpötilat voivat olla 120 asteesta aina yli 400 asteeseen saakka. Termooiljypiiriin kuuluu lämmönlähteen ja ORC-prosessissa olevien lämmönsiirtimien lisäksi öljynsiirtoputkisto, öljynkierrätyspumput sekä varasto- ja paisuntasäiliöt. Termooiljypiiri voi toimia paineistettuna tai paineistamattomana. Paineistettua piiriä tarvitaan, kun käyttölämpötila on korkeampi kuin käytetyn öljyn kiehumispiste. (Heinimö & Jäppinen 2005, 21–22.)

Termooiljypiirissä käytetyt lämmönsiirtoöljyt voidaan jakaa mineraaliöljyihin, synteettisiin öljyihin ja muihin öljyihin, joihin kuuluu muun muassa silikoniöljyt. Mineraaliöljyjen suurin käyttölämpötila on noin 315 °C ja joitain synteettisiä öljyjä

voidaan käyttää jopa 410 °C lämpötilassa. Silikoniöljyjä käytetään, kun mahdollisen vuodon takia öljyn tulee olla yhteensopiva muun prosessin kanssa. Lämmönsiirtoöljyjen ominaisuudet heikkenevät käytön myötä ja korkea lämpötila saattaa hajottaa öljyn rakennetta, minkä vuoksi öljy on säännöllisesti vaihdettava. (Heinimö & Jäppinen 2005, 22.)

2.3 Orgaaniset kiertoaineet

ORC-prosessin kiertoaineena voidaan käyttää periaatteessa mitä tahansa ainetta, joka esiintyy prosessin toiminta-alueella sekä nesteinä, että kaasuna. Kuitenkin nykyään olemassa olevissa ORC-voimaloissa käytetään vain muutamia tiettyjä kiertoaineita, jotka ovat valikoituneet muiden ominaisuuksiensa perusteella. Näitä aineita ovat n-pentaani, silikoniöljyt ja tolueeni. (Heinimö & Jäppinen 2005, 17.) Prosessin toiminta-alueeseen sopivimman kiertoaineen valinta on tärkeää, sillä ORC-prosessin hyötysuhde riippuu pääasiassa kiertoprosessin toimintaolosuhteista ja kiertoaineen termodynaamisista ominaisuuksista (Aoun 2008, 31–34).

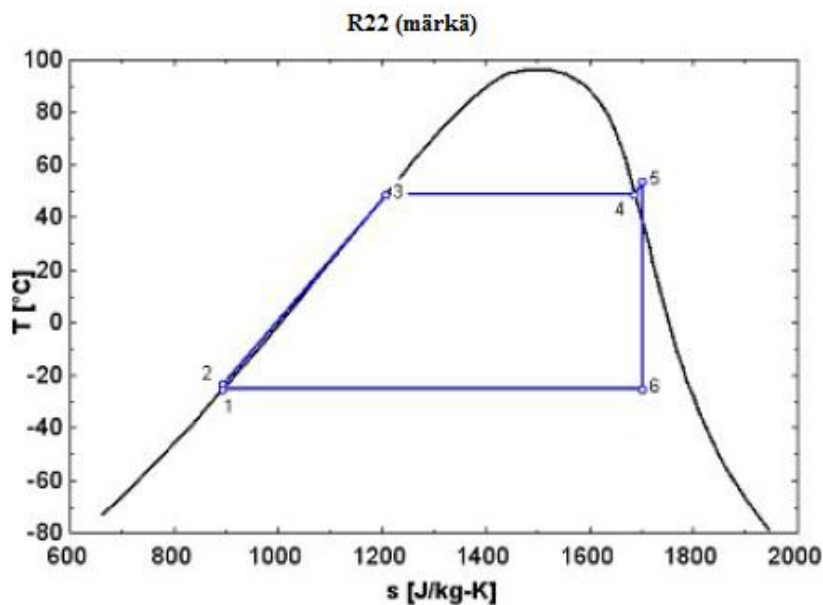
Termodynaamisista ominaisuuksista merkittäviä ovat muun muassa tiheys, kiehumispiste ja kylästyskäyrän muoto. Tiheys vaikuttaa suoraan tarvittavan turbiinin kokoon niin, että suuremman tiheyden omaavalla aineella tarvitaan pienempi turbiini. (Aoun 2008, 32–33 & 41–44.) Korkeampi kiehumispiste puolestaan mahdollistaa matalampien painetasojen käytön verrattuna ympäröivään paineeseen (Vankeirsbilck 2011, 3). Prosessin lauhtumispaine tulisi kuitenkin pitää ympäröivää painetta korkeampana, jotta prosessiin ei pääsisi vuotamaan ilmaa. Vuodon kautta prosessiin pääsevä happi voi aiheuttaa kiertoaineen kemiallista hajoamista, jolloin prosessiin saattaa muodostua lauhtumattomia kaasuja. Lauhtumattomat kaasut heikentävät prosessin lämmönsiirtoa ja prosessin toimintaa. (Heinimö & Jäppinen 2005, 17.)

Kiertoaineet voidaan jakaa kylästyskäyrän muodon mukaan niin sanottuihin märkiin, kuiviin ja isentrooppisiin aineisiin. Märillä kiertoaineilla, kuten vedellä ja ammoniakilla, paisunta turbiinissa tapahtuu osittain kyläisellä alueella. Tämä asettaa

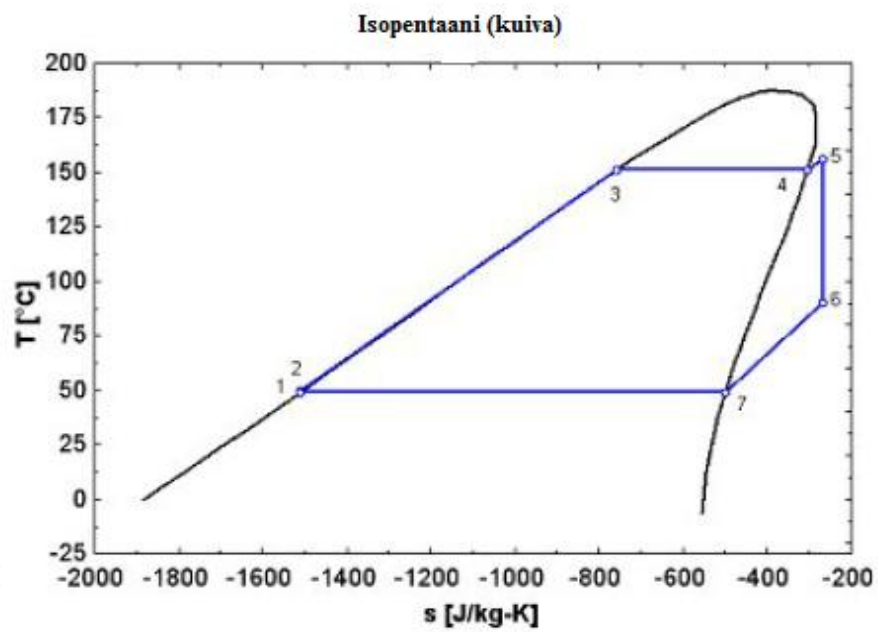
paljon vaatimuksia turbiinin suunnittelulle nestepisaroiden välttämiseksi turbiinin loppupäässä. Nestepisaroiden välttämiseksi kiertoainetta voidaan joutua tulistamaan. (Aoun 2008, 34–35.) Märkiä kiertoaineita tulisikin välttää ORC-prosessissa niiden ongelmallisuuden vuoksi.

N-pentaani ja muut kuivat kiertoaineet tulistuvat paisunnan aikana, johtuen kyllästyskäyrän muodosta. Tällöin kiertoainetta ei tarvitse tulistaa ennen turbiinia, mutta toisaalta osa hyödynnettävästä energiasta menetetään lauhduttimessa. Osa energiasta voidaan kuitenkin ottaa talteen rekuperaattorilla. (Aoun 2008, 35.)

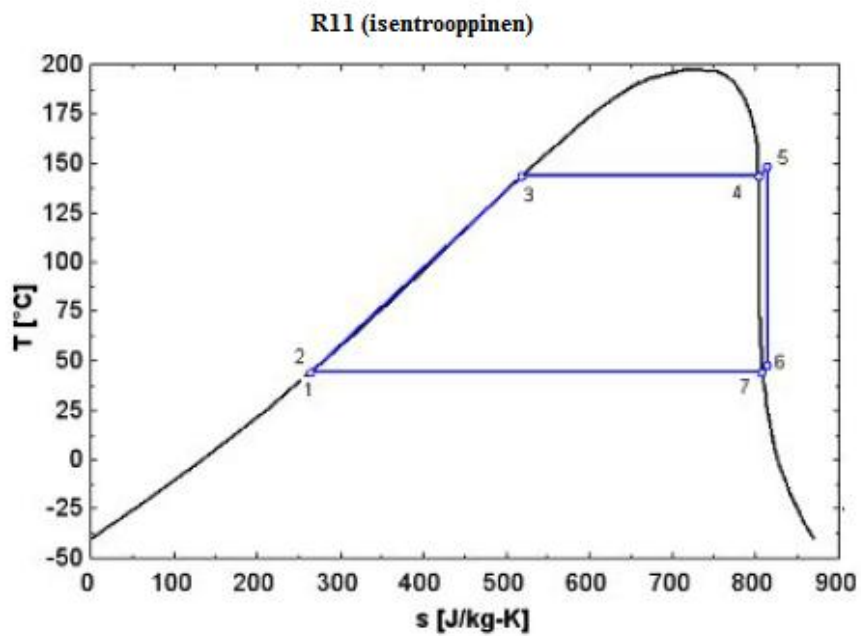
Isentrooppisilla kiertoaineilla, kuten R-124, paisunta tapahtuu pystysuoraa höyrystymiskäyrää pitkin. Tällöin turbiiniin tuleva kylläinen höyry pysyy kylläisenä, eikä lauhdu paisunnan aikana. (Aoun 2008, 35.) Alla olevissa kuvissa 7–9 havainnollistetaan märkä, kuiva ja isentrooppinen kierto lämpötila–entropia – tasossa.



Kuva 7. Märkä kiertoprosessi T, s – tasossa (Quoilin 2011, 95).



Kuva 8. Kuiva kiertoprosessi T, s – tasossa (Quoilin 2011, 95).



Kuva 9. Isentrooppinen kiertoprosessi T, s – tasossa (Quoilin 2011, 95).

Termodynaamisten ominaisuuksien lisäksi kiertoainetta valittaessa tulee huomioida niiden terminen pysyvyys, sillä korkeissa lämpötiloissa orgaanisilla aineilla tapahtuu kemiallista hajoamista. Kemiallisen hajoamisen seurauksena kiertoaineen ominaisuudet muuttuvat heikentäen prosessin toimivuutta. (Heinimö & Jäppinen 2005, 17.) Aine ei myöskään saisi olla korrodoivaa tai reagoida materiaalien kanssa, joihin se on kosketuksissa prosessissa (Aoun 2008, 34).

Kiertoaineen valinnassa tulee aineominaisuuksien lisäksi huomioida aineen paloturvallisuus, myrkyllisyys ja ympäristövaikutukset. Orgaanisten aineiden sisältämän hiilen vuoksi ne ovat palavia aineita, jolloin esimerkiksi prosessin toiminta itsesyttymislämpötilaa korkeammassa lämpötilassa aiheuttaa tulipalovaaran vuodon sattuessa. (Heinimö & Jäppinen 2005, 17.) Vuotojen mahdollisuuden vuoksi kiertoaine ei myöskään saisi olla ihmisen terveydelle haitallinen tai myrkyllinen (Quoilin 2011, 94).

Ympäristönäkökulmasta katsottuna ORC-prosessin kiertoaineeksi tulisi valita aine, jonka ODP – arvo (Ozone Depleting Potential eli otsonikadon edistämisaikutus) ja GWP – arvo (Global Warming Potential eli ilmaston lämpenemisen edistämisaikutus) olisivat mahdollisimman pieniä. Nykyään kaikkien aineiden ODP – arvo on nolla tai lähellä sitä, sillä korkean ODP – arvon omaavat aineet on kielletty Montrealin pöytäkirjalla 1987. (Quoilin 2011, 94–95.) Näin ollen kiertoaineen valinnassa on tärkeämpää huomioida aineen GWP – arvo.

Kiertoaineen valinnassa on hyvä huomioida myös niiden saatavuus ja hinta. Aineet, joita käytetään jo muissa laitteissa ja teollisuuden aloilla, ovat helpommin saatavilla ja halvempia. (Quoilin 2011, 95.)

Tähän päivään mennessä ei ole pystytty kehittämään täydellistä ainetta, joka täyttäisi kaikki edellä mainitut kriteerit. Käytettäviksi kiertoaineiksi ovat valikoituneet muutamat tietyt aineet, joista prosessiin sopivin valitaan yleensä lämpötilatasojen perusteella. (Aoun 2008, 34.) Esimerkiksi n-pentaania käytetään alle 200 °C lämpötiloissa (Heinimö

& Jäppinen 2005, 18). Alla olevassa taulukossa 1 vertaillaan muutamaa yleisesti käytettyä kiertoainetta ja niiden ominaisuuksia.

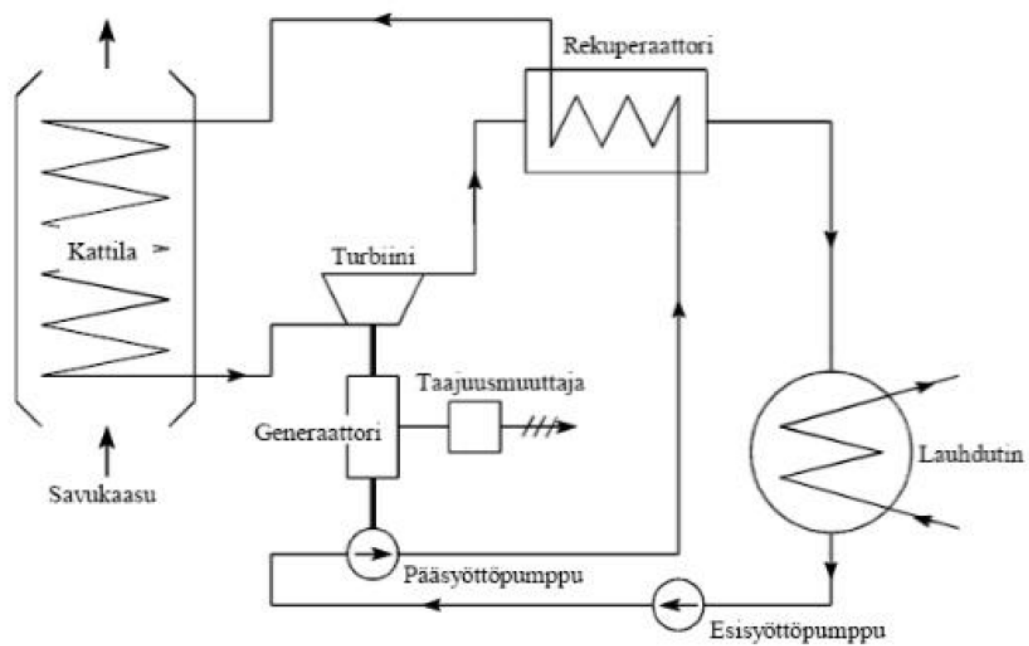
Taulukko 1. Yleisesti käytettyjen kiertoaineiden ominaisuuksia (Heinimö & Jäppinen 2005, 19).

Kiertoaine Ominaisuus	N-pentaani	Oktametyyli- trisiloksaani (silikoniöljy)	Polyfenyyli- metyylidime- tyylisiloksaanit (silikoniöljyjä)	Tolueeni
Molekyylikaava	C_5H_{12}	$C_8H_{24}O_2Si_3$	$(C_7H_8OSi)_n$ $(C_2H_6OSi)_m$	C_7H_8
Moolimassa [g/mol]	72,2	236,5	2000–2200	92,1
Tiheys [kg/m^3]	630 (20 °C)	820 (25 °C)	107 (25 °C)	870 (20 °C)
Sulamispiste [°C]	-129	-86	<-40	-95
Kiehumispiste [°C]	36	152–153	>205	111
Leimahduspiste [°C]	-49	39	205	4
Itsesyttymispiste [°C]	309	418	482	480
Syttymisraja ilmassa [tilavuus %]	1,5–7,8	0,9–13,8	ei tietoa	1,1–7,1
Viskositeetti (25 °C) [Pas]	224	820	134 000	560
Ominaislämpökapasiteetti (25 °C) [kJ/kgK]	2,32	ei tietoa	1,42–1,63	1,71

Ominaisuus \ Kiertoaine	N-pentaani	Oktametyyli- trisiloksaani (silikoniöljy)	Polyfenyyli- metyylidime- tyylisiloksaanit (silikoniöljyjä)	Tolueeni
Höyrystymislämpö (25 °C) [kJ/kg]	366	ei tietoa	ei tietoa	413
Vaarallisuus	Erittäin helposti syttyvää Myrkyllistä vesieliöille Haitallista vesiympäristölle Terveydelle haitallista	Palavaa Ärsyttävää Voi olla haitallista vesieliöille	Ärsyttävää	Helposti syttyvää Terveydelle haitallista hengitettynä

2.4 Suurnopeus ORC-voimala

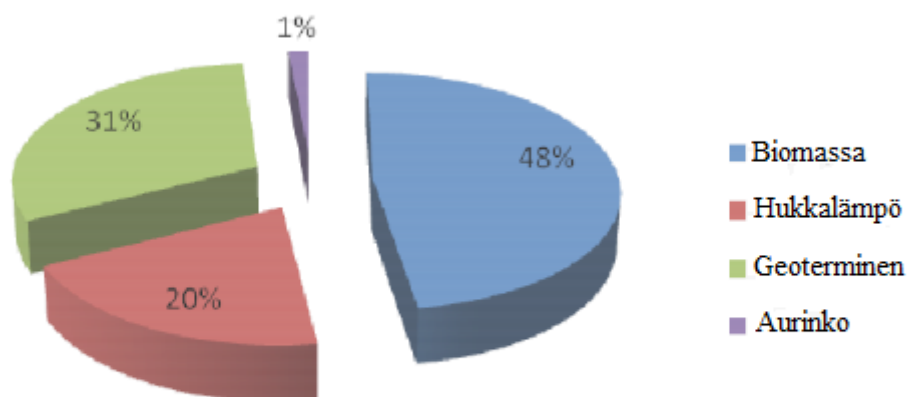
Suurnopeus ORC-voimalan lisäedut tavalliseen verrattuna ovat pieni koko, pitkä käyttöikä, hermeettisyys, öljyttömyys ja vähäinen huollon tarve (Larjola 1995, 234). Suurnopeus ORC-voimalassa turbiini, generaattori ja pääsyöttöpumppu sijoitetaan samalle akselille, jolloin turbiini pyörittää kumpaakin muuta osaa. Vaihteita ei käytetä, jolloin generaattorin ja pumpun pyörimisnopeudet ovat samat kuin turbiinin. (Triogen 2013a.) Jotta suurnopeus ORC-voimalalla päästäisiin hyvään hyötysuhteeseen, täytyy turbiinin pyörimisnopeus olla 20 000 – 30 000 kierrosta minuutissa ja näin ollen generaattorin tuottaman suurtaajuusvirran vuoksi voimala täytyy kytkeä sähköverkkoon taajuusmuuttajan kautta. (Larjola et al. 2011, 159.) Alla olevassa kuvassa 10 esitetään suurnopeus ORC-voimalan toimintaperiaate.



Kuva 10. Suurnopeus ORC-voimalan toimintaperiaate. Turbiini, generaattori ja pääsyöttöpumppu kytketään samalle akselille. Esisyöttöpumppua käytetään kavitoinnin välttämiseksi pääsyöttöpumpulla. (Larjola et al. 2011, 160.)

3 ORC-VOIMALOIDEN VALMISTAJAT

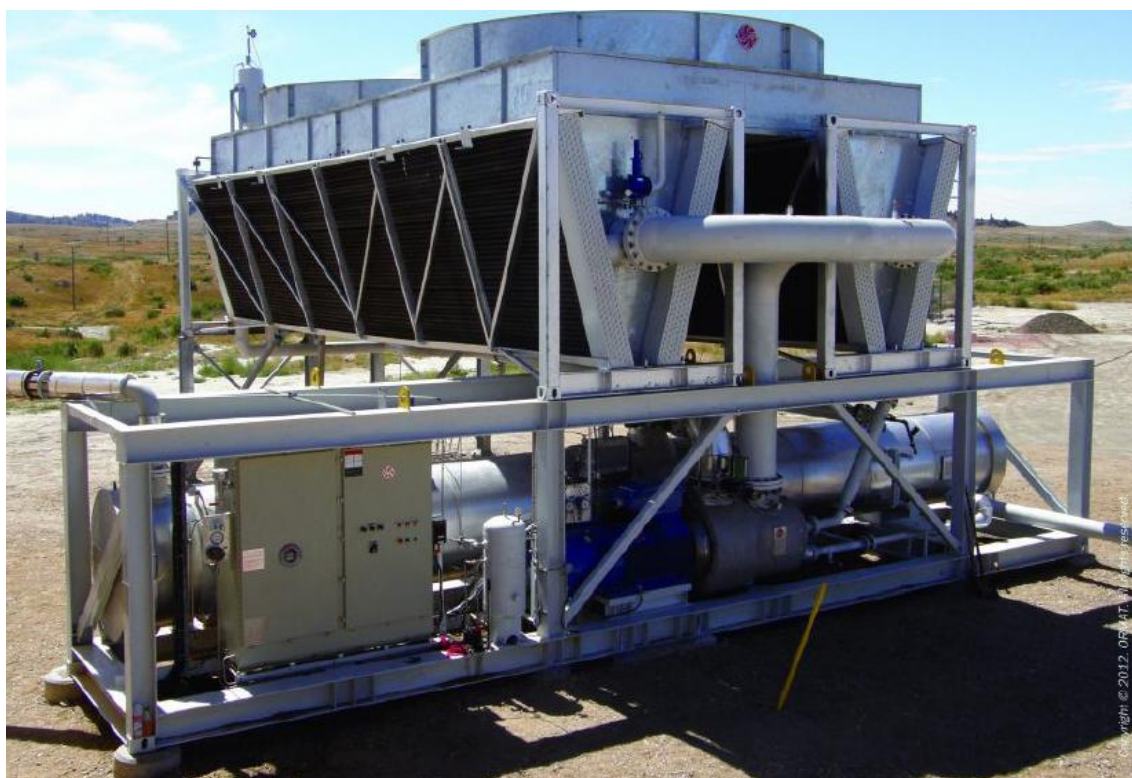
Maailmanlaajuisesti ORC-voimaloita on käytössä useita satoja ja niiden yhteisteho on noin 2000 MW_e. Suurin osa maailman ORC-voimaloista käyttää energianaan biomassaa ja lähes kaikki muut laitokset ovat joko geotermisiä tai hukkalämmöntalteenottolaitoksia. Aurinkoenergian hyödyntäminen on tällä hetkellä vielä erittäin vähäistä. Suurimmat valmistajat ovat Turboden ja Ormat. Molemmat valmistajat tarjoavat laitoksiaan pääasiassa termooiljypiirikytkennällä. (Quoilin & Lemort 2009, 6.) Eri käyttösovellusten osuudet esitetään alla olevassa kuvassa 11.



Kuva 11. ORC-voimaloiden määrän jakautuminen eri energianlähteiden mukaan (Quoilin & Lemort 2009, 6).

Turbodenilla on määrällisesti eniten laitoksia, lähes 300, jotka sijaitsevat 29 eri maassa ja niiden yhteenlaskettu sähköteho on noin 335 MW_e. Turbodenin tarjoamat laitokset ovat kooltaan 200 kW_e – 15 MW_e. Turboden toimittaa pääasiassa biomassaa käyttäviä laitoksia, mutta yhtiöltä löytyy myös laitoksia teollisuuden hukkalämmön, geotermisen energian ja aurinkokeräimien hyödyntämiseen. (Turboden 2013a.)

Ormat on puolestaan tehollisesti suurin valmistaja, sillä sen laitosten yhteisteho on noin 1600 MW_e. Suurin yksittäinen laitos on Filippiineillä ja sen teho on 132 MW_e. Filippiinien ja lähes kaikkien muidenkin Ormatin laitosten energianlähteenä on geoterminen energia. (Ormat 2013.) Kuvassa 12 esitetään esimerkki yhdestä Ormatin ORC-laitoksesta.



Kuva 12. Ormatin 200 kW ilmajäähdytteinen geoterminen ORC-voimalaitos Wyomingissa, Yhdysvalloissa (Ormat 2013).

Turbodenin ja Ormatin lisäksi markkinoilla on useita pienempiä valmistajia, jotka ovat erikoistuneet johonkin tiettyyn energianlähteeseen tai tekniikkaan. ORC-valmistajia ovat esimerkiksi Adoratec, GMK, Triogen, Cogen, Enefttech ja Electratherm. Adoratec tarjoaa 300 kW_e – 2,4 MW_e ORC-laitoksia, joiden lämmönlähteenä toimii kiinteä biomassa (Adoratec 2013). GMK puolestaan on erikoistunut biokaasua käyttävien kaasumoottoreiden hukkalämmön hyödyntämiseen ja näiden laitosten teho on välillä 500 kW_e – 5 MW_e (GMK 2013).

Triogenin erikoisuus on laitoksissa käytettävä suurnopeustekniikka, josta kerrotaan kappaleessa 2.4. Triogenin laitosten koko on 165 kW_e ja tarvittaessa laitoksia pystytään kytkemään useampi rinnan (Triogen 2013b). Triogenin mukaan heidän laitoksiaan voidaan käyttää polttomoottori-, biomassaa- ja kaatopaikka- sekä biokaasulaitosten hukkalämmön hyödyntämiseen (Triogen 2014b).

Vaikka maailmalla ORC-voimalaitoksia on jo useita satoja, on Suomessa kaupallisessa energiantuotantokäytössä vain muutama ORC-laitos. Suomessa on kaksi biomassaa polttavaa CHP-laitosta, joissa sähkö tuotetaan Turbodenin ORC-yksiköllä. Toinen laitoksista sijaitsee Toholammilla ja se tuottaa lämpöä 8,2 MW ja sähköä 1,3 MW. (Toholammin Energia Oy, 2013). Posiolla sijaitsevan laitoksen lämpöteho on 4 MW ja sähköteho 0,73 MW (Enerec 2012). Lisäksi Ämmässuon kaatopaikan kaasuvoimalassa on 1,3 MW_e tehoinen ORC-yksikkö, joka hyödyntää voimalan kaasumoottorin pakokaasujen hukkalämpöä (HSY 2014). Edellä mainittujen lisäksi Espooseen on rakenteilla Triogenin 125 kW_e ORC-laitos, jonka lämmönlähteenä ovat viemärikaasut (Triogen 2014a).

Mikrokokoluokassa ORC-yksiköiden valmistajia on vain muutamia ja näillä yhtiöillä ei ole vielä merkittävästi kaupallisia sovelluksia. Vaikka mikrokokoluokassa ORC-valmistajien toiminta on vähäistä, esitellään alla muutamia toimijoita esimerkin vuoksi.

Cogen tekee kotitalouksille ja toimistorakennuksille tarkoitettuja ORC-laitoksia. Cogen on erikoistunut 1 kW_e – 20 kW_e kokoisiin laitoksiin, jotka ottavat energian aurinkokeräimien avulla tai suoraan kaukolämpöverkosta. Cogenin tekniikassa turbiini korvataan yksisyylinterisellä, kaksoismännällä, jossa männät liikkuvat vastakkaisiin suuntiin. Cogenin mukaan tällä toteutustavalla on mahdollista päästä 65 % Carnot-hyötysuhteesta. (Cogen 2013.)

Eneftech tuottaa samoin pienen koko luokan (10 kW_e – 30 kW_e) ORC-laitoksia kotitalous- ja toimistokäyttöön. Eneftechin laitokset perustuvat hermeettiseen Scroll-turbiiniin. Eneftechin hyödyntämät lämmönlähteet ovat teollisuuden hukkalämpö, biomassaa, geoterminen energia, aurinko ja kaukolämpöverkko. (Eneftech 2013.)

Electratherm valmistaa alle 65 kW_e ORC-voimaloita geotermisen energian, biomassan ja biokaasun hyödyntämiseen. Electrithermin ORC-voimalan turbiini toteutetaan kaksoisruuviturbiinilla, josta on esimerkki kuvassa 13. Electrithermin mukaan kaksoisruuviturbiinin ansiosta ORC-laitoksessa voidaan käyttää kiertoaineena myös märkiä orgaanisia kiertoaineita, joka laajentaa huomattavasti käytettävien kiertoaineiden valikoimaa. (Electratherm 2013.)



Kuva 13. Kaksoisruuviturbiini (Electratherm 2013).

Yllä olevan tekstin perusteella voidaan huomata, että suurin osa ORC-laitoksista käyttää lämmönlähteenään biomassaa, geotermistä energiaa tai teollisuuden hukkalämpöjä ja näihin myös suurimmat valmistajat keskittyvät. Suurimpien valmistajien laitosten teho on, poikkeuksia lukuun ottamatta, yli 200 kW_e. Pienemmät valmistajat ovatkin keskittyneet teho- ja lämmönlähtealueille, joissa tarjonta on vähäisempää. Mikrokokoluokassa (alle 50 kW_e) varsinkin turbiinitekniikka vaikuttaa olevan tärkeässä roolissa hyvän hyötysuhteen saavuttamiseksi ja tällä alueella valmistajilla onkin moninaisia ratkaisuja.

4 MIKRO ORC-VOIMALAT JA NIIDEN SOVELLUSKOHTEET

Mikro ORC-voimalat omaavat suuren potentiaalinsähkön pientuotannossa matalien lämpötilatasojen hyödyntämisen ansiosta. Nykyään mikrokokoluokan (alle 50 kW_e) sähköntuotannon pääteknologiat ovat polttomoottorit, Stirling-moottorit ja polttokennot. Lisäksi muita potentiaalisia teknologioita ovat mikrokaasuturbiinit ja mikro ORC-voimalat. Polttomoottorit ja polttokennot ovat hyötysuhteeltaan parhaita vaihtoehtoja, mutta ne pystyvät hyödyntämään vain tiettyä polttoainetta ja lisäksi polttokennot ovat suhteellisen kalliita. Mikrokaasuturbiinit puolestaan omaavat huonon sähköntuottohyötysuhteen. (Oudkerk et al. 2013, 46–47.)

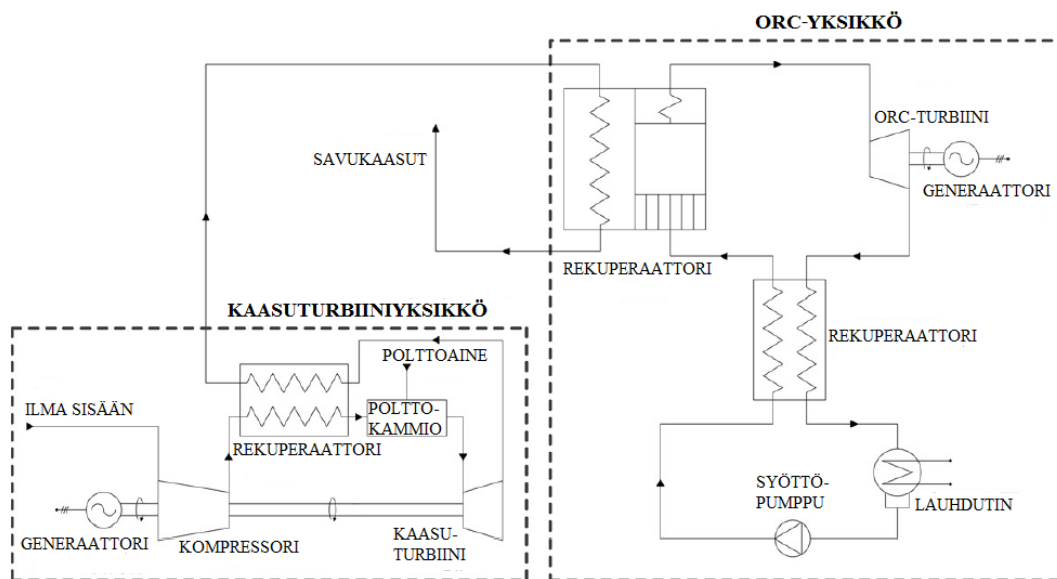
ORC-voimaloiden etuna edellä mainittuihin nähden onkin laaja polttoainevalikoima, sillä ORC-voimalat voivat hyödyntää esimerkiksi niin biomassaa kuin aurinkoenergiaakin. Lisäksi mikro ORC-voimalat pystyvät hyödyntämään matalampia lämpötilatasoja kuin muut edellä mainituista. (Oudkerk et al. 2013, 46–47.)

Yksi merkittävimmistä ongelmista mikro ORC-voimaloiden kanssa ovat turbiinit. Hyviä kaupallisia turbiineja ei ole saatavilla varsinkaan kokoluokassa 1–10 kW_e, jolloin huonon turbiinihyötysuhteen vuoksi jää ORC-voimalan kokonaishyötysuhde alhaiseksi (Liu et al. 2012, 381–382). Tutkimusten perusteella Scroll-turbiinit ovat osoittautuneet parhaiksi valinnoiksi mikrokokoluokassa niiden hyvän paisuntasuhteen, yksinkertaisen rakenteen ja pienten valmistuskustannusten takia. Scroll-turbiineja on myös suhteellisen helppo skaalata pienempään kokoluokkaan. (Qiu et al. 2011, 3307.)

Mikro ORC-voimalan kiertoainetta valittaessa on huomioitava lämmönlähteiden ja siten myös turbiinin sisäänmenon lämpötilat, jotka ovat tyypillisesti niin alhaisia, että muiden kuin kuivien kiertoaineiden käyttö ORC-prosessissa on haastavaa (Wang et al. 2013, 821–822).

4.1 Kaasuturbiinit

Pienimmissä kaasuturbiinien kokoluokissa perinteinen kombikytkentä, jossa kaasuturbiinin savukaasuja hyödynnetään höyryturbiiniprosessin lämmönlähteenä, ei ole enää kannattava vaihtoehto lämpötilatasojen pudotessa matalalle tasolle (Carcasci et al. 2013, 1). Kun savukaasujen lämpötilataso ei ole riittävä vesihöyryprosessia varten, voidaan savukaasujen lämpö hyödyntää esimerkiksi lämmöntuotannossa, jolloin saadaan nostettua prosessin kokonaishyötysuhdetta (Clemente et al. 2013, 357). Jos lämmöntuotannolle ei ole tarvetta, on savukaasujen lämpöä mahdollista hyödyntää ORC-prosessin avulla lisäsähkön tuottamiseen, sillä matalilla lämpötilasoilla ORC-prosessi on osoittautunut lupaavaksi vaihtoehdoksi sähköntuottohyötysuhteen nostamiseksi kaasuturbiiniprosessissa. (Carcasci et al. 2013, 1.) Alla olevassa kuvassa 14 esitetään esimerkki ORC-prosessin kytkennästä kaasuturbiiniin.



Kuva 14. ORC-prosessin kytkentä kaasuturbiinin kanssa (Clemente et al. 2013, 357).

100 kW_e kokoluokassa kaasuturbiinien hyötysuhteet ovat noin 30 %, mikä on hieman vähemmän kuin vastaavan kokoluokan polttomoottoreilla (Invernizzi et al. 2007, 100). Osittain tästä johtuen polttomoottorit ovatkin tässä kokoluokassa kannattavampia ja suosittumia sähköntuotantoon kuin kaasuturbiinit. 100 kW_e kaasuturbiineilla, joissa on

käytössä rekuperaattori, tyypillinen savukaasujen lämpötila on välillä 200–300 °C, mikä on erinomainen lämpötilataso ORC-prosessille (Clemente et al. 2013, 356). ORC-prosessin avulla tämän kokoluokan kaasuturbiinin hyötysuhde voidaankin nostaa jopa 40 %:iin (Invernizzi et al. 2007, 109). Tällöin ORC-prosessin avulla kaasuturbiinista voidaan tehdä polttomoottoreita kannattavampi vaihtoehto sähköntuotannon toteuttamiseksi.

Pienempiin kokoluokkiin mentäessä ORC-prosessi parantaa kaasuturbiinin sähköntuottohyötysuhdetta suhteessa enemmän, sillä kaasuturbiinien hyötysuhteen huononevat pienempiin kokoluokkiin mentäessä, ORC-prosessin hyötysuhteen pienetessä suhteellisesti vähemmän. Esimerkiksi Magon ja Luckin (2013, 1329) tekemän tutkimuksen mukaan ORC-prosessi paransi 200 kW_e kaasuturbiinin sähköntuottohyötysuhdetta 20 % ja 30 kW_e kaasuturbiinin 30 %.

Yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa ORC-prosessi parantaa kaasuturbiinin hyötysuhdetta lämmöntuotannon kustannuksella. Tämän vuoksi ORC-prosessin hyödyntäminen pienen kokoluokan kaasuturbiinien yhteydessä ei aina ole kannattavaa. ORC-prosessia kannattaakin hyödyntää kaasuturbiinien yhteydessä vain silloin, kun lämmöntarve suhteessa sähköntarpeeseen on pieni (Mago & Luck 2013, 1332).

4.2 Pienet biomassakattilat

Biomassan polton yhteydessä tärkein tehtävä on tuottaa lämpöä ja sivutuotteena on mahdollista saada sähköä ORC-prosessin avulla (Liu et al. 2012, 374–375). Biomassaa poltettaessa käytetään polttoon erillistä kattilaa ja lämpö tuodaan ORC-prosessiin esimerkiksi termoöljypiirin avulla. Biomassa on suhteellisen halpa polttoaine, mutta kuljetuskustannukset ovat merkittävässä roolissa biomassan hinnassa. Tämän vuoksi biomassaa on kannattavampaa hyödyntää paikallisesti, mahdollisimman lähellä sen tuotantopaikkaa. Jotta biomassan hankintakustannukset saadaan pidettyä mahdollisimman alhaisina, voi olla kannattavaa hajauttaa kaukolämmöntuotanto useammalle pienemmälle laitokselle yhden suuren laitoksen sijaan. Tällöin on

mahdollista lämmön lisäksi tuottaa sähköä ORC-prosessin avulla, jos lämpötilatasot ovat liian alhaiset tavallista Rankine-prosessia varten. (Turboden 2013b, 3–12.)

Pienimmissä kokoluokissa (alle 25 kW_e) ORC-prosessin käyttö biomassan kanssa ei ole suosittua ja yleisiä kaupallisia sovelluksia ei tällä hetkellä ole. Tässäkin kokoluokassa on kuitenkin mahdollista päästä sähköntuotantohyötysuhteessa välille 10–20 % ja tällöin yhdistettynä lämmöntuotantoon kokonaisyötysuhteeksi saadaan 70–85 % (Algieri & Morrone 2013, 4–7). ORC-prosessin käytön vähäisyys tässä kokoluokassa johtunee sähköntuotannon investointikustannuksista, jotka voivat nousta kohtuuttomiksi lämmöntuotannon investointikustannuksiin nähden.

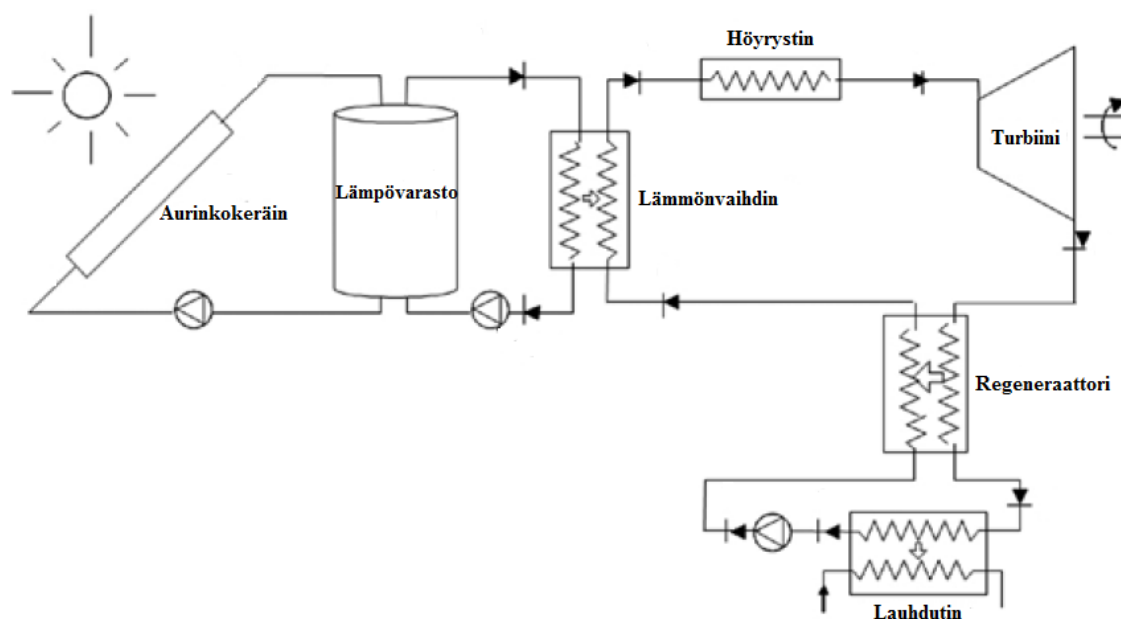
Suomessa biomassaa käytetään öljyn ohella polttoaineena pienissä lämpölaitoksissa, kuten varalämpölaitoksissa ja suurkiinteistöjen lämmityksessä. Tyypillisesti näiden laitosten kokoluokat ovat sellaisia, että niiden yhteydessä olisi mahdollista tuottaa sähköä sivutuotteena ORC-prosessin avulla. Näissä kohteissa laitoksen kuorma-ajoa säädetään lämmönkulutuksen mukaan, joka vaihtelee huomattavasti vuodenajan ja lämpötilan mukaan. Tällöin yleensä investoinnit sähköntuotantoon eivät ole perusteltuja. ORC-prosessi voisi olla kuitenkin kannattava vaihtoehto sähköntuotantoon lämpölaitoksissa sen hyvien osakuorma-ajo-ominaisuuksien vuoksi. (Karjalainen 2012, 16–19.)

4.3 Aurinkokeräimet

Mikro ORC-voimalat soveltuvat hyvin hajautettuun energiantuotantoon, kun halutaan hyödyntää aurinkoenergiaa. Suuria aurinkosähkölaitoksia ei yleisesti voida sijoittaa lähelle asutusta niiden vaatiman suuren pinta-alan vuoksi. Tällöin sähkönsiirrossa hävitään osa tuotetusta energiasta ja laitosten tuottaman hukkalämmön hyödyntäminen ei ole mahdollista. (Oliveira et al. 2008, 255.) Kotitalouksien pienimuotoisessa sähköntuotannossa aurinkokeräimien ja ORC-prosessin hyödyntäminen on myös halvempi toteutustapa kuin aurinkokennoihin perustuva sähköntuotanto johtuen

aurinkokeräimien paremmasta hyötysuhteesta ja pienemmistä valmistuskustannuksista (Bou Lawz Ksayer 2011, 389).

Aurinkokeräimissä käytetään tyypillisesti kiertoaineena vesi-glykoliseosta, josta lämpö siirretään ORC-prosessin kiertoaineeseen. Lämpö voidaan siirtää suoraan kiertoaineesta toiseen lämmönvaihtimen avulla tai lämpö voidaan myös siirtää välillisesti erillisen vesisäiliön kautta, joka toimii lämpövarastona. (Oliveira et al. 2008, 256–257.) Lämpövarastoa hyödyntämällä voidaan ORC-prosessin toiminta-aikaa kasvattaa keskimääräisestä 8 h/vrk jopa 24 h/vrk. Lisäksi lämmönvarastoinnin avulla pystytään myös hyödyntämään aurinkoisimpien tuntien aikana aurinkokeräimien tuottama mahdollinen ylimääräinen lämpöenergia varastoimalla se lämpövarastoon, joka näkyy välivarastona toimivan veden lämpötilan nousuna. (Wang et al. 2013, 821–822.) Alla olevassa kuvassa 15 esitellään aurinkokeräimien kytkentä ORC-prosessiin lämpövaraston avulla. Suorassa kytkennässä aurinkokeräimen lämpöpiiri kytketään suoraan lämmönvaihtimeen.



Kuva 15. Aurinkokeräimen kytkeminen ORC-prosessiin lämpövaraston kautta. Regeneraattorissa tapahtuu tulistuksen poisto. Lauhdutusvesi voidaan hyödyntää käyttövetenä. (Oliveira et al. 2008, 257.)

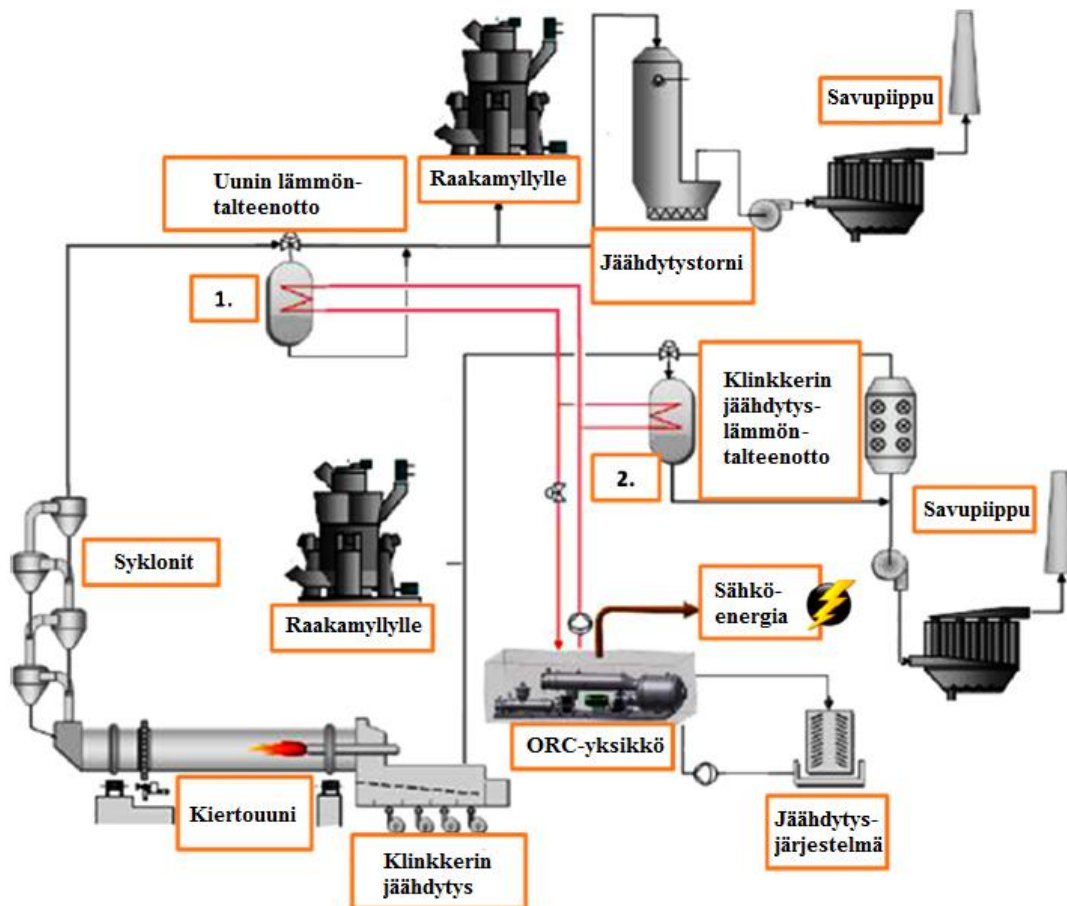
Aurinkokeräimiä hyödyntävillä ORC-voimaloilla voidaan saavuttaa 8–20 % sähköhyötysuhde. Korkeammat hyötysuhteet (15–20 %) vaativat kuitenkin korkeampia lämmönlähteen lämpötiloja (yli 200 °C) ja paineita, mutta tällöin myös niiden tuotetut tehot ovat suurempia (yli 20 kW_e). Tällöin myös aurinkokeräimien pinta-alan tulee olla aurinkoisillakin alueilla lähes 100 m². Noin 2–5 kW_e teho saadaan tuotettua jo alle 120 °C lämmönlähteellä (aurinkokeräimien tuottama lämpö) hyötysuhteen ollessa noin 12 %. (Oliveira et al. 2008, 258–260.)

4.4 Teollisuuden hukkalämpö

Monilla teollisuuden aloilla esiintyy paljon prosessihukkalämpöjä, joita olisi mahdollista hyödyntää. Esimerkiksi sementtiteollisuus, terästeollisuus sekä paperi- ja selluteollisuus ovat aloja, joilla prosessista häviää paljon energiaa savukaasujen ja muiden lämpöhäviöiden mukana. (Larjola 1995, 234.) Hukkalämpöjä on yleensä tarjolla

runsaasti, mutta aina niiden lämpötilatasot eivät ole riittävän korkeat hyödyntämiseen tuotantoprosessissa tai kaukolämpönä. Esimerkiksi pelkästään Yhdysvalloissa teollisuuden hukkalämpöjen energiantuotannon potentiaali on arvioiden mukaan 750 MW_e ja Euroopassa 3000 MW_e (Quoilin 2011, 22.)

Teollisuuden hukkalämpöjen lämpötilatasot ovat vaihtelevia, tyypillisesti välillä 80–1000 °C. Hukkalämpöjä voi kuitenkin syntyä useassa kohtaan prosessia, jolloin lämmöntalteenottoa varten tarvitaan useampi lämmönsiirrin ja mahdollisesti useampi energiantuotantoyksikkö. ORC-prosessia hyödyntäessä on kuitenkin mahdollista käyttää yhtä ORC-yksikköä, johon kaikkien lämmönsiirtimien lämpö ohjataan. (Campana et al. 2013, 247.) Alla olevassa kuvassa 16 esitellään esimerkkitapaus sementtiteollisuudesta.



Kuva 16. ORC-yksikkö sementin valmistusprosessissa (Campana et al. 2013, 247).

Useamman eri lämpötilatasolla olevan lämmönlähteen tapauksessa ORC-prosessi on oivallinen tapa hyödyntää hukkalämpöjä, koska sillä pystytään hyödyntämään myös alimpia hukkalämpöjä, joita on usein tehomäärällisesti eniten (BCS 2008, 26 & 54).

Teollisuudessa hukkalämpöjen hyödyntämisen potentiaali on huomattava ja hukkalämpöjen hyödyntämisellä voitaisiinkin päästä merkittäviin vähennyksiin energiankulutuksessa. Vaikka hukkalämpöjen hyödyntämisen potentiaali on suuri, voi käytännön toteutus olla haastavaa. Teollisuusprosesseissa hukkalämmöt voivat syntyä esimerkiksi liikkuvissa tai muuten hankalissa osissa, jolloin lämmönvaihtimien käyttö on ongelmallista. (Campana et al. 2013, 247–251.)

4.5 Polttomoottorit

Energiantuotannon polttomoottoreissa ORC-prosessilla on mahdollista hyödyntää sekä polttomoottorin pakokaasuja, että jäähdytysvettä lisäsähkön tuottamiseen. ORC-prosessi soveltuu niin kaasu- kuin dieselmoottoareidenkin hukkalämpöjen hyödyntämiseen. (Triogen 2014b). Koska moottorin pakokaasut (yli 400 °C) ja jäähdytysvesi (~90 °C) ovat eri lämpötilatasoilla sekä niiden massavirrat poikkeavat toisistaan, jolloin on haastavaa suunnitella systeemi, joka pystyy tehokkaasti hyödyntämään molempien lämpöenergiaa. Tällöin voi olla kannattavaa käyttää kahta erillistä ORC-prosessia pakokaasuille ja jäähdytysnesteelle. (Wang et al. 2013, 386–394.)

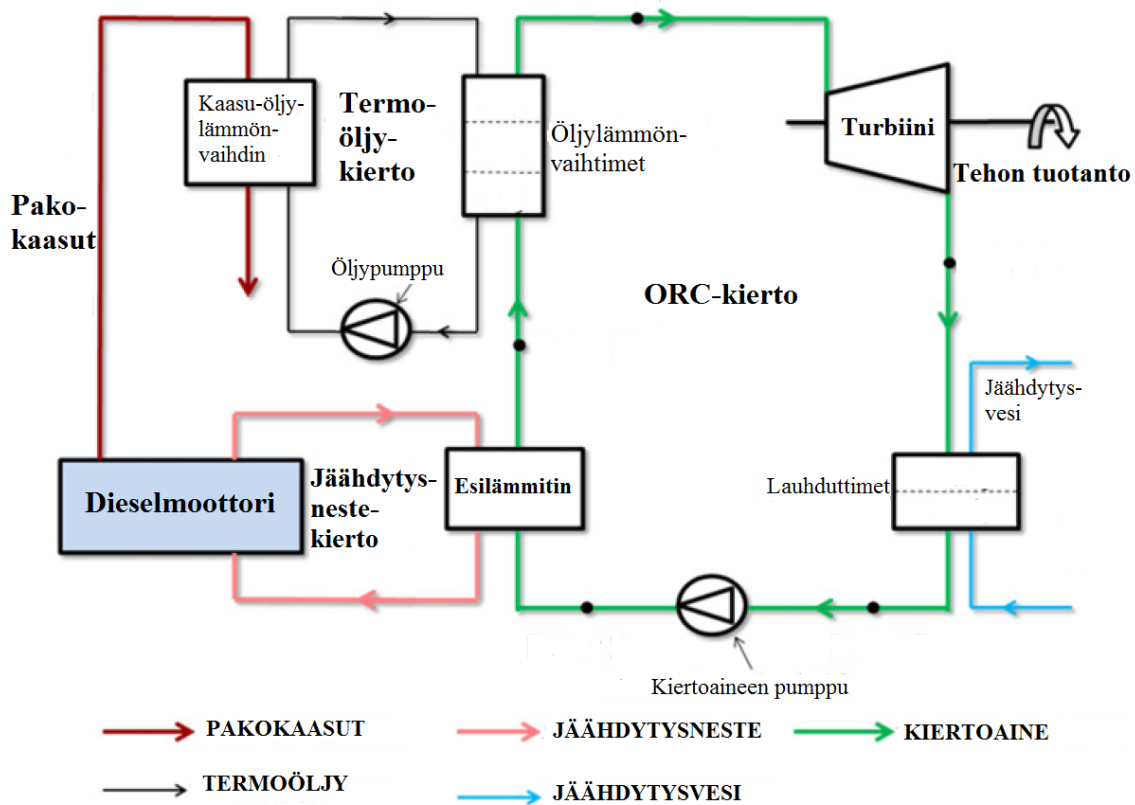
Kannattavia sovelluskohteita kaasumoottoareille ja ORC-yksiköille ovat esimerkiksi maatilat ja kaatopaikat, jotka pystyvät tuottamaan polttomoottorin polttoaineensa itse (biokaasu ja kaatopaikkakaasu). Maatiloilla pystytään myös hyödyntämään ORC-yksikön lauhdelämpöä esimerkiksi biokaasureaktorin lämmittämiseen. (Triogen 2014b).

Tyypilliset ajoneuvojen polttomoottorit pystyvät hyödyntämään vain noin kolmanneksen polttoaineen sisältämästä energiasta ja loput energiasta menetetään suurimmilta osin lämpöhäviönä. Esimerkiksi tyypillisen henkilöauton pakokaasujen (400–900 °C) kautta voi poistua jopa yli 100 kW ORC-prosessilla hyödynnettävissä olevaa lämpöenergiaa. ORC-prosessin turbiinin tuottama energia pystytään

hyödyntämään sekä mekaanisena energiana, että sähköenergiana. (Quoilin et al. 2013, 173.)

Ajoneuvoissa polttoaineen kulutus ja siten myös savukaasujen määrä sekä lämpötila vaihtelevat jatkuvasti ajon aikana (Boretti 2012, 73). ORC-prosessi onkin tämän vuoksi hyvä vaihtoehto moottorin lämmön hyödyntämiseen, sillä ORC-prosessi pystyy toimimaan myös suunnittelupisteestä poikkeavissa oloissa (Campana et al. 2013, 244).

Kuten moottorivoimaloissa, myös ajoneuvoissa lämpöä ei poistu ainoastaan pakokaasujen mukana, vaan myös esimerkiksi jäähdytysnesteen kautta. ORC-prosessilla ei olekaan kannattavaa ajoneuvoissa hyödyntää pelkkää pakokaasujen lämpöä, vaan myös jäähdytysnesteen lämpö kannattaa hyödyntää. Pakokaasujen ja jäähdytysnesteen lämpöjen hyödyntäminen voidaan toteuttaa yhdellä kiertoprosessilla tai kahdella erillisellä -prosessilla. Yhdellä ORC-prosessilla toteutettaessa jäähdytysnestettä käytetään ORC-prosessin kiertoaineen esilämmitykseen ja pakokaasuja käytetään kiertoaineen höyrystämiseen (Yu et al. 2013, 282). Kahdella kierrolla toteutettaessa sekä pakokaasuilla, että jäähdytysnesteellä on oma ORC-prosessi. Alla olevassa kuvassa 17 havainnollistetaan yhteen kiertoon perustuvaa ORC-prosessia polttomoottorin yhteydessä.

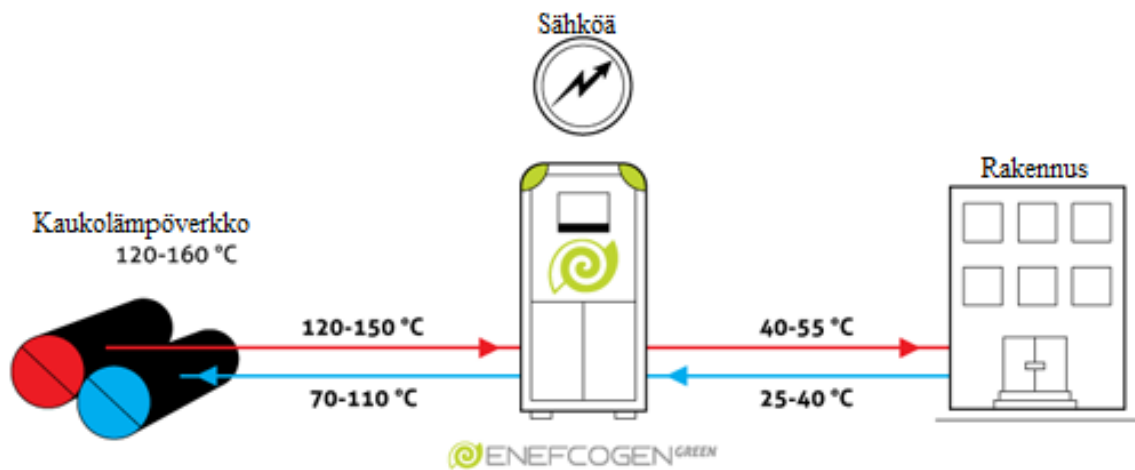


Kuva 17. ORC-prosessi kytkettynä dieselmoottoriin (Yu et al. 2013, 282).

ORC-prosessin käyttö vähentää ajoneuvon polttoaineen kulutusta, jolloin sen käyttö on kannattavampaa paljon polttoainetta kuluttavissa ajoneuvoissa, kuten rekoissa. Hybridiautoille on suositeltavampaa muuntaa lämpöenergia ORC-prosessilla sähköksi, jolloin ORC-yksikön koko on pienempi ja se on helpompi sijoittaa ajoneuvoon. (Boretti 2012, 74.) Useissa tutkimuksissa polttomoottorien yhteydessä ORC-prosessilla päästään sille tyypillisiin hyötysuhteisiin (~10 %), mutta todellisuudessa hyötysuhteet jäävät alhaisemmiksi moottorin epätasaisen kuorman vuoksi. ORC-prosessi on kuitenkin yksi lupaavimmista keinoista polttomoottorin hyötysuhteen parantamiseksi. (Green Car Congress 2012). Esimerkiksi Hondan kehittelemässä prototyypissä saatiin ORC-yksikön avulla moottorin hyötysuhde nostettua 28,9 %:sta 32,7 %:iin (Quoilin et al. 2013, 173).

4.6 Kaukolämpöverkko

Kaukolämpöverkkoa voidaan hyödyntää ORC-yksikön lämmönlähteenä yksittäisissä rakennuksissa. Tällöin rakennuksen lämmönjakokeskuksen lämmönvaihdin korvataan ORC-yksiköllä, jolloin lämmityksen ja lämpimän käyttöveden lisäksi pystytään tuottamaan sähköä rakennuksen tarpeisiin. ORC-yksikkö käyttää lämmönlähteenä tulevaa kaukolämpövedettä ja lauhdutukseen kaukolämmön paluuvettä. (Eneftch 2014a.) Jotta tällä tavoin pystyttäisiin tuottamaan esimerkiksi 5 kW_e sähköä ja noin 50 kW lämpöä, tarvitsee ORC-yksikkö toimiakseen erittäin lämmintä kaukolämpövedettä (yli 120 °C) (Eneftch 2014b). Korkean kaukolämpöveden lämpötilan tarpeen vuoksi sovelluksen toimiminen Suomen olosuhteisiin on epävarmaa. Suomessa kaukolämpöveden maksimilämpötila talvisinkin on noin 115 °C (Energiateollisuus 2014). Alla olevassa kuvassa 18 esitellään esimerkki ORC-yksikön hyödyntämisestä rakennuksen sähköntuotantoon kaukolämpöverkon avulla.



Kuva 18. ORC-yksikön kytkeminen kaukolämpöverkkoon. ORC-yksikkö toimii rakennuksen kaukolämmön lämmönvaihtimena. (Eneftch 2014a).

5 POHDINTA

Mikro ORC-voimaloiden potentiaalisimmat sovelluskohteet ovat erilaisten energiantuotantokoneiden ja teollisuusprosessien hukkalämpöjen hyödyntämisessä. Mikro ORC-voimaloita on mahdollista myös hyödyntää energian pientuotannossa esimerkiksi kotitalouksissa.

Alle 50 kW_e sähköntuotannossa mikro ORC-voimaloiden suurimmat kilpailijat eli kaasuturbiinit, polttomoottorit ja Stirling-moottorit ovat ORC-voimaloille pikemminkin mahdollisuuksia kuin kilpailijoita. Kaasuturbiinien ja polttomoottorien yhteydessä ORC-yksiköllä pystytään sähköntuotantohyötysuhdetta nostamaan jopa yli kymmenen prosenttiyksikköä. Toisaalta Mikro ORC-yksikön käyttö savukaasujen hukkalämmön hyödyntämiseen vähentää mahdollista lämmöntuotantoa. Mikro ORC-yksikköä kannattaakin käyttää toisen mikrokokoluokan prosessin hukkalämpöjen hyödyntämiseen vain, jos lämmön tarve on pieni tai jos lämpöä ei pystytä hyödyntämään.

Mikrokokoluokassa ORC-yksikön suurin etu on laajempi polttoaine valikoima. Mikro ORC-voimalassa pystytään lämmönlähteenä käyttämään esimerkiksi biomassaa, mikä ei ole mahdollista kaasuturbiinilla ja polttomoottorilla. Heikon sähköntuotantohyötysuhteen vuoksi biomassaa ei kannata käyttää pelkästään sähköntuotantoon ORC-prosessin avulla vaan tällöin kannattaa tuottaa myös lämpöä. Mikro ORC-yksikön käyttö sähköntuotantoon onkin kannattavaa varsinkin CHP-laitosten yhteydessä, joissa sähköntuotantosuhteessa lämmöntarpeeseen on pieni. CHP-laitoksissa mikro ORC-yksikön edut tulevat parhaiten esille pienissä kokoluokissa, joissa esimerkiksi vesihöyryprosessin käyttäminen sähköntuotantoon on kannattamatonta. Todennäköisesti Suomessa ORC-prosessin käyttö CHP-laitoksissa ei ole yleistä, koska ORC-tekniikka ei ole vielä kovin laajalti tunnettua.

Pienten CHP-laitosten lisäksi mikro ORC-voimaloita voisi olla mahdollista soveltaa pieniin lämpölaitoksiin muuntamalla ne CHP-laitoksiksi. Suomessa monia

öljykäyttöisiä lämpölaitoksia ollaan uusimassa bioenergialla toimiviksi, joten tässä yhteydessä voisi olla kannattavaa investoida myös sähköntuotantoon (Motiva 2012). Tosin kaikissa lämpökeskuksissa sähköntuotantoon investointi ei ole kannattavaa, varsinkin jos lämmöntuotanto ei ole tasaista ympäri vuoden (Karjalainen 2012, 27). Mikro ORC-voimaloita voisi olla lämpölaitosten lisäksi myös mahdollista soveltaa kotitalouksien lämpökattiloiden yhteydessä, jos ORC-tekniikasta saadaan tässä kokoluokassa taloudellisesti kannattavaa, luotettavaa ja helppohoitoista.

Mikro ORC-yksiköillä on myös huomattava potentiaali rakennusten energiaomavaraisuuden parantamisessa, kun lämmönlähteenä on käytettävissä esimerkiksi aurinkokeräimiä tai kaukolämpöverkko. Aurinkokeräimet yhdistettynä ORC-yksikköön voivat tulevaisuudessa olla merkittävä kilpailija aurinkokennoihin perustuvalla tekniikalla kotitalouksien sähköntuotannossa (Bou Lawz Ksayer 2011, 389). Aurinkokeräimen ja ORC-yksikön yhdistelmän suurin heikkous on sen riippuvuus säästä. ORC-prosessin vaatimien lämpötilatasoihin (80–120 °C) pääseminen esimerkiksi Suomen oloissa voi olla haastavaa lähes koko vuoden, jolloin ORC-prosessilla ei saavuteta sillä tavoiteltavaa energiaomavaraisuutta. Lisäksi talvisin, kun energian tarve on suurin, on myös aurinkoenergiaa saatavissa vähän tai tuskin ollenkaan. Tällainen tekniikka soveltuukin parhaiten erittäin aurinkoisille ja lämpimille alueille. Myös kaukolämpöverkon hyödyntäminen ORC-yksikön lämmönlähteenä vaatii kaukolämpövedeltä korkeaa lämpötilaa, mitä ei ole aina saatavilla. Kaukolämpöverkko, kuten myös aurinkokeräimet, soveltuvatkin parhaiten lisäsähkön tuottamiseen silloin, kun lämpöä on saatavilla tarpeeksi. Pelkästään näiden tekniikoiden varaan kotitalouksien tai rakennusten energian saantia ei voida laskea.

Teollisuusprosessien yhteydessä mikro ORC-voimalan käytön kannattavuus riippuu pitkälti hukkalämmönlähteiden määrästä ja suuruudesta. Hukkalämpöjen hyödyntämisessä pitääkin jokaisen tapauksen kannattavuus määritellä erikseen, eikä yleisesti voida määritellä, onko mikro ORC-voimalan käyttö hukkalämpöjen hyödyntämiseen kannattavaa tietyllä teollisuusalalla tai -laitoksessa. Teollisuusprosessien hukkalämmöt ovat kuitenkin teho- ja kappalemäärältään

potentiaalisin mikro ORC-voimaloiden sovelluskohde. Mikro ORC-voimaloiden ja muiden hukkalämmön talteenottojärjestelmien hyödyntäminen tulee yleistymään teollisuuslaitoksissa energian hinnan kasvaessa.

Ajoneuvojen polttomoottoreissa ORC-prosessi on yksi varteenotettavimmista keinoista parantamaan moottorin hyötysuhdetta, sillä se pystyy hyvin mukautumaan ajon aikana muuttuviin savukaasun määrään ja lämpötilaan (Campana et al. 2013, 244). ORC-prosessin käytöllä on merkittävä potentiaali varsinkin isoissa ajoneuvoissa, joissa polttoaineen kulutus on suuri. Toinen mahdollinen potentiaalinen sovelluskohde on hybridiautot, jolloin ORC-yksikön tuottama energia voidaan mekaanisen energian sijaan muuntaa sähköksi. Tällöin ORC-yksikön koko on merkittävästi pienempi ja se on helpompi sijoittaa ajoneuvoon (Boretti 2012, 74). Mitä pienempänä ORC-yksikkö pystytään ajoneuvoon toteuttamaan, sitä kannattavampi se on, sillä ajoneuvon kokonaispaino vaikuttaa suoraan polttoaineen kulutukseen.

Edellä mainittujen lisäksi mikro ORC-voimaloita on mahdollista hyödyntää sähkön tuotantoon syrjäisissä kohteissa, joilla ei ole yhteyttä sähköverkkoon tai joiden yhdistäminen sähköverkkoon tulisi kalliimmaksi kuin oma sähköntuotanto. Tällaisia käyttökohteita ovat muun muassa teleliikenneasemat, maakaasu- ja öljyputkilinjat sekä öljynporauslautat ja niissä käytettävien mikro ORC-yksiköiden tehot ovat erittäin pieniä alkaen aina 400 W:sta. Polttoaineena käytetään sitä mitä on saatavilla. Esimerkiksi putkilinjojen yhteydessä voidaan käyttää maakaasua tai raakaöljyä. Ormat on valmistanut tämän tyyppisiä ORC-yksiköitä tuhansia kokoluokassa 400–4000 W_e juurikin edellä mainittuihin kohteisiin. Ormatin valmistama ORC-yksikkö on hermeettinen, mikä yhtiön mukaan mahdollistaa pitkän käyttöiän ja vähäisen huollon tarpeen. (Ormat 2014.) Ominaisuudet, jotka mahdollistavat yksikön itsenäisen toiminnan, ovatkin avainasemassa tällaisten sovellusten kannattavuuden kannalta.

6 YHTEENVETO

ORC-prosessi on Rankine-prosessi, jossa kiertoaineena käytetään veden sijasta orgaanista ainetta. ORC-prosessi soveltuu hyvin matalille lämpötilatasoille, sillä prosessissa käytettävien kiertoaineiden höyrystyslämmöt ovat pienempiä kuin esimerkiksi vedellä. ORC-prosessia hyödynnetään erityisesti erilaisten teollisuus- ja energiantuotantoprosessien hukkalämpöjen hyödyntämiseen sekä geotermisen energian ja biomassan polton yhteydessä sähköntuotantoon. ORC-voimaloiden suurimpia valmistajia ovat Ormat ja Turboden ja näiden lisäksi on muutamia pienempiä toimijoita.

Mikro ORC-voimaloilla tarkoitetaan alle 50 kW_e tuottavia ORC-yksiköitä. Mikro ORC-voimaloiden potentiaalisimmat sovelluskohteet ovat erilaisten energiantuotantokoneiden ja teollisuusprosessien hukkalämpöjen hyödyntämisessä. Mikro ORC-voimaloita on mahdollista myös hyödyntää energian pientuotannossa esimerkiksi kotitalouksissa. Pienissä CHP-laitoksissa mikro ORC-yksikkö on potentiaalinen vaihtoehto sähköntuotantoon, kun sähkön tarve suhteessa lämmön tarpeeseen on pieni. Teollisuusprosesseissa mikro ORC-yksikön kannattavuus on aina tapauskohtainen.

Mikro ORC-voimaloilla voisi olla potentiaalia myös pienten lämpölaitosten yhteydessä, jolloin sähköä olisi mahdollista tuottaa lämmöntuotannon sivutuotteena. Ongelmana kuitenkin on pienten lämpölaitoksille tyypillinen epätasainen lämmöntuotanto. Tekniikkaa voisi olla mahdollista soveltaa myös kotitalouksien kokoluokassa. Kotitalouksien lämpökattiloiden lisäksi mikro ORC-tekniikan potentiaalisimmat sovelluskohteet ovat aurinkokeräimet ja kaukolämpöverkko.

Mikro ORC-voimaloiden mahdollisia käyttökohteita ovat myös mikrokokoluokan kaasuturbiinien ja polttomoottorien hukkalämpöjen talteenotto. Lisäksi mikro ORC-yksiköitä on mahdollista hyödyntää syrjäisten kohteiden sähköntuotannossa. Ajoneuvoissa ORC-prosessi on yksi lupaavimmista keinoista hyödyntää polttomoottorin savukaasujen lämpöä. Soveltuvimpia kohteita ovat hybridiautot ja suuret ajoneuvot.

Mikro ORC-voimaloiden suurin heikkous on hyvien, kaupallisten turbiinien huono saatavuus alle 10 kW_e kokoluokassa, joka on myös yksi merkittävimmistä esteistä mikro ORC-voimaloiden kaupallistamisessa pienimmissä kokoluokissa.

LÄHTEET

Adoratec. 2013. ORC process [verkkójulkaisu]. [Viitattu 10.9.2013]. Saatavissa: <http://www.adoratec.com/productnav.html>

Algieri Angelo & Morrone Pietropaolo. 2013. Energetic analysis of biomass-fired ORC systems for micro-scale combined heat and power (CHP) generation. A possible application to the Italian residential sector. Applied Thermal Engineering, 2013. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.11.024>

Aoun Bernard. 2008. Micro combined heat and power operating on renewable energy for residential building [verkkodokumentti]. Väitöskirja. Pariisi: Ecole Des Mines de Paris. [Viitattu 17.3.2012]. Saatavissa: http://pastel.archives-ouvertes.fr/docs/00/50/37/62/PDF/B.Aoun_these.pdf

BCS. 2008. Waste Heat Recovery: – Technology and Opportunities in U.S. Industry [verkkodokumentti]. U.S. Department of Energy, Industrial Technologies Program. 112 s. [Viitattu 31.1.2014]. Saatavissa: https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/intensiveprocesses/pdfs/waste_heat_recovery.pdf

Boretti Alberto. 2012. Recovery of exhaust and coolant heat with R245fa organic Rankine cycles in a hybrid passenger car with a naturally aspirated gasoline engine. Applied Thermal Engineering, volyymi 36. Sivut 73–77.

Bou Lawz Ksayer E. 2011. Design of an ORC system operating with solar heat and producing sanitary hot water. Energy Procedia, volyymi 6. Sivut 389–395.

Campana F. et al. 2013. ORC waste heat recovery in European energy intensive industries: Energy and GHG savings. Energy Conversion and Management, volyymi 76. Sivut 244–252.

Carcasci Carlo, Ferraro Riccardo & Miliotti Edoardo. 2013. Thermodynamic analysis of an organic Rankine cycle for waste heat recovery from gas turbines. *Energy*. Sivut 1–10.

Clemente Stefano et al. 2013. Bottoming organic Rankine cycle for a small scale gas turbine: A comparison of different solutions. *Applied Energy*, volyymi 106. Sivut 355–364.

Cogen. 2013. How our Technology Works [verkkojulkaisu]. [Viitattu 10.9.2013]. Saatavissa: <http://www.cogenmicro.com/index.php?select=159>

Electratherm. 2013. ElectraTherm's Waste to Power Generation System [verkkojulkaisu]. [Viitattu 12.9.2013]. Saatavissa: <http://electratherm.com/products/>

Eneftech. 2013. Welcome [verkkojulkaisu]. [Viitattu 10.9.2013]. Saatavissa: www.eneftech.com

Eneftech. 2014a. District heating [verkkojulkaisu]. [Viitattu 17.1.2014]. Saatavissa: http://www.eneftech.com/en/district_heating.php

Eneftech. 2014b. ENEFCOGEN^{GREEN} [verkkojulkaisu]. [Viitattu 17.1.2014]. Saatavissa: http://www.eneftech.com/en/enefcogen_green.php

Enerec. 2012. Posiolla valmistuu puuhakkeella toimiva ORC-laitos syksyllä 2013 [verkkojulkaisu]. [Viitattu 24.1.2014]. Saatavissa: <http://www.enerec.fi/suomeksi/Uutiset/Uutinen/tabid/8455/language/en-US/ArticleId/2500/Default.aspx?Return=8388>

Energiateollisuus. 2008. Energiateollisuuden näkemys energiatehokkuuden edistämiseksi: Energiatehokkuus avainasemassa ilmasto- ja energiahaasteiden ratkaisemisessa [verkkojulkaisu]. [Viitattu 31.1.2014]. Saatavissa: http://energia.fi/sites/default/files/ET_n%C3%A4kemys_energiatehokkuuden_edist%C3%A4miseksi.pdf

Energiateollisuus. 2014. Näin kaukolämpö toimii [verkkojulkaisu]. [Viitattu 30.1.2014].
Saatavissa: <http://www.kaukolampo.fi/toimintaperiaate2.html>

GMK. 2013. Biogas Waste Heat Recovery [verkkojulkaisu]. [Viitattu 10.9.2013].
Saatavissa: <http://www.gmk.info/product-lines/inducal/ic60.html>

Green Car Congress. 2012. Simulation study suggests ORC waste heat recovery system could deliver potential 7% improvement in fuel consumption in a PHEV on highway [verkkojulkaisu]. [Viitattu 13.1.2014]. Saatavissa:
<http://www.greencarcongress.com/2012/10/orc-20121010.html>

Heinimö Jussi & Jäppinen Eero. 2005. ORC-teknologia hajautetussa sähköntuotannossa. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, energia- ja ympäristötekniikan osasto. 84 s. Tutkimusraportti EN B-160. ISBN 952-214-014-7

HSY. 2014. Kaasuvoimala [verkkojulkaisu]. [Viitattu 24.1.2014]. Saatavissa:
http://www.hsy.fi/jatehuolto/toiminta_tilastot/kaasuvoimala/Sivut/default.aspx

Invernizzi Costante, Iora Paolo & Silva Paolo. 2007. Bottoming micro-Rankine cycles for micro-gas turbines. Applied Thermal Engineering, volyymi 27. Sivut 100–110.

Karjalainen Timo. 2012. Pienimuotoisen lämmön ja sähkön yhteistuotannon tilannekatsaus – laitteet ja niiden käyttöönotto [verkkojulkaisu]. Motiva. [Viitattu 31.1.2014]. Saatavissa:
http://www.motiva.fi/files/7436/Pienimuotoisen_lammon_ja_sahkon_yhteistuotannon_tilannekatsaus_laitteet_ja_niiden_kayttoonotto.pdf

Larjola Jaakko. 1995. Electricity from industrial waste heat using high-speed organic Rankine cycle (ORC). International Journal of Production Economics, volyymi 41. Sivut 227–235.

Larjola Jaakko. 2011. Organic Rankine cycle (ORC) based waste heat/waste fuel recovery systems for small combined heat and power (CHP) applications. Teoksessa: Beith Robert (toim.), Small and micro combined heat and power (CHP) systems. Cambridge: Woodhead Publishing Limited. Sivut 206–232. Woodhead Publishing Series in Energy: numero 18. ISBN 978-1-84569-795-2.

Larjola Jaakko, Röyttä Pekka & Uusitalo Antti. 2011. BH40A0300 Energiamuuntoprosessit, kurssimoniste. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, LUT Energia. 177 s. Tekninen raportti LFD 4/2011.

Liu Hao et al. 2012. Experimental investigation of a biomass-fired ORC-based micro-CHP for domestic applications. Fuel, volyymi 96. Sivut 374–382.

Mago Pedro J. & Luck Rogelio. 2013. Evaluation of the potential use of a combined micro-turbine organic Rankine cycle for different geographic locations. Applied Energy, volyymi 102. Sivut 1324–1333.

Motiva. 2012. Pienet lämpökeskukset [verkkójulkaisu]. [Viitattu 31.1.2014]. Saatavissa: http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/lampo-_ja_voimalaitokset/pienet_lampokeskukset

Oliveira Armando C., Facão Jorge & Palmero-Marrero Ana. 2008. Analysis of a solar assisted micro-cogeneration ORC system. International Journal of Low-Carbon Technologies, volyymi 3: 4. Sivut 254–264.

Ormat. 2013. Ormat [verkkosivusto]. [viitattu 10.9.2013]. Saatavissa: www.ormat.com

Ormat. 2014. Remote Power Units [verkkosivusto]. [Viitattu 5.2.2014]. Saatavissa: <http://www.ormat.com/remote-power-units>

Oudkerk Jean-François et al. 2013. Evaluation of the Energy Performance of an Organic Rankine Cycle-Based Micro Combined Heat and Power System Involving a Hermetic Scroll Expander. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, volyymi 135: 4. Sivut 46–56.

Purhonen Mikko. 2010. ORC-prosessin käyttö sähköntuotannossa [verkkodokumentti]. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, energiatekniikan osasto.

Lappeenranta. [Viitattu 17.3.2013]. Saatavissa:

<http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/66734/nbnfi-fe201101071019.pdf?sequence>

Qiu Guoquan, Liu Hao & Riffat Saffa. 2011. Expanders for micro-CHP systems with organic Rankine cycle. *Applied Thermal Engineering*, volyymi 31. Sivut 3301–3307.

Quoilin Sylvain. 2011. Sustainable Energy Conversion Through the Use of Organic Rankine Cycles for Waste Heat Recovery and Solar Applications [verkkodokumentti].

Väitöskirja. Liège: University of Liège, Faculty of Applied Science. [Viitattu 29.4.2013]. Saatavissa:

http://orbi.ulg.ac.be/bitstream/2268/96436/1/PhD_Thesis_Dissertation.pdf

Quoilin Sylvain et al. 2013. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volyymi 22. Sivut 168–186.

Quoilin Sylvain & Lemort Vincent. 2009. Technological and Economical Survey of Organic Rankine Cycle Systems [verkkodokumentti]. Liège: University of Liège, Thermodynamics Laboratory. [Viitattu 10.9.2013]. Saatavissa:

http://orbi.ulg.ac.be/bitstream/2268/14609/1/ECEMEI_PaperULg_SQVL090916.pdf

Reunanen Arttu et al. 2000. ORC-voimalan soveltuvuus hyödyntämään dieselveimalan hukkalämpöä. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, energiatekniikan osasto. 50 s. Tutkimusraportti EN B-132. ISBN 951-764-437-X.

- Toholammin Energia Oy. 2013. Kestävien hankintojen vuosiseminaari [verkkodokumentti]. [Viitattu 24.1.2014]. Saatavissa: http://www.motivanhankintapalvelu.fi/files/289/10_Juhani_Asiainen_Toholammin_Energia_Oy_22_3_2013.pdf
- Triogen. 2013a. Triogen high-speed turbo generator [verkkojulkaisu]. [Viitattu 19.9.2013]. Saatavissa: <http://www.triogen.nl/technology/triogen-high-speed-turbo-generator>
- Triogen. 2013b. Why Triogen [verkkojulkaisu]. [Viitattu 6.2.2013]. Saatavissa: <http://www.triogen.nl/why-triogen>
- Triogen. 2014a. Reference Selection [verkkojulkaisu]. [Viitattu 24.12.2014]. Saatavissa: <http://www.triogen.nl/references/reference-overview>
- Triogen. 2014b. Applications [verkkojulkaisu]. [Viitattu 28.1.2014]. Saatavissa: <http://www.triogen.nl/applications>
- Turboden. 2013a. Turboden [verkkosivusto]. [Viitattu 10.9.2013]. Saatavissa: www.turboden.eu
- Turboden. 2013b. Organic Rankine Cycle (ORC) in Biomass-Fueled CHP, Green Electricity and Heat from Low-Grade Wood and Forestry Residues [verkkodokumentti]. [Viitattu 26.12.2013]. Saatavissa: http://www.canbio.ca/events/ottawa10/theuer_e.pdf
- Uusitalo Antti. 2010. Polttomoottorivoimalan energiatehokkuuden parantaminen hukkalämpövirtojen sähköksi muunnolla. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, energiatekniikan koulutusohjelma. Lappeenranta. 93 s.

Vankeirsbilck I. et al. 2011. Organic Rankine cycle as efficient alternative to steam cycle for small scale power generation. 8th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Proceedings. Sivut 785–792. Saatavissa: <https://www.yumpu.com/en/document/view/13012691/organic-rankine-cycle-as-efficient-alternative-to-steam-cycle-orcycle>

Wang E. H. et al. 2012. Performance analysis of a novel system combining a dual loop organic Rankine cycle (ORC) with a gasoline engine. Energy, volyymi 43. Sivut 385–395.

Wang Man et al. 2013. Thermodynamic analysis and optimization of a solar-driven regenerative organic Rankine cycle (ORC) based on flat-plate solar collectors. Applied Thermal Engineering, volyymi 50: 1. Sivut 816–825.

Yu Guopeng et al. 2013. Simulation and thermodynamic analysis of a bottoming Organic Rankine Cycle (ORC) of diesel engine (DE). Energy, volyymi 51. Sivut 281–290.