

Pekka Peura, Erkki Hiltunen, Ari Haapanen, Karoliina Auvinen,
Risto Soukka, Hannu Törmä, Susanna Kujala, Johanna Pohjo-
la, Anne Mäkiranta, Petri Välisuo, Kaisa Grönman, Rathan
Kumar, Saija Rasi, Eeva Lehtonen, Perttu Anttila

Hajautetun uusiutuvan energian mahdollisuudet ja rajoitteet (HEMU)

Maaliskuu 2017

Valtioneuvoston selvitys-
ja tutkimustoiminnan
julkaisusarja 35/2017

KUVAILULEHTI

Julkaisija ja julkaisuaika	Valtioneuvoston kanslia, 1.3.2017		
Tekijät	Pekka Peura, Erkki Hiltunen, Ari Haapanen, Karoliina Auvinen, Risto Soukka, Hannu Törmä, Susanna Kujala, Johanna Pohjola, Anne Mäkiranta, Petri Välisuo, Kaisa Grönman, Rathan Kumar, Saija Rasi, Eeva Lehtonen, Perttu Anttila		
Julkaisun nimi	Hajautetun uusiutuvan energian mahdollisuudet ja rajoitteet		
Julkaisusarjan nimi ja numero	Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 35/2017		
Asiasanat	Uusiutuva energia, hajautettu energiantuotanto, potentiaalit, aluetalous		
Julkaisuaika	Maaliskuu, 2017	Sivuja 109	Kieli Suomi

Tiivistelmä

Hajautettu energian tuotanto on Suomelle mahdollisuus, joka vaikuttaa voimakkaasti aluetalouteen. Bioenergia voisi edustaa noin kolmannesta kaikesta Suomen energian tuotannosta. Sen potentiaali ja hyödyntämisen aluetaloudelliset vaikutukset vaihtelevat alueellisesti. Suurimmat työllisyys- ja talousvaikutukset olisivat Pohjois- ja Itä-Suomessa. Bioenergian vielä käyttämättömän potentiaalin hyödyntäminen on aluetaloudellisin perustein suositeltavaa.

Hajautetun energian tuotannon tekniikat kehittyvät edelleen, ja käytössä olevin ratkaisujen suorituskyky, hinnat ja käyttökustannukset tulevat edullisimmiksi. Esimerkiksi geoenergiaratkaisuihin on löydettävissä uusia innovaatioita. Kausivarastoinnin kehittyminen mahdollistaisi hyvin suurien lämpömäärien käyttöönoton.

Case-rakennuksille tehtyjen elinkaarikustannuslaskelmien ja ilmastonmuutospotentiaaliarviointien perusteella paikalliset ja alueelliset olosuhteet vaikuttavat lopputulokseen merkittävästi. Energian hankintamuotoja ei voida laittaa yksiselitteiseen paremmuusjärjestykseen, vaan niitä on tarkasteltava tapauskohtaisesti. Toimintaympäristö vaikuttaa saavutettavissa olevien päästövähennysten suuruuteen ja elinkaarikustannuksiin. Lisäksi on syytä kiinnittää huomiota hiilidioksiditonivähennykselle tulevaan hintaan.

Fossiilisten energioiden korvaamista uusiutuvilla energioilla tarkasteltiin kannattavuuslaskelmilla. Lisäksi pyrittiin tunnistamaan pullonkauloja. Fossiilisten polttoaineiden ja uusiutuvien energialähteiden hintaeroon olisi vaikutettava taloudellisilla ohjaukeinoilla, jotta uusiutuvaan energiaan perustuvat investoinnit olisivat nykyistä kannattavampia. Energia- ja ilmastopolitiikan tulisi luoda uusiutuvalla energialle ennustettava ja vakaa investointiympäristö. Hajautetun energiantuotannon käyttöönotossa pullonkauloja ovat yleensä yksikön perustamiseen liittyvät kustannukset. Uuden tekniikan elinkaaren alkuvaiheessa tuotteiden hinta muun muassa tuotekehityskustannuksista johtuen on korkeampi kuin jo käytössä olevien tekniikoiden.

Tämä julkaisu on toteutettu osana valtioneuvoston vuoden 2016 selvitys- ja tutkimussuunnitelman toimeenpanoa (tietokayttoon.fi).

Julkaisun sisällöstä vastaavat tiedon tuottajat, eikä tekstisisältö välttämättä edusta valtioneuvoston näkemystä.

PRESENTATIONSBLAD

Utgivare & utgivningsdatum	Statsrådets kansli, 1.3.2017		
Författare	Pekka Peura, Erkki Hiltunen, Ari Haapanen, Karoliina Auvinen, Risto Soukka, Hannu Törmä, Susanna Kujala, Johanna Pohjola, Anne Mäkiranta, Petri Välisuo, Kaisa Grönman, Rathan Kumar, Saija Rasi, Eeva Lehtonen, Perttu Anttila		
Publikationens namn	Möjligheter och begränsningar för decentraliserad energi		
Publikationsseriens namn och nummer	Publikationsserie för statsrådets utrednings- och forskningsverksamhet 35/2017		
Nyckelord	Förnybar energi, distribuerad energi, potential, regional ekonomi		
Utgivningsdatum	Mars, 2017	Sidantal 109	Språk Finska

Sammandrag

Decentraliserad produktion av energi är en möjlighet, som har kraftig påverkan på den regionala ekonomin i Finland. Bioenergi skulle kunna representera ungefär en tredjedel av all energiproduktion i Finland. Dess potential och utnyttjandets verkningar på den regionala ekonomin skiljer sig mellan regionerna. De största effekterna på sysselsättningen och ekonomin skulle finnas i norra och östra Finland. Bioenergis ännu outnyttjade potential är att rekommendera.

Tekniker för decentraliserad energi utvecklas fortsättningsvis. Prestationsförmågan för de lösningar som är i bruk, pris och brukskostnader kommer att bli förmånligare. T.ex. beträffande geoenergilösningar står nya innovationer att finna. Utvecklingen av säsongmässig lagring skulle möjliggöra ibruktagande av mycket stora värmemängder.

Utgående från beräkningar av livscykelkostnader och uppskattningarna av klimatförändringspotentialen för case-byggnader har de lokala och de regionala förhållandena betydande inverkan på slutresultatet. Energins anskaffningsformer kan inte sättas i entydig prioriteringsordning, utan de bör granskas från fall till fall. Verksamhetsmiljön inverkar på storleken och livscykelkostnaderna för de utsläppsminskningar som står att uppnå. Dessutom finns orsak att fästa uppmärksamhet vid kommande pris för minskat koldioxidutsläpp.

Ersättande av fossila energier med förnybar energi granskades med lönsamhetsberäkningar. Dessutom eftersträvades att identifiera flaskhalsar. Ekonomiska incentiv för att ge ett mer lönsamt pris åt förnybar energi skulle användas för att förbättra lönsamheten för nya investeringar. Energi- och klimatpolitiken skulle skapa en stabil och förutspåbar investeringsmiljö. Kostnaderna för att grunda en enhet utgör i allmänhet tröskel för ibruktagande av decentraliserad energi. I tidiga skeden av livscykeln för ny teknik är priset högre för produkterna bland annat beroende på produktutvecklingskostnader i jämförelse med redan existerande äldre lösningar.

Den här publikation är en del i genomförandet av statsrådets utrednings- och forskningsplan för 2016 (tietokayttoon.fi/sv).

De som producerar informationen ansvarar för innehållet i publikationen. Textinnehållet återspeglar inte nödvändigtvis statsrådets ståndpunkt

DESCRIPTION

Publisher and release date	Prime Minister´s Office, 1.3.2017		
Authors	Pekka Peura, Erkki Hiltunen, Ari Haapanen, Karoliina Auvinen, Risto Soukka, Hannu Törmä, Susanna Kujala, Johanna Pohjola, Anne Mäkiranta, Petri Välisuo, Kaisa Grönman, Rathan Kumar, Saija Rasi, Eeva Lehtonen, Perttu Anttila		
Title of publication	Opportunities and limitations of distributed energy		
Name of series and number of publication	Publications of the Government´s analysis, assessment and research activities 35/2017		
Keywords	Renewable energy, distributed energy, potential, regional economy		
Release date	March, 2017	Pages 109	Language Finnish

Abstract

Distributed production of energy is an opportunity that strongly affects the Finnish regional economy. Bioenergy could potentially provide one third of all energy produced in Finland. There are regional differences in its potential and regional economic impacts in terms of its use. The largest impacts on employment and economy would be in Northern and Eastern Finland. The exploitation of the still unused potential of bioenergy is recommended.

Technical solutions for the distributed production of energy are still evolving. The performance and capacity, prices and costs of use of the present solutions will presumably become more feasible. For instance, new innovations are expected for geothermal solutions. The development of seasonal storage would enable the deployment of large quantities of heating capacity.

Local and regional circumstances will have a major impact on the case buildings according to life cycle analyses and evaluations of climate change mitigation potential. It will not be possible to rank different technical solutions unambiguously. Instead, they must be evaluated case by case. The operational environment will affect the potential of emission decrease and life cycle costs, including the cost of CO₂ reduction.

The replacement of fossil fuels by renewable energies was analysed by feasibility calculations. In addition, the aim was to identify the main bottlenecks. Economic incentives for making prices for renewable energy more feasible should be used in order to improve the profitability of new investments. Energy and climate policy should create a stable and predictable investment environment for renewable energy. The establishment costs, including capital costs, are normally one of the main thresholds for implementing distributed energy. The prices, including e.g. high R&D costs, are always higher for technologies in the early phases of their life cycle compared with established prevailing older solutions.

This publication is part of the implementation of the Government Plan for Analysis, Assessment and Research for 2016 (tietokayttoon.fi/en).

The content is the responsibility of the producers of the information and does not necessarily represent the view of the Government.

ALKUSANAT

Valtioneuvoston kanslia julisti 7.12.2015 alkaen haettavaksi valtioneuvoston päätöksentekoa tukevan selvitys- ja tutkimustoiminnan määrärahat: Valtioneuvoston päätöksentekoa tukevan selvitys- ja tutkimustoiminnan hakuilmoitus (2016). Hakujulistus perustui valtioneuvoston päätöksentekoa tukevaan vuoden 2016 selvitys- ja tutkimussuunnitelmaan (valtioneuvoston päätös 3.12.2015). Hankkeiden valintakriteereiksi on esitetty relevanssi, vaikuttavuus, hyödynnettävyys, laatu ja toteutettavuus. Vaasan yliopisto jätti painopistealueelle ”Biotalous ja puhtaat ratkaisut”, teema 4.1.1 alakohta 4 ”Mikä on hajautetun energian rooli osana uusiutuvan energian ratkaisuja” hakemuksen ”Hajautetun uusiutuvan energian mahdollisuudet ja rajoitteet (HEMU)” 18.01. 2016. Hankkeen vastuullisena johtajana toimi johtaja Pekka Peura (Levón instituutti). Hankesuunnitelmasta hyväksytyiksi tulivat kohdat:

- 1.”Uusiutuvan energian potentiaali ja aluetalous” sekä
- 2.”Uusiutuvan energian tekniset ratkaisut ja polttoaineet”.

Sopimus allekirjoitettiin 08.06.2016.

Selvitys on toteutettu osaselvityksistä koostuvana artikkelikokoelmana. Raportin toimittamisesta vastasivat FT Erkki Hiltunen ja DI, KTM Anne Mäkiranta. Osaselvitysten tekijöitä ovat Vaasan yliopiston Levón-instituutista johtaja FT Pekka Peura ja projektipäällikkö, KTM Ari Haapanen, Vaasan yliopiston teknillisestä tiedekunnasta tutkimusjohtaja, FT Erkki Hiltunen, projektipäällikkö TkT Petri Välisuo ja projektipäällikkö, DI, KTM Anne Mäkiranta ja tutkija ins. Rathan Kumar. Helsingin yliopiston Ruralia instituutista mukana olivat professori Hannu Törmä ja tutkija, HTM Susanna Kujala. Lappeenrannan teknillisestä yliopistosta mukana olivat professori Risto Soukka ja TKT Kaisa Grönman, Aalto-yliopiston kauppakorkeakoulusta projektipäällikkö, DI Karoliina Auvinen, Suomen ympäristökeskuksesta erikoistutkija, FT Johanna Pohjola sekä Lukesta erikoistutkija, FT Saija Rasi, tutkija Eeva Lehtonen ja erikoistutkija Perttu Anttila.

Tutkimuksessa esitetyt tulokset, näkemykset ja johtopäätökset ovat tutkimusryhmän omia, eivätkä välttämättä heijasta tutkimuksen ohjausryhmään osallistuneiden ministeriöiden näkemyksiä.

Työryhmä luovuttaa kunnioittaen loppuraporttinsa Työ- ja elinkeinoministeriölle

Helsingissä 15.01.2017

Pekka Peura
Hannu Törmä
Anne Mäkiranta
Susanna Kujala
Saija Rasi

Erkki Hiltunen
Karoliina Auvinen
Johanna Pohjola
Kaisa Grönman
Eeva Lehtonen

Risto Soukka
Ari Haapanen
Petri Välisuo
Rathan Kumar
Perttu Anttila

SISÄLLYS

Alkusanat	5
1. johdanto	7
1.1 Taustaa	7
1.2 Selvityksen tavoitteet	9
2. BIOENERGIAN POTENTIAALI JA UUSIUTUVAN ENERGIAN ALUETALOUS	11
2.1 Bioenergian potentiaalit Suomessa	11
2.2 Uusiutuvan energian aluetaloudelliset vaikutukset.....	18
2.3 Johtopäätökset	22
3. UUSIUTUVAN ENERGIAN UUSIA TEKNISIÄ RATKAISUJA JA POLTTOAINEITA	24
3.1 Bioenergia	24
3.2 Tuulienergia	29
3.3 Geoenergiaratkaisut lämmitykseen ja viilennykseen.....	31
3.4 Aurinkoenergia	37
3.5 Hybriditekniikat	40
4. TEOLLINEN SYMBIOOSI	46
5. HAJAUTETUN JA UUSIUTUVAN ENERGIAN CASE-TUTKIMUKSIA ASIAKKAAN, ILMASTOVAIKUTUSTEN JA ELINKAARIKUSTANNUSTEN NÄKÖKULMASTA	50
5.1 Johdanto	50
5.2 Case-tarkastelut	52
5.3 Yhteenveto case-tutkimustuloksista	63
6. UUSIUTUVAN ENERGIAN INVESTOINTIEN TALOUDELLISET MAHDOLLISUUDET JA RAJOITTEET	66
6.1 Johdanto: Kannattaako öljyä ja hiiltä korvata uusiutuvalla energialla Suomessa?	66
6.2 Uusiutuvan energian hybridiratkaisut keskiössä hiilen ja öljyn korvaajana	66
6.3 Energiayhtiöiden, kuntien ja kotitalouksien investointikriteerit ja investointiympäristöt	75
6.4 Investointien kannattavuuslaskelmien analysointimenetelmät ja lähtöarvot.....	79
6.5 Tulokset: korvausinvestointien taloudelliset mahdollisuudet ja rajoitteet.....	81
6.6 Yhteenveto	91
6.7 Toimenpidesuosituksiset	92
YHTEENVETO	95
LÄHTEITÄ JA TAUSTA-AINEISTOJA	98
Liitteet	105

1. JOHDANTO

1.1 Taustaa

Energiasektori on kokemassa valtavaa muutosta globaalisti, ja kehitys näkyy myös Suomessa. Erityisen suuria toiveita on kohdistunut uusiutuvan energian käytön lisäämiseen, jopa täydellisen omavaraisuuden saavuttamiseksi uusiutuvalla energialla. Käynnissä on yhteiskunnallinen muutosprosessi, ”rakenteistuminen”, jossa useat osa-alueet ovat kehittymässä: esimerkiksi toiveikkuus on noussut, asenteet ja yleinen mielipide ovat muuttuneet, kehitystä tukevat toimintaohjelmat ovat vakiintuneet politiikkaan, lainsäädäntöä ja muuta sääntelyä on mukautettu, kuntien ja valtion virkakoneisto, kuluttajakäyttäytyminen ja markkinat ovat kehittyneet, ja tekniikan kehitys on kiihtynyt ja arvoketjut ovat vakiintumassa niin, että yksittäisten teknisten parannusten ohella voidaan jo kehittää systeemisen tason ratkaisuja. Tätä kehitystä ovat ajaneet eteenpäin muun muassa seuraavat vaikuttimet:

- Yleinen mielipide on tukenut energiasektorin uudistumista voimakkaasti jo kaukaa viime vuosisadalta lähtien, ja kestävä energiahuolto on ollut kansainvälisessä politiikassa yksi kärkiteemoista.
- Ilmastonmuutoksen torjunnassa energiasektorin uudistuminen on yksi tärkeimmistä osatekijöistä. Energiantuotanto fossiilisilla polttoaineilla on merkittävin ihmisten aiheuttamien kasvihuonekaasujen lähde. Päästöjen vähentäminen, ilmastonmuutoksen hillintä ja muutos kohti hiilineutraalia yhteiskuntaa tarkoittaa fossiilisten polttoaineiden korvaamista energiatehokkuudella ja uusiutuvilla energialähteillä.
- Uusiutuvan energian potentiaali on osoitettu erittäin suureksi niin Euroopassa kuin globaalisti: energianlähteiden saatavuuden perusteella uusiutuvan energian mobiilisointi ja omavaraisuuden saavuttaminen on realistinen tavoite.
- Uusiutuvaa energiaa hyödyntävien teknisten ratkaisujen taloudellinen kannattavuus on kohentunut. Useat ratkaisut ovat jo olleet kauan kannattavia investointeja. Monissakin tapauksissa, joissa kannattavuus näyttää heikolle aluetaloudelliset vaikutukset ovat kuitenkin huomattavat – puhutaan alueellisesta lisäarvosta, jossa myönteiset vaikutukset kohdistuvat työllisyyteen ja alueiden elinvoimaisuuteen laajasti.
- Tekniikan kehitys on kiihtynyt, ja uusiutuvaa energiaa hyödyntävien ratkaisujen yleistyminen ja leviäminen on globaalisti valtavan nopeaa. Myös uusia innovaatioita syntyy – oletettavasti motivaatio niihin syntyy juuri kiihtyvän kehityksen ja uusien markkinoiden syntymisen myötä.

Tämän ”uuden maailman” edistymisen tiellä on kuitenkin vakavia esteitä:

- Suuret ja vakiintuneet alan toimijat eivät tue ja itse asiassa pyrkivät aktiivisesti estämään uusien ratkaisujen yleistymistä. Oman liiketoiminnan suojeleminen on luonnollinen reaktio, mutta samalla se kertoo uudistumisen kyvyttömyydestä tai siihen haluttomuudesta.
- Uusiutuvaa energiaa käyttävien teknisten ratkaisujen leviäminen ja erityisesti niiden muodostuminen systeemisen tason kokonaisuuksiksi merkitsee täydellistä muutosta verrattuna nykyiseen energiantuotantoon. Uudet ratkaisut kilpailevat reaaliajassa markkinoilla, joilla tuotantolaitokset ovat vakiintuneet ja elinkaarensa kypsässä vai-

heessa – vastassa on infrastruktuuri, jonka investoinnit on kuoletettu ja käyttökulut alhaiset, ja sekä yhteiskunnalliset tukiprosessit että sen omat arvoketjut ovat vakiintuneet.

- Uusiutuvan energian tekniikat ovat toistaiseksi niin uusia, että niiden arvoketjuilla ei ole ollut aikaa kehittyä. Massatuotannon edut ja yhteiskunnallinen rakenteistuminen voivat tukea näitä ratkaisuja vasta pidemmän ajan kuluessa.
- Muutos on laaja yhteiskunnallinen prosessi alueellisesti, valtakunnallisesti ja kansainvälisesti. Se koskee suurinta osaa ihmisistä, yksittäisistä kansalaisista, perheistä ja tilallisista liiketoimintaan ja julkiseen sektoriin. Myös eri toimijoiden roolit ovat murroksessa. Muutokseen on oleellista – muutos osallistaa kaikki sidosryhmät: kuluttajat ja tuottajat, laitevalmistajat, raaka-aineiden tuottajat sekä yleisten toimintaedellytysten mahdollistajat.
- Julkinen tuki fossiiliselle energialle on globaalisti edelleen yli kymmenkertaista verrattuna uusiutuvan energian saamiin tukiin. Tuki ei kaikissa tapauksissa kohdistu suorina tukina energian hintoihin (tariffit) tai investointeihin, vaan suurten rahamäärien kohdistamista tai ohjaamista esimerkiksi verotuksen avulla fossiilienergian arvoketjuihin. Näin ollen uusiutuva energia joutuu myös tästä näkökulmasta erittäin epäreiluun kilpailutilanteeseen, jossa jo vakiintunutta sektoria edelleen ylläpidetään ja tuetaan runsaskätisesti. Tämä on syytä huomioida, kun uusiutuvaa energiaa miettään sen edistämiseksi käytettyjen tukien vuoksi. Jos kaikki tuet poistettaisiin kaikilta energiamuodoilta ja fossiilisen polttoaineiden hinnoissa olisi mukana sen käytöstä aiheutuvat ympäristö- ja terveyshaittakustannukset, olisi uusiutuva energia nykytilanteessa jo selvästi edullisinta.

Uusiutuvan energian hyödyntäminen yleistyy joka tapauksessa. IEA:n (International Energy Agency) ennusteen mukaan öljyn ja hiilen käytön osuuden lasku primäärienergioissa jatkuu. Voimakkaimmin osuuttaan vuoteen 2035 kasvattavat kaasu ja biomassa sekä jätteet. Cleantech on yksi nopeimmin kasvavista aloista niin globaalisti kuin Suomessakin. Vuosittaisen kasvun odotetaan maailmalla olevan 10 % luokkaa. Yhä useammin siirrytään yksittäisistä erillisistä laitoksista ja tuotannon yksiköistä systeemisen tason alueellisiin kokonaisuuksiin. Useat skenaariot ennakoivat, että uusiutuvilla energianlähteillä tuotetaan jo lähivuosikymmeninä suurin osa maapallon energiasta. Energiasektorin kokonaisuuden tasolla tämä johtaa visioon energiamarkkinoiden dikotomiasta eli jakautumisesta kahteen rinnakkaiseen ja keskenään synergiseen osaan, joiden roolit poikkeavat toisistaan:

- Nykyinen keskitetty energiantuotannon osa vastaa tulevaisuudessa energia-intensiivisen teollisuuden ja suurimpien asutuskeskusten energiahuollosta
- Uusi hajautettuun strategiaan perustuva osa vastaa kaikesta muusta energiahuollosta, ja se myös tuottaa energiaa asutuskeskuksille ja yksittäisille kuluttajille.

Erityisesti hajautettu strategia kykenee mobilisoimaan uusiutuvia luonnonvaroja hyödylliseen käyttöön. Suurin osa Suomesta voisi olla pinta-alan mukaan alueellisesti energian tuotannossaan yliomavarainen. Määritelmän mukaan ”hajautettu” tarkoittaa energian tuottamista jakeluverkkoon, mutta se ei sellaisenaan viittaa tuotantoyksikön kokoluokkaan. Esimerkiksi paikalliset energialaitokset voivat olla kohtalaisen kookkaita, ja silti ne tuottavat hajautettua energiaa jakeluverkkoon. Myös keskitetty struktuuri on siirtymässä uusiutuvan energian käyttöön. Uusiutuvan energian käytön leviämisen kannalta ei siis ole merkitystä sillä, puhutaanko keskitetystä vai hajautetusta rakenteesta tai pienistä vai suurista yksiköistä.

Suomi on edelleen tienhaarassa ja pohtii, millaisen valinnan tekee? Suomessa ovat perinteisesti vallinneet keskittyneet energiamarkkinat. Tulevaisuudessa joudumme vähitellen siirtymään yhä enemmän uusiutuvan energian käyttöön johtuen muun muassa ilmastonmuutoksesta seurauksineen, fossiilisen energian markkinoiden muutoksesta ja globaalien energian tarpeen kasvusta. Kansainvälisen ilmastomuutospaneelin (IPCC) raportti esittää, että seuraavan kymmenen vuoden aikana kasvihuonepäästöjen kasvu on saatava pysäytettyä ja kääntymään voimakkaaseen laskuun. Viimeistään vuoteen 2100 mennessä tulee myös luopua kokonaan fossiilisten polttoaineiden käytöstä. Mikä tulee olemaan keskitetyn energiantuotannon ja hajautetun energiantuotannon suhde Suomessa siirryttäessä vuoteen 2050?

Monista tässä selostetuista seikoista käydään Suomessa edelleen vilkasta keskustelua, ja poliittisten päätösten aika on pian käsillä. Moni asia kaipaa vielä lisäselvyyttä. Esimerkiksi uusiutuvan energian potentiaaleista ja niiden mahdollisuudesta korvata fossiilienergiaa on edelleen toisistaan poikkeavia käsityksiä. Sama koskee vaikutuksia työllisyyteen, talouteen ja yhteiskuntaan laajemminkin. Yleistäen voitaisiin todeta, että ulkomaisen tuontienergian hankinta vaikuttaa kansantalouteen ja johtaa keskitettyyn energian hankintaan ja energian käyttöön. Toisaalta uusiutuvan energian tuotanto hajautetusti vaikuttaa aluetalouteen. Paikallinen energiantuotanto lisää paikallista aktiivisuutta ja työllisyyttä. Lisäksi tekniikan nopea kehittyminen on hämärtänyt ymmärrystä uudenlaisesta energiakokonaisuudesta. Valtakunnallisesti kattava tutkimus aiheesta puuttuu. Vaikka osatekijöistä on hajallaan olevaa tietoa runsaasti, tarvitaan kokonaisuutta hahmottavaa tietoa kipeästi.

Käsillä olevan selvityskokoelman tarkoituksena on osaltaan vastata puuttuvan tiedon tarpeeseen ja tuottaa käyttökelpoista tietoa ministeriöiden valmistelutyön ja poliitikkojen päätöksenteon pohjaksi. Pyrimme luomaan käsityksen uusiutuvan energian potentiaaleista ja aluetaloudellisesta merkityksestä erityisesti bioenergian osalta, sekä kuvaamaan uusituvan energian teknisiä ratkaisuja ja tämän hetkistä kilpailukykyä suhteessa fossiilisen energian käyttöön.

Lukuisia muita uusiutuvan energian käyttöönoton kysymyksiä selvitetään muissa samaan aikaan käynnissä olevissa selvityksissä.

1.2 Selvityksen tavoitteet

Tämä hanke jakaantuu kahteen osaan ja useampaan osaselvitykseen. Ensimmäisessä osassa (kappale 2) tarkastellaan bioenergian potentiaalia Suomessa maakunnittain sekä uusiutuvan energian potentiaalista aluetaloudellista merkitystä Suomen viidellä suuralueella. Tämä on ensimmäinen valtakunnallinen selvitys, jossa on arvioitu näiden osatekijöiden alueellista jakaumaa näin kattavasti. Potentiaalilla tarkoitetaan käytettävissä sekä osittain jo käytössä olevaa bioenergian määrää, joka olisi mahdollista hyödyntää nykyisin käytössä olevilla menetelmillä. Työssä on lisäksi arvioitu summittaisesti täydellisen uusiutuvaan energiaan perustuvan omavaraisuuden reunaehdoja ja sitä, kuinka paljon muuta uusiutuvaa kuin bioenergiaa tarvittaisiin tyydyttämään Suomen koko energian kulutus. Laskelmissa on voitu tarkastella ainoastaan vuotuista kokonaisenergiämäärää, eikä esimerkiksi kulutushuippujen ja tehontarpeen heilahteluiden vaikutusta energiahuollon kokonaisuuteen ole analysoitu.

Aluetaloudellisessa laskelmassa selvitetään 100% energiaomavaraisuuden merkitystä. Investointien merkitystä ei ole työssä voitu arvioida. Selvää on, että investointeja tällaiseen tilanteeseen pääsemiseksi tarvitaan erittäin runsaasti. Investointien kustannukset vaikuttavat monella tapaa uuden infrastruktuurin talouteen ja toimintaan. Kokonaisen järjestelmän synnyttäminen Suomeen kestää jopa vuosikymmeniä. Yhteiskunnallinen rakenteistuminen on hyvin monimutkainen prosessi, aina kansalaisten asenteista säädösten kehittymiseen, tekniseen evoluutioon ja kokonaisten arvoketjujen kehittymiseen asti. Investointeja ei ole mukana laskelmissa, vaan selvityksen ajatus on määrittää 100 % energiaomavaraisuuden kokonaismerkitys sellaisessa tilanteessa, jossa investoinnit ovat jo toteutettu.

Selvityksen ensimmäisessä osassa haetaan vastauksia seuraaviin kysymyksiin:

- Mikä on bioenergian potentiaali Suomessa maakunnittain?
- Kuinka paljon muuta uusiutuvaa energiaa tarvitaan 100% energiaomavaraisuuden saavuttamiseksi?
- Mikä on 100% uusiutuvalla energialla saavutettavan omavaraisuuden aluetaloudellinen kokonaismerkitys ja miten se jakautuu Suomen suuralueilla?

Toinen osa (kappaleet 3-6) tarkastelee uusiutuvan energian hyödyntämisen teknisiä ja taloudellisia ratkaisuja. Osaselvityksissä on tarkasteltu sellaisia uusiutuvan energian muotoja, joiden tuotannossa on merkittävää kasvupotentiaalia, ja jotka ovat jo käytössä tai otettavissa tuotantoon suhteellisen lyhyessä ajassa. Keskeisiä uusiutuvan energian muotoja Suomessa ovat tulevaisuudessa bio-, tuuli-, geo- ja aurinkoenergia. Tekniikat eivät kuitenkaan ole valmiita vaan kehittyvät jatkuvasti, ja kokonaan uusia ratkaisuja testataan koko ajan. Työssä on tarkasteltu ministeriöiden kanssa käydyissä keskusteluissa esiin nousseita kysymyksiä, jotka liittyivät teknologioiden sovelluskohteisiin, monistettavuuteen, ilmastovaikutuksiin, käyttöönoton esteisiin sekä mahdollisuuksiin fossiilisen energian korvaamisessa. Lämmityksen ohella viilennykset merkitys, erityisesti vientiä ajatellen, on noussut merkittäväksi (luku 3).

Koska uusiutuvan energian saanti yleensä vaihtelee vuodenajan mukaan, on hybridien käyttöön kiinnitetty huomiota. Hyvin valittu hybridiratkaisu vähentää kausivaihteluja. Koska uusiutuvan energian käyttöönottoon usein liittyy useita eri vaiheita, on tässä esitelty kaksi esimerkkiä teollisesta symbioosista, joka useamman yrityksen yhteisvoimin mahdollistaa monivaiheisen prosessin toteuttamisen (luku 4). Yleinen piirre on, että käytön lisääntyessä uusien tekniikoiden kustannukset laskevat.

Työssä tarkastellaan hajautetun uusiutuvan energian esimerkkitapauksia arvioiden elinkaarinäkökulmaa, vaihtoehtoisten järjestelmien elinkaarikustannuksia asiakkaan näkökulmasta ja ilmastovaikutuksia. Julkisessa keskustelussa usein eri energiamuotoja pyritään asettamaan paremmuusjärjestykseen. Luvussa 5 esitellään kolme case-tutkimusta, jotka on tehty rakennuksille. Tavoitteena oli selvittää paikallisten ja alueellisten olosuhteiden vaikutusta lopputulokseen. Lisäksi on kiinnitetty huomiota hiilidioksidonvähennykselle tulevaan hintaan.

Harkittaessa uusiutuvan energian eri tekniikoiden käyttöönottoa, tulee selvittää myös eri investointien taloudelliset mahdollisuudet ja rajoitteet. Kysymykset voidaan asettaa esimerkiksi muodossa: "Paljonko uusiutuva energia maksaa verrattuna fossiiliseen energiaan" tai "Kannattaako energiayhtiöiden, kuntien tai omakotitalojen asukkaiden korvata hiilivoimaa tai öljylämmitystä tämän hetkisillä hintatasoilla. Luku 6 tarkastelee näitä kysymyksiä.

2. BIOENERGIAN POTENTIAALI JA UUSIUTUVAN ENERGIAN ALUETALOUS

Pekka Peura, Ari Haapanen, Rathan Kumar Alagirisamy, Levón-instituutti, Vaasan yliopisto
Saija Rasi, Eeva Lehtonen ja Perttu Anttila, Luonnonvarakeskus
Hannu Törmä ja Susanna Kujala, Ruralia Instituutti, Helsingin yliopisto

2.1 Bioenergian potentiaalit Suomessa

Laskentamenetelmät

Bioenergian potentiaalilaskelmissa on otettu huomioon yhdyskuntien, maa- ja metsätalouden sekä teollisuuden tuotannosta käyttämättä jäävät jakeet, joita ei aktiivisesti hyödynnetä tuotteiden valmistuksessa, tai joiden käyttö energian tuotannossa ei estä tai vähennä niiden käytettävyyttä jalostusketjuissa ja esimerkiksi kiertotaloudessa. Näin laskettu arvio edustaa bioenergian teknisesti saatavilla olevaa potentiaalia. Mukana olevat materiaalit ovat aina jonkinasteisen käsittelyn kohteena, ne kertyvät hallittavissa olosuhteissa ja usein teollisia prosesseja muistuttavissa kohteissa. Tämä tarkoittaa myös, että niiden ottaminen hyödynnettäväksi energiantuotannossa on realistista ja teknisesti mahdollista.

Energiantuotannossa hyödynnettävissä olevien materiaalien potentiaalit on muutettu yhteismitallisiksi energiayksiköiksi (TWh, terawattitunti) käyttäen laskelmissa kirjallisuudesta saatavia yleisesti käytettyjä muuntokertoimia. Niiden valinnassa on käytetty varovaisuusperiaatetta niin, että ylioptimistiset arviot on voitu välttää. Myös materiaalien valinnassa on noudatettu varovaisuutta. Esimerkiksi runko- ja massapuu ja ruuantuotantoala on jätetty laskelmien ulkopuolelle, vaikka oletettavasti osaa niistä tulevaisuudessa voidaan käyttää myös energian raaka-aineiden tuotantoon.

Laskelmat perustuvat vuotuisesti Suomessa käytettävään energiamäärään (TWh/a) ottamatta tietoisesti kantaa kausittaiseen tehovaihteluun, huipputehon tuotantoon sekä eri tuotantopotentiaalien ja eri energiamuotojen kulutuksen keskinäiseen korvaavuuteen. Laskelmat ja arviot ovat teoreettisia, ja niissä on otettu huomioon energiaa tuottavan laitoksen hyötysuhde eli energiahäviö mutta ei materiaalien kuljetuksesta aiheutuvia energiahäviöitä, koska ne vaihtelevat tapauskohtaisesti ja ideaali tapauksessa voivat olla häviävän pieniä. Laskelmien lopputulos edustaa siten tuotetun energian määrää.

Uusiutuvan energian potentiaalın alueellista tarkastelua varten alueiksi valittiin maakunnat, joista eri materiaalien kertymätilastot ovat saatavissa. Ruralia-instituutin aluetaloudellinen tarkastelu toteutettiin viidellä suuralueella, joista saatiin suoraan yhdistämällä tiedot maakuntien tilastoista sekä niistä tehdyistä laskelmista. Uusiutuvan energian aluetaloudellisen merkityksen arviointia varten bioenergian eri fraktiot jaettiin potentiaalın laskelmissa kahteen osaan:

1. Mädätyskelpoinen jae, joka hyödynnetään biokaasulaitosten syötteinä
2. Poltettava materiaali joka hyödynnetään CHP-laitoksissa (Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotantolaitos).

Jako perustuu ajatukseen, että sekä biokaasun tuotannon että polton tekniikat ovat kypsässä markkinavaiheessa, niiden kustannuksista on olemassa tutkittua tietoa, ja niiden tuottama energia on helposti hyödynnettävissä olemassa olevilla vakiintuneilla tekniikoilla. Korvaavia ratkaisuja, joilla esimerkiksi puusta voidaan valmistaa liikennepolttoaineita, on olemassa ja kehitteillä, mutta tämän tutkimuksen kannalta niiden taloudellisen vaikuttavuuden arviointi ja tutkiminen on hankalaa. Tuotantomenetelmä vaikuttaa energiantuotannon arvoon.

Seuraavassa on lueteltu potentiaalilaskelmissa käytetyt materiaali- ja jätteenkäsittelymenetelmät sekä niiden oletettu tuotantomenetelmä:

- Yhdyskuntien ja teollisuuden sivutuotevirrat
 - Yhdyskuntien poltettava, kiinteä jäte; poltto
 - Yhdyskunnista kerättävä puujäte; poltto
 - Yhdyskuntien jätevesi; mädätys
 - Teollisuuden biohajoava jäte; mädätys
- Maatalouden sivutuotevirrat
 - Viljakasvien olki; oletukset: 50% kerättävissä, poltto (45% silputaan peltoon, muu hyödyntäminen 5%)
 - Heinäkasveja kasvavat sekä kesanto- ja luonnonhoitopellot, mädätys (10% heinän ja nurmen viljelyalasta, vastaa nykyistä hävikkiä ja ylituotantoa; lisäksi kesantoala vastaavasti)
 - Tuotantoeläinten kasvatuksen sivutuotevirrat, mädätys (sikojen, lehmien, lampaiden, kanaeläinten ja hevosten lannat)
- Hakkuutähteet ja harvennuspuu, poltto (Kuusikkovaltaisten metsien latvukset, oksisto ja kannot; harvennuksilta kerättävissä oleva kokopuu)
- Metsätalouden ja metsäteollisuuden sivutuotevirrat, poltto (Metsähake järeästä runkopuusta, metsäteollisuuden sivutuotteena syntyvät kuori, puru, puutähdehake, puupelletit ja briketit, kierrätyspuu sekä muut)

Tilastot yhdyskuntien ja teollisuuden jätteistä ja sivuvirroista on saatu ympäristöhallinnon ylläpitämästä VAHTI tietokannasta. Se sisältää tiedot vain sellaisista yrityksistä, jotka ovat ympäristölupavelvollisia. Kaikki muut tiedot on saatu Luonnonvarakeskuksen (Luke) tilastoista Luken toimittamana. Maatalouden sivutuotevirrat sekä hakkuutähteet ja harvennuspuu ovat laskennallisia potentiaaleja.

Tilastot muista metsätalouden ja -teollisuuden materiaaleista perustuvat tilastoituihin tietoihin kunkin materiaalin käytetyistä määristä. Niistä varsinaista potentiaalitietoa ei ole saatavissa. Laskelmat ottavat huomioon siis käytetyn puuaineksen määrän, ja periaatteessa tämä sisältää oletuksen, että käytön määrä vastaisi potentiaalia. Todellisuudessa näin tuskin on, ja osa näistäkin materiaaleista jää tällä hetkellä käyttämättä. Suurin puuttuva erä laskelmissa on metsäteollisuuden lietteet (kuten mustalipeä), joiden energia-arvo on huomattavan suuri. Ne on jätetty pois siitä syystä, että teollisuus itse käyttää ne omassa energiantuotannossaan. Näin ollen suuri joukko yrityksiä ja materiaali-eräitä näin jätteissä kuin teollisuudessa puuttuu laskelmasta, mikä korostaa laskelman varovaisuutta.

Bioenergian potentiaali Suomessa maakunnittain

Suomen bioenergian tuotantopotentiaali tämän laskennan perusteella on esitetty taulukossa 2.1. Luvut sisältävät bioenergian tämän hetkisen käytön. Kokonaismäärä on runsaat 90 TWh vuodessa. Metsäteollisuuden lietteitä käytetään tämän lisäksi noin 38 TWh/a, ja bioenergian yhteenlaskettu potentiaali – nykyään jo käytetty ja käyttämätön bioenergia – on siten noin 130 TWh/a. Puun merkitys on ylivoimaisesti suurin, ja se vastaa kokonaispotentiaalista noin 80 prosenttia. Vastaavasti kaikesta muusta oljen osuus on noin 40 prosenttia. Metsäteollisuuden merkitys näkyy luontevasti myös alueellisessa jakaumassa.

Taulukko 2.1. Bioenergian tuottopotentiaali (TWh/a) maakunnittain Suomessa.

Bioenergian tuotto- potentiaali	Puu	Oiki	Jäte	Maa- talous	Teoll. biojäte	Puhd. liete	Yht
SUOMI yhteensä	67,0	10,1	5,73	6,74	1,52	0,24	91,3
Uusimaa	2,75	0,83	1,67	0,37	0,04	0,03	5,69
Varsinais-Suomi	1,90	1,53	0,50	0,56	0,16	0,00	4,65
Satakunta	2,78	0,79	0,24	0,40	0,08	0,00	4,28
Kanta-Häme	1,67	0,51	0,18	0,25	0,00	0,02	2,64
Pirkanmaa	4,13	0,81	0,53	0,46	0,03	0,03	5,99
Päijät-Häme	2,88	0,37	0,21	0,20	0,02	0,01	3,69
Kymenlaakso	3,74	0,41	0,19	0,20	0,01	0,04	4,59
Etelä-Karjala	4,17	0,24	0,14	0,24	0,00	0,01	4,80
Etelä-Savo	4,88	0,23	0,16	0,31	0,00	0,01	5,58
Pohjois-Savo	5,93	0,45	0,26	0,54	0,08	0,01	7,27
Pohjois-Karjala	5,35	0,26	0,17	0,32	0,01	0,00	6,12
Keski-Suomi	7,00	0,32	0,29	0,39	0,03	0,00	8,03
Etelä-Pohjanmaa	2,08	1,32	0,20	0,88	0,97	0,02	5,47
Pohjanmaa	2,37	0,78	0,19	0,41	0,05	0,01	3,80
Keski-Pohjanmaa	0,61	0,18	0,07	0,17	0,00	0,01	1,05
Pohjois-Pohjanmaa	5,93	0,93	0,43	0,76	0,02	0,02	8,08
Kainuu	3,31	0,04	0,08	0,10	0,01	0,01	3,54
Lappi	5,32	0,02	0,19	0,15	0,00	0,03	5,71
Ahvenanmaa	0,24	0,04	0,03	0,03	0,00	0,00	0,34

Bioenergian käyttö Suomessa on jo nykyään mittavaa. Tiedot bioenergian käytöstä vuonna 2015 maakunnittain on koottu taulukkoon 2.2. Luvut puuenergian tuotannosta ja hyödyntämisestä perustuvat Luonnonvarakeskuksen tilastoihin, suppeahkoon asiantuntijoiden haastatteluun oljen käytöstä kulutusarvioon sekä biokaasun tuotannosta biokaasulaitosrekisterin (nr. 19) tietoihin vuodelta 2015. Kyselytutkimuksessa oljen kulutukseksi arvioitiin varovaisuusperiaatteen mukaan 5 % ja sitä käytetään nykyään lähinnä kuivikkeena sika- ja nautatiloilla.

Nykyinen bioenergian käyttö on vielä potentiaaliakin selvemmin keskittynyt puuhun, ja sen hyödyntämisessä lähes yksinomaan polttoon. Alueellisessa jakaumassa on luonnollista, että käytön määrät ovat suurimmat niissä maakunnissa, joissa on metsäteollisuutta. Biokaasun

tuotanto on ollut kasvussa, ja esimerkiksi liikennekäyttö on yleistymässä. Kuitenkin tuotantomäärät ovat edelleen pieniä varsinkin verrattuna puun käyttöön. Oljen hyödyntäminen kuivikkeena ei tietenkään ole energiakäyttöä ja taulukon 2.2 oljen käyttö 5% ei varsinaisesti vaikuta laskelmiin vaan antaa kuvan tämän hetkisestä kulutuksesta.

Taulukosta 2.3 käy ilmi paljonko uusiutuvan energian potentiaalia on jäljellä, kun siitä on vähennetty maakunnittain niissä jo hyödynnettävä potentiaalilaskelmiin sisällytetty materiaali. Laskelman mukaan Suomessa on hyödynnettävissä vuotuisesti yhteensä 50,8 TWh bioenergiaa, joka ei kilpaile ruuantuotannon, metsätalouden tai muun teollisen tuotannon kanssa.

Taulukko 2.2. Bioenergian käyttö (TWh/a) maakunnittain.

Bioenergian kulutus 2015	Puu	Olki	Biokaasu	Yhteensä
SUOMI TOTAL	34,9	0,50	0,63	36,0
Uusimaa	2,39	0,04	0,27	2,69
Varsinais-Suomi	1,01	0,08	0,06	1,14
Satakunta	2,27	0,04	0,01	2,32
Kanta-Häme	0,73	0,03	0,05	0,81
Pirkanmaa	2,57	0,04	0,03	2,64
Päijät-Häme	1,30	0,02	0,05	1,37
Kymenlaakso	1,88	0,02	0,01	1,91
Etelä-Karjala	3,18	0,01	0,00	3,20
Etelä-Savo	2,08	0,01	0,00	2,10
Pohjois-Savo	2,32	0,02	0,02	2,37
Pohjois-Karjala	2,10	0,01	0,02	2,13
Keski-Suomi	3,73	0,02	0,03	3,78
Etelä-Pohjanmaa	0,89	0,07	0,01	0,97
Pohjanmaa	2,03	0,04	0,03	2,10
Keski-Pohjanmaa	0,37	0,01	0,00	0,39
Pohjois-Pohjanmaa	2,42	0,05	0,02	2,49
Kainuu	0,93	0,00	0,00	0,93
Lappi	2,52	0,00	0,00	2,52
Ahvenanmaa	0,15	0,00	0,00	0,15

Suurin hyödyntämätön bioenergiapotentiaali on puussa, ja se sijoittuu itäiseen ja keskiseen Suomeen sekä Pohjois-Pohjanmaalle. Maatalouden sivutuotevirrat ja kesantopeltojen sato muodostavat toiseksi suurimman tuotantopotentiaalini, joka ei kuitenkaan ole kovinkaan paljoa merkittävämpi kuin jätteeksi luokiteltavien virtojen sekä maatalouden toisen sivutuotevirran eli viljan tuotannossa syntyvän oljen hyödynnettävissä oleva energiapotentiaali. Teollisuuden biojäte ja jätevesien puhdistuksen liete ovat energian tuottopotentiaaleiltaan vähäisimmät, mutta silti niissäkin on kohtuullisen merkittävästi hyödynnettävissä olevaa potentiaalia, esimerkiksi yksittäisissä kohteissa, ja varsinkin kun ne käytetään muita bioenergian jakeita hyödyntävien laitosten yhteydessä.

Taulukko 2.3. Bioenergian käyttämätön potentiaali (TWh/a) maakunnittain.

Bioenergian potentiaalia jäljellä 2015	Puu	Olki	Jäte	Maa-talous	Teoll. biojäte	Puhd. liete	Yht.
SUOMI TOTAL	32,2	5,03	5,73	6,11	1,52	0,24	50,8
Uusimaa	0,37	0,42	1,67	0,10	0,04	0,03	2,63
Varsinais-Suomi	0,90	0,76	0,50	0,49	0,16	0,00	2,82
Satakunta	0,51	0,39	0,24	0,39	0,08	0,00	1,61
Kanta-Häme	0,94	0,26	0,18	0,20	0,00	0,02	1,61
Pirkanmaa	1,56	0,41	0,53	0,43	0,03	0,03	2,99
Päijät-Häme	1,58	0,18	0,21	0,15	0,02	0,01	2,15
Kymenlaakso	1,86	0,21	0,19	0,19	0,01	0,04	2,49
Etelä-Karjala	0,98	0,12	0,14	0,23	0,00	0,01	1,49
Etelä-Savo	2,80	0,11	0,16	0,31	0,00	0,01	3,39
Pohjois-Savo	3,60	0,22	0,26	0,52	0,08	0,01	4,70
Pohjois-Karjala	3,25	0,13	0,17	0,31	0,01	0,00	3,87
Keski-Suomi	3,26	0,16	0,29	0,36	0,03	0,00	4,11
Etelä-Pohjanmaa	1,19	0,66	0,20	0,87	0,97	0,02	3,91
Pohjanmaa	0,34	0,39	0,19	0,38	0,05	0,01	1,35
Keski-Pohjanmaa	0,24	0,09	0,07	0,17	0,00	0,01	0,58
Pohjois-Pohjanmaa	3,51	0,47	0,43	0,74	0,02	0,02	5,17
Kainuu	2,38	0,02	0,08	0,10	0,01	0,01	2,60
Lappi	2,80	0,01	0,19	0,15	0,00	0,03	3,18
Ahvenanmaa	0,10	0,02	0,03	0,03	0,00	0,00	0,17

Bioenergian merkitys Suomen energiahuollon kokonaisuudessa voisi olla varsin huomattava. Vuoden 2014 tilastojen mukaan Suomen uusiutuvista energialähteistä tuotettu primäärienergian määrä oli 374 TWh/a. Yllä laskettu bioenergian potentiaali mukaan lukien metsäteollisuuden lietteet vastaisi tästä määrästä noin 35 prosenttia. Tällä hetkellä jo käytössä oleva bioenergia on vastaavasti noin 20% tuotetun energian kokonaismäärästä.

Bioenergian lisäksi Suomessa on jo tällä hetkellä käytössä runsaasti muita uusiutuvan energian lähteitä. Esimerkiksi tuuli- ja vesivoimaa sekä maalämpöä käytetään runsaasti, ja tuulen ja auringon hyödyntäminen ovat vahvassa kasvussa ja niiden potentiaali on lähes rajaton. Niiden arviointi ei kuulunut tämän hankkeen toimeksiantoon. Fossiilienergian korvaamisessa ne ovat kuitenkin välttämättömiä, ja valtakunnallista kokonaistilannetta on analysoitu seuraavassa.

Taulukkoon 2.4 on koottu vuoden 2014 tilastot energian tuotannosta Suomessa. Sen yläosassa on pääosa fossiilisista raaka-aineista, jotka periaatteessa tulisi lähitulevaisuudessa korvata uusiutuvalla energialla. Niiden kokonaismäärä on 181 TWh vuodessa. Vastaavasti taulukon alaosassa on nykyään jo käytössä olevat uusiutuvan energian lähteet, joita siis ei tarvitse korvata. Tähän osaan on liitetty myös ydinvoima, joka vaikuttaa energiahuollon kokonaisuuteen pitkälle tulevaisuuteen. Näiden lähteiden kokonaismäärä on 193 TWh/a.

Kun yllä laskettu bioenergian hyödyntämätön potentiaali otetaan huomioon, jää muulla uusiutuvalla kuin bioenergialla korvattavaksi 130 TWh tuotanto vuodessa. Lukujen vertaaminen suoraan on kuitenkin hankalaa, koska osa ilmoitetuista arvoista edustaa primäärienergiaa eli sitä energiamäärää, joka käytetään energian tuotantoon. Näitä ovat esimerkiksi öljytuotteet ”korvattavan energian” puolella ja vastaavasti puun pienkäyttö ja metsäteollisuuden jäteliemet uusiutuvassa energiassa. Bioenergian potentiaalit on kuitenkin systemaattisesti laskettu tuotetun energian määrinä, mikä vastaa energian määrää loppukäytössä. Vuoden 2015 tilaston mukaan energian loppukäyttö oli Suomessa 300 TWh/a. Varovaisen arvion mukaan todellisuudessa korvattavaksi jäävä fossiilinen energia olisi noin 100 TWh/a.

Taulukko 2.4. Energian tuotanto (TWh/a) Suomessa vuonna 2014 sekä fossiilisen energian korvaaminen uusiutuvalla energialla. Jo käytössä oleva uusiutuvaa energiaa ja ydinvoimaa ei tarvitse korvata.

Energialähde	TWh/a
Korvattava energia	
Dieselöljy	29
Jalostamokaasut yms.	10
Kevyt polttoöljyt	19
Kierrätysöljy	0
Kivihili	24
Koksi	5
Maakaasu	26
Masuuni- ja koksikaasu	6
Moottoribensiini	18
Muut kevyet ja keskiraskaat öljyt	1
Nestekaasut	3
Raskas polttoöljy	6
Sähkön nettotuonti	18
Turve	15
Fossiilisen energian kulutus yhteensä	181
Uusiutuva energia ja ydinvoima	
Lämpöpumput	5
Kierrätyspolttoaineet, yms.	8
Kaupunkikaasu	0
Puun pienkäyttö	17
Metsäteollisuuden jäteliemet	39
Teoll. ja energiantuotannon puupolttoaineet	38
Teollisuuden reaktiolämpö	2
Tuulivoima	2
Vesivoima	13
Ydinenergia	69
Aurinkovoima	0
Yhteensä	193
Energian kulutus yhteensä	374
Bioenergian käyttämätön potentiaali	51
Fossiilinen energia, joka jää korvattavaksi auringolla, tuulella ja muulla uusiutuvalla energialla	-130

Lähteet: Tilastokeskus, omat laskelmat

Saman aikaisesti käynnissä oleva Pöyry Management Consulting Oy:n selvitys on arvioinut rakennusten kattopinta-aloihin perustuen hajautetun aurinkoenergian tuotantopotentiaaliksi 14 GW, ja tuotanto voisi olla vuodessa noin 13 TWh. Laskelmassa ei ole otettu huomioon tuotantoa sopivilla maa-aloilla eikä suuria aurinkosähkövoimaloita tai aurinkolämmön tuotantoa. Kaikki nämä aurinkoenergian muodot voisivat varovaisesti arvioiden tuottaa yhdessä 30 TWh/a energiaa. Jäljelle jää siten noin 70 TWh:n vuosituotanto, joka olisi korvattava muulla uusiutuvalla energialla, ja jolla siis laskelmissa korvataan fossiilista energiaa. Aluetaloudellisten vaikutusten laskemista varten oletetaan, että tämä määrä tuotetaan tuulivoimalla. Suuntaava laskelma käsittelee vuotuista energian kokonaismäärää, eikä se kykene ottamaan huomioon energian eri käyttömuotoja, energian tarpeen kausivaihteluita eikä varastointia.

Kun yhden tuuliturbiinin teho on 3 MW ja käyttöaste 30%, saadaan yhden voimalan vuosien energian määräksi 7,88 MWh. Nämä luvut ovat jo tällä hetkellä alakanttiin, koska suurin osa rakennettavista voimaloista on kooltaan suurempia, ja esimerkiksi korkeutensa ansiosta ne ovat saavuttaneet selvästi parempia käyttöasteita. Varovaisuusperiaatteella, huomioiden käytettävyyttä pitkällä aikavälillä ml. tekniset ongelmat ja näillä oletuksilla 70 TWh vuosituotantoon tarvittaisiin noin 8900 tuuliturbiinia. Suomen tuulivoimayhdistyksen tilastojen mukaan Suomessa on tällä hetkellä tuulivoimalaprojekteja suunnitteilla, lupaprosessi käynnissä tai voimaloita rakenteilla siten, että valmiiden tuulivoimaloiden määrä, on tulevaisuudessa 4250-4900, mikäli kaikki projektit toteutuvat. Uusia tuulivoimala-projekteja tarvittaisiin siis runsaat 4000 lisää eli nykyisin valmiina tai vireillä oleviin verrattuna noin kaksinkertainen määrä.

Tämän varovaisuusperiaatteella tehdyn laskelman mukaan uusiutuvaan energiaan perustuva valtakunnallinen omavaraisuus on selvästi mahdollista saatavilla olevien energianlähteiden puolesta, ja se on toteutettavissa nykyisin käytettävissä olevilla teknisillä ratkaisulla. Selvitys tukee siten useita aikaisempia tutkimuksia. Kokonaan eri asia on pohtia sitä, kuinka energiaomavarainen Suomi lopulta käytännössä toteutetaan. Tästä on toistaiseksi vain spekulointia perustuvaa tietoa, ja hyvinkin selvää on, että kyseessä on pitkäkestoinen prosessi. Uusiutuvan energian mobilisointi voi hyvin todennäköisesti edetä nopeimmin maaseudulla, jossa kunkin alueen omavaraisuus olisi helpoiten saavutettavissa. Hajautettu strategia toimisi suomalaisen maaseudun elinvoiman kohentajana, ja maaseutu voisi palvella myös muuta Suomea tuottamalla energiaa ja energian raaka-aineita.

Yksi tärkeimpiä motiiveja energiaomavaraisuuden tavoittelemiseen on aluetalouden odotetta kohentuminen. Kiteytetysti yksittäisen alueen kannalta kyse on siitä, että nykyään alueelta pois virtaava ja fossiilienergian ostoon käytettävä rahasumma jäisikin omaan aluetalouteen. Valtakunnallisesti merkitys on periaatteessa aivan sama: kotimainen energiaomavaraisuus heijastuisi välttämättä koko maan kauppataaseeseen ja elinvoimaisuuteen. Silti jokaisen yksittäisen investoinnin on luonnollisesti oltava taloudellisesti järkevä, ja ennen kuin suuresta määrästä näitä investointeja muodostuu systeemisen tason kokonaisuus, on aikaa kulunut useita vuosia. "Taloudellinen järkevyys" tässä yhteydessä tarkoittaa muutakin kuin liiketaloudellista kannattavuutta, erityisesti aluetaloudellisen hyödyn suurta potentiaalia. Sitä tarkastellaan seuraavassa.

2.2 Uusiutuvan energian aluetaloudelliset vaikutukset

Taustatiedot

Tässä osiossa tavoitteena on arvioida uusiutuvaan energiaan perustuvan alueellisen omavaraisuuden aluetaloudellista merkitystä. Aluetaloudellisten vaikutusten laskentaa varten tarvittava perusaineisto on kerätty Tilastokeskuksen tietokannoista, joista tärkeimpinä lähteinä olivat kansan- ja aluetalouden tilinpidot. Tutkimusosan vaikuttavuuslaskelmien lisäaineistona toimivat Vaasan yliopiston Lévon-instituutin keräämät uusiutuvan energian nykyisen käytön ja vielä käyttämättömän tuottopotentialin arviot sekä viralliset tilastot tuulivoimasta ja aurinkoenergiasta (mm. energiateollisuuden ja tilastokeskuksen tilastot). Uusiutuvan energian potentiaaliaineisto käsittää tiedot CHP:n eli yhdistetyn lämmön ja sähkön tuotannon poltettavista jakeista (puu, olki, jäte) sekä biokaasun jakeista (maatalous, teollisuuden biohajoava jäte ja puhdistamoliete).

Aluetaloudellisen vaikuttavuuden laskelmissa oletettiin, että pitkällä tähtäyksellä CHP:n ja biokaasun koko kasvupotentiaali otettaisiin käyttöön. Tämä ei vielä kata kaikkea energian tarvetta, vaikka otetaan huomioon jo käytössä oleva uusiutuva energia, joten loput oletettiin katettavan tuulivoimalla ja aurinkoenergialla. Uusiutuvan energian käytön lisääntymisen merkitystä tarkasteltiin yksinkertaistetussa tutkimusasetelmassa, jonka tarkoituksena on korostaa itse tutkimuskohdetta tilanteessa, jossa energiatalouden tulevaisuus on epävarma. Muut rajoitukset ovat:

- tarkastelu kattaa vain tuotanto- ja käyttövaiheen
- ollaan kiinnostuneita vain kokonaisvaikuttavuudesta, kun aluetalous on täysin sopeutunut muutokseen
- energiatukea ja
- verotusta ei huomioida

Kirjoittajat ovat tietoisia siitä, että uusiutuvan energian laitosten investointivaiheen merkitys työllisyyteen ja BKT:hen on suuri. Mikäli investoinnit toteutetaan koti- ja ulkomaisten yritysten toimesta suuralueille ei kuitenkaan syntyisi suuria kustannuksia. Tämän tarkastelun yhteydessä investointivaiheen vaikutuksia ei ollut mahdollisuutta tutkia. Lisäksi on mahdotonta ennustaa, millaisia uusiutuvan energian teknologioita tulee esiin tulevaisuudessa. Teoreettinen laskelma lähtee tilanteesta, jossa uusiutuvaan energiaan liittyvä infra on jo valmiina. Laskelma koskee tulevaisuutta eli pitkää tähtäintä. Työvälineenä vaikuttavuuslaskelmissa oli Helsingin yliopiston Ruralia-instituutissa kehitetty yleisen tasapainon (CGE) RegFin-aluemalli. Kyseessä on numeerinen simulaatiomalli, jonka rakenne kuvataan liitteessä 1. Vaikutuusarviot sisältävät suorat ja kerroinvaikutukset.

Aluetaloudelliset vaikuttavuuslaskelmat suoritettiin Suomen viidelle suuralueelle (Helsinki-Uusimaa, Etelä-Suomi, Länsi-Suomi, Pohjois- ja Itä-Suomi sekä Ahvenanmaa) laskentamallilla, jossa oli 34 toimialaa kussakin suuralueessa. CHP, biokaasu, tuulivoima ja aurinkoenergia erotettiin omiksi alatoimialoikseen aluetilinpidon päätoimialasta energiahuolto, vesi- ja jätehuolto. Uusiutuvan energian luvut vähennettiin päätoimialasta. Alatoimialojen kustannusrakenteet saatiin aiemmin tehdystä uusiutuvan energian aluetaloudellisten vaikutusten tutkimuksesta (Reini ym., 2014) sekä asiantuntija-arvioista. Aurinkoenergian kustannusrakenne jäi tietojen

vähyyden vuoksi hieman epätarkaksi, mikä saattaa vaikuttaa tuloksiin. CHP:n, biokaasun, tuulivoiman ja aurinkoenergian nykytilanteen arvon määrittämisessä tarvittiin tuotantomäärien lisäksi hintatietoja. Biokaasun hinta saatiin biokaasun hintahaarukan keskiarvosta julkisilla asemilla (Ari Lampinen, 2016). CHP:n hintana käytettiin hakkeen hintaa. Tämä perustui asiantuntijan arvioon keskimääräisestä hintatasosta. Tuulivoiman hintana käytettiin yleistä sähkön hintaa. Aurinkoenergian hinta määräytyi sähkön ja lämmön hinnoista siinä suhteessa kuin aurinkoenergialla tuotetaan tilastojen mukaan sähköä ja lämpöä.

Tulokset

Suuralueittain tarkasteltuna CHP:n ja biokaasun kasvupotentiaalia on vaihtelevasti vielä jäljellä. Sekä CHP:n että biokaasun tuotantoa on mahdollista kasvattaa kaikissa suuralueissa. CHP:n käyttämättömät tuottopotentiaalit (TWh) ovat suurimmat Pohjois- ja Itä-Suomessa sekä Länsi-Suomessa. Prosentteina tarkasteltuna CHP:n kasvupotentiaalit ovat suurimmat Pohjois- ja Itä-Suomessa sekä Etelä-Suomessa. Biokaasun kasvupotentiaalit ovat suurimmat Länsi-Suomessa sekä Pohjois- ja Itä-Suomessa, niin terawattitunteina kuin prosentteinakin tarkasteltuna. Biokaasun potentiaaliset kasvuprosentit nykytilanteesta ovat Helsinki-Uusimaata lukuun ottamatta suuremmat kuin CHP:n. Toimialana biokaasu on kuitenkin pieni CHP:n verrattuna.

CHP:n koko kasvupotentiaalin hyödyntämisen työllisyys- ja talousvaikutukset olisivat suurimmat Pohjois- ja Itä-Suomessa, missä ne tukisivat työllisyyttä noin 1 300 henkilötyövuodella ja aluetaloutta 290 miljoonalla eurolla nykytilanteeseen verrattuna. Toiseksi suurimmat vaikutukset olisivat Länsi-Suomessa. Pienimmät työllisyys- ja talousvaikutukset olisivat Ahvenanmaalla. Biokaasun koko käyttämättömän kasvupotentiaalin hyödyntäminen tukisi työllisyyttä ja aluetaloutta eniten Länsi-Suomessa sekä Pohjois- ja Itä-Suomessa. Työllisyys kasvaisi molemmissa suuralueissa reilulla 300 henkilötyövuodella. Ahvenanmaalla biokaasun vaikutukset olisivat pienimmät.

Vaikka CHP:n ja biokaasun koko kasvupotentiaali hyödynnettäisiin, ei se kattaisi koko energian tarvetta suuralueissa tai koko Suomen tasolla. Tarkastelussa nykyisen uusiutuvan energian sekä CHP:n ja biokaasun kasvupotentiaalin hyödyntämisen jälkeen jäävä energiantarve eli lähes 130 TWh katettaisiin tuulienergialla (lähes 100 TWh) ja aurinkoenergialla (noin 30 TWh). Tämä tarkoittaisi nykyisen tuulivoiman lisääntymistä noin 76 kertaisesti ja aurinkoenergian käytön lisäämistä yli 1 000 kertaiseksi nykyisestä eli kyseessä olisi merkittävä tuulivoiman ja aurinkoenergian lisäys, mikä tapahtuisi pitkällä aikavälillä.

Koko Suomen tasolla CHP:n kasvupotentiaalin hyödyntäminen tukisi työllisyyttä noin 2 740 henkilötyövuoden verran ja taloutta noin 620 miljoonan euron verran. Jos koko biokaasun tuottopotentiaali hyödynnettäisiin, Suomen työllisyys vahvistuisi lähes 900 henkilötyövuodella ja kansantalous yli 200 miljoonalla eurolla nykytilanteeseen verrattuna. Tuulivoiman lisäämisen myötä lähes 100 TWh:n verran tuulivoiman työllisyysvaikutus nousisi nykyisestä 960 henkilötyövuodella ja noin 540 miljoonalla eurolla kerroinvaikutuksineen. Vastaavasti aurinkoenergian lisääminen noin 30 TWh:n verran johtaisi noin 1 050 henkilötyövuoden kasvuun työllisyysväyässä ja 430 miljoonan euron kasvuun taloudessa.

Taulukko 2.5. CHP:n ja biokaasun kasvupotentiaalit terawattitunteina ja prosentteina suuralueittain vuoden 2015 tasoon verrattuna.

Suuralue kasvupotentiaali	CHP TWh	CHP:n kasvupotentiaali nykytilanteesta %	Biokaasu, TWh	Biokaasun kasvupotentiaali nykytilanteesta %
Helsinki-Uusimaa	2,45	101	0,18	66
Etelä-Suomi	9,02	109	1,54	840
Länsi-Suomi	10,32	88	3,64	3 408
Pohjois- ja Itä-Suomi	21,00	163	2,49	3 809
Ahvenanmaa	0,15	99	0,03	657
KOKO SUOMI	42,93	121	7,87	1 258

Lähtötiedot luvusta 2.1, kasvupotentiaali pääasiassa lämmitykseen ja polttoaineeksi, hieman sähköksi.

Taulukko 2.6. CHP:n kasvupotentiaalın aluetaloudelliset vaikutukset suuralueittain.

Suuralue/CHP	Työllisyys %-yksikköä	Työllisyys htv	ABKT %-yksikköä	ABKT milj. €
Helsinki-Uusimaa	0,02	201	0,06	45
Etelä-Suomi	0,12	606	0,35	132
Länsi-Suomi	0,10	618	0,33	150
Pohjois- ja Itä-Suomi	0,24	1 306	0,72	289
Ahvenanmaa	0,04	7	0,12	2

Taulukko 2.7. Biokaasun kasvupotentiaalın aluetaloudelliset vaikutukset suuralueittain.

Suuralue/Biokaasu	Työllisyys %-yksikköä	Työllisyys htv	ABKT %-yksikköä	ABKT milj. €
Helsinki-Uusimaa	0,01	48	0,02	12
Etelä-Suomi	0,04	206	0,14	53
Länsi-Suomi	0,05	309	0,17	76
Pohjois- ja Itä-Suomi	0,06	327	0,16	64
Ahvenanmaa	0,03	6	0,08	1

CHP:n ja biokaasun kasvupotentiaalın yhteenlaskettu vaikutus Suomen työllisyyteen on noin 3 630 henkilötyövuotta ja talouteen 820 miljoonaa euroa. Kun tähän lisää tuulivoiman ja aurinkoenergian kasvun kattamaan loppu energiatarve (lähes 130 TWh), on näiden uusiutuvien energiamuotojen kasvun vaikutukset maamme työllisyyteen yhteensä noin 5 600 henkilötyövuotta ja kansantalouteen noin 1 800 miljoonaa euroa kerroinvaikutuksineen.

Uusiutuvan energian toimialakatsauksen (Alm, 2015) mukaan uusiutuvan energian ala työllisti vuonna 2014 yhteensä noin 4 400 henkilöä suoraan ja liikevaihto oli noin 900 miljoonaa euroa. Näin ollen CHP:n ja biokaasun kasvupotentiaalın hyödyntäminen sekä tuulivoiman ja

aurinkoenergian merkittävä lisääminen kasvattaisi uusiutuvan energian alan työllisten määrää selvästi, etenkin kun kerroinvaikutukset otetaan huomioon.

Uusiutuva energia kuitenkin korvaisi fossiilisten polttoaineiden tuotannon, minkä poistuminen tietäisi negatiivisia vaikutuksia aluetalouteen. Fossiilisten polttoaineiden tuotannon poistuminen vähentäisi työllisyyttä 14 600 henkilötyövuodella ja laskisi BKT:tä 2 600 miljoonalla eurola, kun huomioidaan vaikutukset myös muuhun aluetalouteen. Uusiutuvan energian tuotannon kasvun ja fossiilisten polttoaineiden tuotannon poistumisen yhteisvaikutuksesta maamme työllisyys laskisi noin 0,35 prosenttiyksiköllä eli noin 8 900 henkilötyövuodella ja BKT laskisi noin 0,41 prosenttiyksiköllä eli noin 800 miljoonan euron verran. Tämä nettovaikutus olisi uusiutuvaan energiaan siirtymisen yhteiskunnallinen kustannus. Se jakautuisi kuitenkin usealle vuodelle, joten vuosina, jolloin aluetalous sopeutuisi täysin muutokseen, vuosikustannus olisi paljon pienempi. Nettovaikutuksesta kuitenkin puuttuu uusiutuvan energian investoinnit ja niistä syntyvä hyöty aluetalouteen.

Fossiilisen tuotannon poistuminen vähentäisi työllisyyttä jokaista tuotettua terawattituntia kohden noin 80 henkilötyövuodella. Vastaavasti CHP:n ja biokaasun lisääntyminen nostaisi työllisyyttä jokaista terawattituntia kohden noin 73 henkilötyövuodella. Fossiilisen tuotannon ja CHP:n sekä biokaasun työllisyysvaikutukset ovat lähes yhtä suuret terawattituntia kohden. Tuulivoiman ja aurinkoenergian työllisyysvaikutuksia ei ole mielekäästä verrata fossiilisen tuotannon työllistävyytteen ilman investointien vaikutuksia. Tuulivoiman ja aurinkoenergian tuotanto vaativat muihin tuotantomuotoihin verrattuna vähän työvoimaa.

Taulukko 2.8. Uusiutuvaan energiaan siirtymisen vaikutukset Suomen työllisyyteen ja talouteen (ilman investointien vaikutuksia).

Koko Suomi	Työllisyys %-yksikköä	Työllisyys htv	BKT %-yksikköä	BKT milj. €
CHP	0,11	2 740	0,30	620
Biokaasu	0,04	890	0,10	210
Tuulivoima	0,04	960	0,27	540
Aurinkoenergia	0,04	1 050	0,21	430
Uusiutuva energia yhteensä	0,22	5 640	0,89	1 800
Fossiilisen tuotannon poistuminen	-0,58	-14 580	-1,30	-2 630
YHTEENSÄ	-0,35	-8 940	-0,41	-830

Fossiilisen tuotannon poistumisesta suurin henkilötyövuosien menetys kohdistuisi itse fossiilisen tuotannon toimialaan, mikä käsittäisi reilun viidenneksen työllisyyden menetyksestä. Muut työllisyyden menetykset tapahtuisivat itse arvoketjussa, jossa välituote- ja lopputuotekäyttö vähenee. Fossiilisen tuotannon poistumisesta kärsisi ennen kaikkea metalliteollisuus, rakentaminen ja julkiset palvelut. Lähes kaikki muutkin toimialat menettäisivät työllisyyttä, mutta edellisiä aloja vähemmän.

Uusiutuvan energian tuotannon kasvattaminen vaikuttaisi hieman myös muiden toimialojen työllisyyteen ja tuotantoon. CHP:n kasvusta hyötyisi oman toiminnan lisäksi eniten puuteolli-

suus. Vastaavasti biokaasun kasvu hyödyttäisi muista toimialoista eniten maataloutta. Tuuli-voiman lisäämisestä hyötyisi oman toiminnan lisäksi eniten muu valmistus -toimiala, mikä käsittää muun muassa koneiden ja laitteiden korjauksen, huollon ja asennuksen. Aurinkoenergian lisääminen hyödyttäisi oman alan lisäksi eniten rakentamisen toimialaa. Fossiilisen tuotannon poistumisesta kärsisi energia-alan lisäksi lähes kaikki muutkin toimialat, mikä selittää osaltaan fossiilisen tuotannon poistumisesta aiheutuvan työllisyyden laskun suuruutta. On hyvä muistaa, että myös negatiivisilla muutoksilla on kerroinvaikutus.

2.3 Johtopäätökset

Bioenergian potentiaali Suomessa on noin 130 TWh vuodessa (vuoden 2014 tilastot). Se sisältää metsäteollisuuden lietteitä 38 TWh/a. Muuta bioenergiaa on noin 90 TWh/a. Se puolestaan sisältää jo käytössä olevaa bioenergiaa noin 36 TWh/a. Käyttämätöntä bioenergiaa on runsaat 50 TWh/a olettaen, että oljesta vain puolet voidaan käyttää energian tuotannossa. Puun merkitys on ylivoimaisesti suurin, ja se vastaa kokonaispotentiaalista noin 80 prosenttia. Vastaavasti kaikesta muusta potentiaalista oljen osuus on noin 40 prosenttia. Bioenergian kokonaispotentiaali (mukaan lukien metsäteollisuuden lietteet) vastaisi noin 35 prosenttia Suomen energian kokonaiskulutuksesta. Tällä hetkellä jo käytössä oleva bioenergia on vastaavasti noin 20 % tuotetun energian kokonaismäärästä.

Jotta Suomen koko energiahuolto voisi perustua uusiutuviin energialähteisiin sekä ydinvoimaan, tulisi noin 100 TWh/a tuottaa muilla uusiutuvilla energiamuodoilla kuin bioenergialla. Varovaisen arvion mukaan tästä voitaisiin tuottaa noin 30 TWh/a aurinkoenergialla, ja noin 70 TWh/a jäisi tuotettavaksi tuulivoimalla. Tähän tarvittaisiin noin 8 900 tuuliturbiinia, kukin tehoaan 3 MW. Tämän toteuttamiseksi Suomeen olisi rakennettava noin kaksinkertainen määrä tuuliturbiineja verrattuna nykyisin rakennettujen ja vireillä olevien turbiinien määrään.

Suuralueittain tarkasteltuna CHP:n ja biokaasun kasvupotentiaalia on vaihtelevasti vielä jäljellä. CHP:n ja biokaasun tuotantoa on mahdollista kasvattaa kaikissa suuralueissa, myös Helsinki-Uudellamaalla ja Etelä-Suomessa. CHP:n ja biokaasun kasvupotentiaalini hyödyntäminen sekä tuulivoiman ja aurinkoenergian lisääminen yhteensä lähes 130 TWh:n verran vahvistaisivat yhdessä maamme työllisyyttä noin 5 600 henkilötyövuodella ja taloutta noin 1 800 miljoonalla eurolla kun kerroinvaikutuksetkin otetaan huomioon. CHP:n ja biokaasun tuotanto luovat enemmän työllisyysvaikutuksia tuotettua terawattituntia kohden kuin tuulivoiman ja aurinkoenergian tuotanto johtuen muun muassa niiden hyvin erilaisista kustannusrakenteista.

Fossiilisten polttoaineiden käytön poistuminen tietäisi kuitenkin niin suuria negatiivisia vaikutuksia työllisyyteen ja talouteen, että kokonaisvaikutus jää negatiiviseksi ilman investointivaiheen vaikutuksia. Toisin sanoen täysin uusiutuvaan energiaan siirtyminen tietäisi jonkin verran kustannuksia yhteiskunnalle. Todellisuudessa kustannukset yhteiskunnalle olisivat kuitenkin tässä tutkimuksessa saatuja tuloksia pienempiä, koska myös investointivaihe luo työpaikkoja ja taloudellista kasvua.

Tuloksia tulkittaessa on hyvä tiedostaa, että ne on laskettu yksinkertaistetussa tutkimusasetelmassa. Investointivaiheen vaikutusten puuttuminen laskelmista johtaa osittaiseen kuvaan esimerkiksi tuuli- ja aurinkoenergian aluetaloudellisista vaikutuksista, sillä niissä suuri osa työllisyysvaikutuksista tulee juuri investointivaiheesta, kun esimerkiksi tuulivoimaloita raken-

netaan. Tässä tarkastelussa rajauksia ja oletuksia päätettiin tehdä rohkeasti, koska kyseessä on teoreettinen laskelma.

CHP:n ja biokaasun vielä käyttämättömän potentiaalin hyödyntäminen on aluetaloudellisin perustein suositeltavaa. Taloudellisen toimeliaisuuden kasvu tukisi suuralueiden ja Suomen työllisyyttä ja taloutta tarkastelussa käytetyillä oletuksilla. Raaka-aineiden saatavuus muodostuu suurimmaksi pullonkaulaksi. Raaka-aineiden kotimaan kauppaa kannattaa edistää ja etsiä logistisia ratkaisuja, jotka minimoivat kuljetuskustannukset. On kuitenkin tiedostettava, että raaka-aineiden saatavuutta rajoittaa niiden omistajien myyntihalukkuus. Vastaavasti ostajat pohtivat taloudellista hyödyntämisen tasoa. Raaka-aineiden käytön teknisen maksimin saavuttaminen on vaikeaa.

Aluetaloudellisia vaikutuksia suositellaan tarkasteltavan vielä tarkemmin ja laajemmin siten, että myös investointivaihe otettaisiin huomioon erityisesti tuulivoiman ja aurinkoenergian lisäämisestä. Näin saataisiin kokonaisvaltaisempi käsitys todellisista vaikutuksista. Tämän lisäksi olisi tärkeä saada tarkempaa tietoa siitä, miten tulomuodostus jakaantuu eri toimialoille erityisesti suhteessa työvoiman ja rahavirtojen muutoksiin verrattuna nykyiseen fossiilienergiään perustuviin arvoketjuihin.

3. UUSIUTUVAN ENERGIAN UUSIA TEKNISIÄ RATKAISUJA JA POLTTOAINEITA

Erkki Hiltunen, Anne Mäkiranta ja Petri Välisuo, Teknillinen tiedekunta, Vaasan yliopisto

IEA:n mukaan energiantarve globaalisti kasvaa vuoteen 2040 tultaessa vielä 30 %. Tämä merkitsee, että kaikkien uudenaikaisten polttoaineiden kulutus kasvaa. Tästäkin huolimatta satoja miljoonia ihmisiä on edelleen vailla perustavaa laatua olevia energiapalveluja (IEA, 2016). Uusiutuvan energian käyttö on voimakkaassa kasvussa. Selvää on, että myös uusien teknisten ratkaisujen tarve kasvaa. Uusille innovaatioille on suuri motivaatio juuri nyt, kun koko energia-ala on kokemassa valtavaa muutosta niin Suomessa kuin globaalisti. Tavoitteena on korvata fossiilisia energialähteitä ja polttoaineita, ennen kaikkea kivihiltä ja öljyä, uusiutuvalla energialla. Monet muutostekijät liittyvät energiatekniikkaan, vaikka toisaalta ala on kehittymässä enemmän ja enemmän palveluliiketoiminnan suuntaan. Investoinnit puhtaaseen teknologiaan ovat kasvussa (TEKES, TEM: Valtioneuvoston selonteko).

Uusiutuvan energian kokonaiskuvaa voisi luonnehtia hyvin moninaisin termein kuten

- Hajautettu energiantuotanto
- Joustava, hybriditekniikkaa hyödyntävä
- Urbaani, kaupungistumiseen liittyvä
- Älykäs, digitalisaatioon ja IoT:n liittyvä

Uusiutuvaan energiaan perustuvia uusia teknisiä ratkaisuja on kehitteillä runsaasti, ja tässä esityksessä on jouduttu rajoittumaan vain osaan tekniikoista. Eri alakohdissa on aluksi hyvin lyhyesti tarkasteltu jo käytössä olevia tekniikoita. Enemmän huomiota on kiinnitetty uusiin tekniikoihin, joiden voidaan odottaa lyhyellä aikavälillä kehittyvän tuotantoon. Suurimmat odotukset kohdistuvat bioenergiaan, tuulienergiaan, geoenergiaan ja aurinkoenergiaan.

3.1 Bioenergia

Biomassan käytön odotetaan lisääntyvän niin sähkön- kuin lämmöntuotannossakin, vaikka voimakkain kasvu tuleekin olemaan liikenteessä. Suomessa bioenergia on vuoteen 2030 mentäessä edelleen tärkein uusiutuvan energian muoto. Biomassoihin perustuvalla energiantuotannolla odotetaan siis korvattavan niin sähkön kuin lämmönkin tuotantoa sekä liikenteen polttoaineita eli lähinnä fossiiliseen tuotantoon perustuvaa energian tuotantoa. Seuraavassa tarkastelussa pääpaino on tekniikoissa, joiden läpimurto vuoteen 2030 mennessä on odotettavissa.

Käytössä olevaa bioenergiatekniikkaa

Suomessa bioenergian käyttö on perinteisesti ollut korkealla tasolla johtuen lähinnä metsien hyödyntämisestä. Tästä seuraten myös polttopuihin, hakkeeseen ja pelletteihin liittyvät teknologiat ovat kehittyneet ja käyttö on vakiintunut. Pullonkauloja ovat yritystoimintaa ajatellen olleet alan kannattavuus ja osin siihen liittyen energiapuun saatavuus.

Puun kaasutus on Suomessa tunnettu pitkään (häkäpönttöautot). Teknologiaa on kuitenkin kehitetty jatkuvasti (GASEK + tutkimuslaitokset) ja tällä hetkellä on kaupallisesti tarjolla teknisesti toimivia ratkaisuja niin sähkön, lämmön kuin näiden yhteistuotantoonkin (CHP).

Turpeen käyttö biomassana on Suomessa todennäköisesti saavuttanut huippunsa ja ympäristösyistä sen käyttö tulee tulevaisuudessa vähenemään. Tekniikka sinänsä on kehittynyttä, joten pullonkaulana on lähinnä turpeen hyväksyttävyyden polttoaineena (uusiutuvuus) EU:n taholta.

Etanolin tuotanto jätebiomassoista on hallussa olevaa teknologiaa. Alueella toimii kuitenkin pääasiassa vain yksi yritys. Viljan, sokerijuurikkaan tai maissin käyttöön energiaksi tarkoitettua etanolin tuotannossa on myös poliittisia ja yhteiskunnallisia kytköksiä. Ruuantuotantoon soveltuvaa maata ei haluta käyttää energiakasvien viljelyyn. Hiilihydraatteja runsaammin sisältävät levät soveltuvat myös etanolin tuotantoon, mikrolevä paremmin kuin makrolevä, eikä levän kasvatukseen liity samanlaisia rasitteita kuin muiden kasvatettavien biomassojen (Daroc et al. 2013). Etanolin ohella myös polttoaineomaisuuksiltaan samanlainen metanoli soveltuu polttoaineeksi. Se on kuitenkin myrkyllistä eikä valmistus esimerkiksi metaanista ole taloudellisesti kannattavaa. Suomessa etanolia käytetään bensiiniin sekoitettuna.

Biodieselin hajautettu tuotanto rajoittuu 1. sukupolven tekniikoihin eli lähinnä vaihtoesteröinnillä kasviöljyistä tuotettuihin rasvahappo-metyyli-estereihin (RME) ja vastaaviin eläin- tai kalarasvapohjaisiin tuotteisiin. Myös tietyt levät, rasvahappokoostumuksista riippuen, soveltuvat vaihtoesteröintiin. Muita menetelmiä kuten vetykäsittelyä ja Fischer-Tropsch -synteesiä on lyhyesti kuvannut mm Korpi 2016. Biodieselin tuotannon kannattavuus perustuu yleensä siihen, miten voidaan käyttää omia raaka-aineita ja miten paljon voidaan itse hyödyntää tuotetta. Rajoitteena viljellyille energiakasveille on ruokatuotantoon soveltuvan maa-alan käyttö energiantuotantoon. Öljyä, lipidejä, sisältävien mikrolevien kasvatusta on poikkeus edellisestä.

Biokaasua pidetään yleisesti tulevaisuuden polttoaineena. Puhutaan globaalista kaasuvallankumouksesta. Ensimmäisessä vaiheessa, infrastruktuurin rakentamisessa, tätä auttaa maa-kaasun käytön yleistyminen.

Uutta bioenergiatekniikkaa

Suomessa sähköntuotannon ja lämmöntuotannon tehokkuus on paljon perustunut niiden yhteistuotantoon (CHP = Combined Heat and Power) ja lähinnä suuremmissa yksiköissä (vesihöyrytekniikka). Näiden ongelmia ovat laitoksen sijainti, polttoaineen saatavuus ja hankintalogistiikka. Uudempaa teknologiaa, jota kuitenkin on jo kaupallistettu, ovat pienen kokoluokan ORC-tekniikkaan (Organic Ranking Cycle; 1-3 MW) perustuvat CHP -laitokset.

CHP -laitokset jaetaan yleensä kokonsa perusteella kolmeen eri kokoluokkaan: mikro-CHP, pien-CHP ja suuren kokoluokan CHP-laitokset. Mikro-CHP laitosten koko on alle 50 kW (Hintikka 2004) ja pien-CHP laitoksen koko on 1-2 MW_e ja lämpötehoaan 3-5 MW. Korkeimmillaan pien-CHP laitoksen nimellistehoksi katsotaan 10 MW. Tehokkaimpia ovat biokaasulla toimivat polttomoottori tai kaasuturbiiniyksiköt.

Ekogen Oy:n pien-CHP -laitokset (esim. 100 kWe ja 300 kW lämpötehoa) käyttävät energia-lähteinä biomassaa kuten pellettejä ja haketta suoraan polttoon. Näin korvataan fossiilista

polttoainetta. Sähkö tuotetaan kuumailmaturbiinilla. Laite (kontti) käyttää lähienergiaa ja hyödyt näkyvät aluetaloudessa.

ORC prosessin toimintaperiaate on vastaava kuin perinteisissä höyryturbiinivoimalaitoksissa. Orgaaninen aine, joka kiertää suljetussa putkistossa, höyrystetään lämmön avulla. Muuttamalla painetta saadaan turbiini tuottamaan mekaanista tehoa. Kun turbiini on kytkettynä generaattoriin, saadaan mekaaninen energia muutettua sähköksi. Ensimmäiset ORC-voimalat rakennettiin jo 1960-luvulla. Tänä päivänä kaupallisia ORC-voimaloita on saatavilla useissa eri teholuokissa ja erilaisiin sovelluksiin (Kitinoja 2016). Esimerkiksi Turboden -yhtiö on toimitanut yli 250 kpl ORC järjestelmää joista 225 perustuu biomassan polttoon ja seitsemän maalämpöön. Yksi laitos toimii aurinkoenergialla. Suomessa toimii kaksi biomassaan perustuvaa ORC laitosta, toinen Toholammilla ja toinen Posiolla. Ämmäsuolla toimiva laitos perustuu lämmön talteenottoon moottoreista.

Pullonkaulana pien-CHP:lle on sähkön hinnan halpuudesta johtuva huono kannattavuus. Pienet yksiköt soveltuvatkin pääasiassa käyttöön tuottajan omassa taloudessa; maatilat, lämpöpöyrittäjät. Itse tuotettu polttoaine, esimerkiksi piensahoilla, tekee toiminnasta kannattavaa.

Energiapuun (oksat, latvat, energiapuu) tuorepoltto perustuu uudentyyppisiin savukaasuja kondensoiviin kattiloihin, joiden hyötysuhde on perinteisiä kattiloita suurempi. Tämä perustuu siihen, että kattilat hyödyntävät myös savukaasuista saatavan lämmön. Palamisvaiheessa veden höyrystämiseen käytetty energia saadaan savukaasuista keräytyä takaisin hyötykäyttöön. Toisaalta tuorepuu sisältää palavia kaasuuntuvia aineita kuten alkoholit ja terpeniinit, jotka kuivatuksessa poistuvat puusta. Kolmas tekijä joka puoltaa tuorepuun polttoa on energiapuun ulkokuivatuksessa tapahtuva pinojen osittainen lahoaminen. Tuorepuun poltto on vielä tutkimusvaiheessa (Vaasan yliopisto, Helsingin yliopisto Seinäjoen ammattikorkeakoulu ja lämpöpöyrittäjät), mutta energian hyödyntämistä ajatellen sen pitäisi, edellä tarkastellut kolme seikkaa huomioiden, olla kannattavaa. Positiivinen tutkimustulos tulee johtamaan energiapuun hankinnan ja logistiikan uudelleenarviointiin. Tuorepuun poltto soveltuu useamman megawatin laitoksiin. Poltto edellyttää kondensoivaa kattilaa.

Leväenergialla on suuri energiantuotannon potentiaali, erityisesti kun halutaan laajamittaisesti korvata fossiilisia polttoaineita biopolttoaineilla. Levien biomassan tuotto on ylivoimaisesti tehokkainta verrattuna muihin eliöihin, kymmeniä tonneja hehtaaria kohden. Levän kasvatusta sitoo hiilidioksidi ja jäteveden yhteydessä kasvatettuna se sitoo veden ravinteita. Levää voidaan hyödyntää monipuolisesti biokaasun tuotantoon, etanolin tuotantoon ja bioöljyn tuotantoon. Nopeasta kasvusta johtuen biodieselin valmistukseen soveltuvan öljyn tuotanto on noin kymmenkertainen öljypalmuun verrattuna ja peltokasveihin verrattuna vieläkin suurempi. Levän tuotanto ei kilpaile ruuantuotannon kanssa, vaan levää voidaan kasvattaa merivedessä tai maa-alueilla, jotka eivät sovellu ruuan tai metsän kasvatukseen.

Levää voidaan käyttää liikenteen polttoaineisiin. Pullonkaulana ovat levän tuotantokustannukset. Kustannusten alentamiseksi energiantuotannon rinnalle tulisi rakentaa teollisia symbiooseja, joissa mukana olisivat ainakin levän kasvatusta ja alkukäsittelyä, ruuan ja rehun tuotanto sekä lääke- ja kosmetiikkateollisuus. Tulevaisuudessa levien geneettinen muokkaus voi helpottaa tuotantoa ja vähentää kustannuksia (Korpi 2016, Daroch 2013).

Vaasan yliopistossa on vuonna 2016 käynnistetty yhteispohjoismainen tutkimushanke, jossa Vaasan osalta selvitetään levän tuotantoa jätevedenpuhdistamon yhteydessä. Kasvatuksessa pyritään hyödyntämään saatavissa olevat ravinteet sekä lämpö. Tavoitteena on levän käyttö biokaasun tuotantoon yhdessä yhdyskuntajätteen kanssa. Hankkeessa pyritään myös etsimään kustannustehokkaita ratkaisuja. Koko hankkeen tavoitteena on optimoida kasvustusta ja levän keruuta (Ruotsi), tutkia energiantuotantoa (Suomi) sekä käyttöä ravinto-, rehu- lääketarkoituksiin (Norja). Vaasan yliopistossa on vuonna 2014 hyväksytty Liandong Zhu'n väitöskirja "Sustainable Biodiesel Production from Microalgae Cultivated with Piggery Wastewater".

Levätaalo –case (Rajamäki 2015): Hampurin kansainväliseen rakennusnäyttelyyn valmistettiin urbaania energiaa julkisivuilla ja katolla tuottava levätaalo. Taloon on kiinnitetty yhteensä 129 reaktoria, joiden yhteinen leväntuotto on 4,5 kg levää vuorokaudessa. Levä muunnetaan biokaasuksi, josta edelleen tuotetaan lämpöä ja sähköä. Tuotettu energia, 4500 kWh, riittää yhden nelihenkisen perheen tarpeisiin. Lämmöntuotantoa täydennetään maalämmöllä. Järjestelmän rakentaneen Hampurilaisen SSC-bioteknologia –yrityksen mukaan levävoimaloita tullaan rakentamaan lisää.

Biokaasulaitokset ovat yleisesti hyvin varmatoimisia, esimerkkeinä Mikkelin ja Tampereen voimalat vuodelta 1962, Stormossen Mustasaari 1990 tai Turun AMK:n laitos 2011. Ne ovat myös hyvin skaalautuvia biokaasun tuoton suhteen (yksikkö: 1000 m³): Nurmijärvi 92, Forssa 684, Joensuu 1060, Lahti 1989, Tampere 2415, Espoo 3964 ja Helsinki 13076.

Biokaasua hyödynnetään lämpönä polttamalla lämpökattilassa, sähkön tuotantoon CHP-laitoksissa sekä liikenteen polttoaineena. Vain noin 0,5 % Suomen uusiutuvalla energialla tuotetusta energiasta tuotettiin 2014 biokaasulla (Tilastokeskus 2015). Noin ¼ tuotetusta biokaasusta käytettiin lämmöntuotantoon (454,7 GWh vuonna 2014) ja noin ¼ sähköntuotantoon 158,6 GWh (Huttunen ja Kuittinen 2015). Biokaasun kulutus liikenteessä vuonna 2014 oli 17 GWh (noin 3%) (Lampinen 2015). Vuoden 2014 tietojen mukaan Suomessa:

- Jätevesipuhdistamoilla toimi 16 biokaasureaktorilaitosta
- Teollisuuden jätevesiä käsiteltiin 3:ssa laitoksessa
- Maatiloilla toimi 13 biokaasulaitosta
- Kiinteitä yhdyskuntajätteitä käsiteltiin 14 laitoksessa
- Biokaasua kerättiin talteen 40:ltä kaatopaikkalaitokselta
- Julkisia paineistetun biokaasun (CBG100 = Compressed BioGas100%) jakeluasemia oli 24 kpl sekä yksityisiä 2: käytettävissä on myös yksi julkinen CNG-asema ja yksi yksityinen LNG-asema
- CBG100-asemien operaattorien lukumäärä on kahdeksan: näistä seitsemän on aloittanut toimintansa vuonna 2011 tai sen jälkeen
- Liikennebiokaasun tuotantolaitosten lukumäärä oli yhdeksän.

Jakeluverkostot: AFI –direktiivi (Alternative Fuels Infrastructure) on Euroopan Unionin hanke kehittää vaihtoehtoisten polttoaineiden jakeluverkostoa. Sen mukaan henkilö- ja linja-autoliikennettä varten tarvittaisiin paineistetun kaasun jakeluasemia noin 150 km välein. Raskaalle liikenteelle rakennetussa nesteytetyn kaasun (maakaasu ja myöhemmin biokaasu) verkossa asemien tulisi sijaita noin 400 km välein.

Paineistettu maa- ja biokaasu: Paineistetun kaasun jakeluasemia oli Suomessa vuonna 2014 kaikkiaan 24 kappaletta. Tuotetun biokaasun määrä on edelleen kasvussa, joskin pullonkaulana on edelleen asemien väliset pitkät matkat. Julkisilla tankkausasemilla biokaasu (CBG) säilyi edelleen halvimpana polttoaineena 2014 (Taulukko 3.1.). (Lampinen, A. 2015 sekä Huttunen et al. 2015)

Taulukko 3.1. Eri energiamuotojen hintavertailu.

Energia	Hinta snt/MJ	Hinta €/bensiniequivivalentti
Biokaasu (CBG)	2,41	0,77
Maakaasu (CNG)	2,81	0,90
Sähkö	3,42	1,09
Dieselöljy	3,63	1,16
E85	4,24	1,36
Bensiini	4,30	1,38

Paineistetun biokaasun jakelu tankkausasemille tapahtuu pääasiassa CBG-standardikonteissa aina 500 km asti. Kartta jakeluasemista ja jalostamista löytyy osoitteesta <cbg100.net>.

Nesteytetty maa- ja biokaasu: Ensimmäinen nesteytetyn maakaasun jakeluasema aloitti toimintansa Vuosaaressa syyskuussa 2016 (Gasum). Suunnitelmissa on rakentaa kaikkiaan 4 asemaa. Pullonkaulana on tyypillinen muna-kana ongelma: autot voivat yleistyä vasta kun polttoainetta on laajalti tarjolla ja päinvastoin. Nesteytettyjen kaasujen jakeluun liittyvä infrastruktuuri tullaan rakentamaan aluksi nesteytettyyn maakaasuun perustuen. Kuljetusliikkeet ovat jo nyt kiinnostuneita investoimaan nesteytettyä kaasua käyttäviin autoihin.

Maatilatalous: Maatiloilla tuotettu biokaasu ja siitä saatava lämpö ja sähkö parantavat tilojen taloudellista kannattavuutta, energiaomavaraisuus kasvaa ja saadaan polttoainetta ajoneuvojen ja työkoneiden käyttöön. Sen lisäksi saavutetaan ympäristöhyötyjä kuten paraneva hygienia ja hajuhaittojen väheneminen. Joillakin paikkakunnilla kuten Ilmajoki, lannanlevitykseen soveltuvan peltoalan vähäisyys uhkaa rajoittaa sikatilojen laajennuksia. Sian lannan käyttö biokaasun tuotantoon auttaa myös tässä ongelmassa. Maatiloilla biomassana voidaan käyttää

- -lietelantaa tai kuivikelantaa
- -tuore- ja säilörehua, nurmisäilörehua
- -turvetta ja olkea lantaan sekoitettuna
- -biojätettä kuten kirjolohenperkuujätettä
- -puupelletillä kuivittua hevosenlantaa
- -jätevesilietettä

Vuonna 2014 rakenteilla tai suunnitteilla oli kaikkiaan 15 uutta laitosta maatiloille ja noin 29 ns. yhteismädätyslaitosta jo olemassa olevien noin 15 lisäksi (Huttunen ja Kuittinen 2015). Myös pienemmät biokaasulaitokset ovat varsin hyvin skaalautuvia biokaasun tuoton vaihdellessa välillä <20 000 – >250 000 m³ (Huttunen ja Kuittinen 2015). Maatilakokoluokan biokaasureaktori voidaan tarvittaessa mahduttaa merikonttiin (Turun AMK Topinojan jätekeskus).

Pullonkaulana voitaneen pitää mädätettävän biomassan riittävää saatavuutta pienemmillä maataloilla.

3.2 Tuulienergia

Euroopan parhaat tuuliolosuhteet ovat Skotlannissa ja Tanskassa. Suomen tuuliolosuhteet ovat eurooppalaista keskitasoa. Tuulen saa aikaan ilmanpaineen vaihtelut, jolloin ilma virtaa korkeapaineen alueelta matalamman paineen alueelle. Maanpinnan epätasaisuudet, vuoret, kukkulat, metsät ja talot jarruttavat ilmavirtausta, ja siksi maan pinnan läheisyydessä tuulen nopeus on alhaisempi kuin korkeammalla. Suomessa tämä ns. planetaarinen rajakerros, jossa maanpinnan jarruttava vaikutus pienentää tuulen nopeuksia, on merkittävästi eteläisiä leveysasteista ohuempi (Cohen et al. 2015). Siksi täällä esiintyy useammin tilanteita, joissa turbiinin roottori on kokonaisuudessaan rajakerroksen yläpuolella voimakkaassa tuulessa ja maan pinnalla ei sitä vastoin tuule juuri ollenkaan. Näissä olosuhteissa tuulienergiaa saadaan hyvin, mutta tuulen suhinan melua peittävä vaikutus puuttuu, ja tuulivoimalan ääntä saataan pitää tavallista häiritsevämpänä.

Tuulen sisältämä energia on verrannollinen tuulen nopeuden kolmanteen potenssiin, siksi hyvät tuuliolosuhteet on tärkein kriteeri tuulivoimaloiden sijoituspaikkaa valittaessa, ja samasta syystä tuuliturbiinit halutaan sijoittaa mahdollisimman korkealle. Myös sähköverkon siirtolinjojen ja tieinfrastruktuurin saavutettavuus ovat tärkeitä kriteereitä sijoituspaikalle. Suomen tuuliatlakseen on valmiiksi arvioitu tuuliolosuhteet potentiaalisilla tuulivoima-alueilla, ja sen mukaan parhaat tuuliolosuhteet ovat länsi- ja etelärannikolla sekä Lapin tuntureilla.

Tuulivoimalaitosten tarkoituksena on muuntaa tuulen sisältämää energiaa mahdollisimman tehokkaasti hyödynnettävään muotoon, kuten sähkö- tai liike-energiaksi. Tuulivoiman valjastaminen hyötykäyttöön, perustuu joko ilmavirtauksen vastus- tai nostevoimaan. Vastusvoimaa hyödynnetään monissa pystyakselisissä turbiineissa, kuten Savonius--roottorissa, kun taas vaaka-akselisten turbiinien lavoissa hyödynnetään samaa noste-vaikutusta kuin lentokoneiden siivissä. Kolmilapainen, vaaka-akselinen turbiini on tällä hetkellä kustannustehokkain tapa tuulienergian hyödyntämiseksi teollisen kokoluokan sähköntuotannossa. Tuulen energiasta voidaan hyvin tunnetun Bezin lain mukaan hyödyntää korkeintaan 59%, nykyisten turbiinien maksimihyötysuhteen ollessa optimaalisissa olosuhteissa lähes 50%. Turbiinit toimivat optimaalisesti kuitenkin vain kapealla toiminta-alueella, jolloin niiden keskimääräinen hyötysuhde on kuitenkin huomattavasti alhaisempi. Parhaimmat tavat nostaa tuuliturbiinin tuottamaa tehoa on kasvattaa pyyhkäisyypinta-alaa tai tornin korkeutta. Tuotetun energian määrä on kutakuinkin suoraan verrannollinen roottorin pyyhkäisyypinta-alaan ja nasellin korkeuteen nähden. Koska korkea torni on kallis, sen varaan kannattaa asentaa mahdollisimman iso voimalaitos, ja siksi tuuliturbiinien koot kasvavat edelleen ja tuotetun sähkön hinta laskee.

Tuulivoiman maankäytöllinen tehokkuus

Maankäytön tehokkuuden kannalta ei ole teoriassa suurta väliä tuotetaanko tarvittava teho muutamalla isolla turbiinilla vai monella pienellä. Jos turbiinien tehokerroin on ideaalinen, $c_p=0,59$ ja tuulen keskinopeus 100 metrin korkeudessa on noin $v=7,1$ m/s, niin tällöin tuulen

sisältämä energia maapinta-alaa kohti on noin $8,9 \text{ W/m}^2$, josta voidaan nykytekniikalla hyödyntää noin $3,0 \text{ W/m}^2$. Vastaavat lukemat muilla korkeuksilla on laskettu taulukkoon 3.2.

Jos Olkiluoto 3 ydinvoimayksikön teho on 1600 MW ja vuosituotto 14 TWh, niin vastaavan energian tuottamiseksi tuulivoimalla tarvittaisiin vähintään 484 km^2 tuulivoimala-alueita nyt käytössä olevilla turbiineilla. Tällä hetkellä Länsi-Suomen tuulivoimaloiden huipunkäyttöaste on yli 28 % (Känkänen ja muut 2016), joten Olkiluoto 3:n vuosituotannon voisi korvata noin 1200:lla 5 MW:n tuuliturbiinilla. Niiden rakentamiseen tarvittaisiin alle 9 miljardin euron investointi, jos oletetaan että tuulivoiman pääoma kustannukset ovat $1,4 \text{ M€/MW}$ (Suomen Tuulivoimayhdistys 2016). Vuoden 2016 sähköenergian kulutus koko Suomessa on noin 83 TWh. Vastaavan energiamäärän kattamiseksi tarvittaisiin noin 3000 neliökilometriä tuulivoimala-alueita, joka on noin yksi prosentti Suomen kokonaispinta-alasta. Suurinta osaa tuulivoimala-alueen pinta-alasta voidaan edelleen hyödyntää entiseen tapaan maanviljelykseen, metsätalouteen, marjastamiseen, lenkkeilyyn, yms. Vain alle yksi prosentti tuulivoimala-alueen pinta-alasta raivataan teiksi ja pystytysalueiksi, muun alueen jäädessä ennalleen.

Taulukko 3.2. Tuulienergian saanti maapinta-alaa kohti nasellin korkeuden funktiona, vertailualueena Vaasan rannikko.

Nasellin korkeus m	Keskituulen nopeus m/s	Keskiteho* W/m^2	Vuosituotto* kWh/m^2
50	6,2	6,2 (2,3)	55 (20)
100	7,1	8,9 (3,0)	78 (26)
150	7,8	12 (3,6)	102 (31)

* Ensimmäinen luku kuvaa ideaalisella tuuliturbiinilla saatavaa tehoa tai energiamäärää ja suluissa oleva luku käytännön tuuliturbiinilla saatavaa tehoa tai energiamäärää. Ero johtuu siitä, että käytännön tuuliturbiini ei voi hyödyntää nimellistuulennopeutta suurempia tuulennopeuksia tehokkaasti, ja siitä, että hyötysuhde on teoreettista maksimia alhaisempi myös hiljaisemmillä tuulen nopeuksilla.

Tuulivoiman kustannukset

Tuulivoimaa on nyky muodossaan käytetty sähköntuotantoon vasta muutama vuosikymmen, ja turbiinit kehittyvät edelleen nopeasti. Vaaka-akselisten turbiinien tehokkuus kasvaa enää todennäköisesti hitaasti, ja kilpailua käydään eniten tuulisähkön kustannuksista. Jotkin turbiinivalmistajat ovat arvioineet, että tuulella tuotettu sähkö olisi kilpailukykyistä ilman tuotantokustannuksia noin viiden vuoden kuluessa. Tuulienergian tuotantokustannukset riippuvat tuuliolosuhteista, olemassa olevasta infrastruktuurista (erityisesti sähköverkko ja tiestöt) ja pääomakustannuksista. Nykyään tuulivoimalla tuotetun energian hinta (LCOE) on noin $60\text{-}70 \text{ €/MWh}$ maalla ja $120\text{-}130 \text{ €/MWh}$ merellä (Lanz ja muut 2012, Känkänen ja muut 2016, Patronen 2016). IRENA:n arvion mukaan maatuulivoiman hinta laskee vuoteen 2025 mennessä noin 50 €/MW :oon. Tuulivoimayhdistyksen maltillinen arvio on, että maatuulivoiman hinta vuonna 2025 on vähän yli 60 €/MWh . Suurin kustannuksia alentava tekijä on huipunkäyttöasteen nostaminen (Taylor ja muut 2016).

Uudet tuulienergiatekniikat

Tässä osuudessa tarkastellaan yleisimmin esiin tulleita uusia tuuliturbiini-ideoita.

Uusia innovaatioita vaaka-akselisiin turbiineihin

Vestas testaa DTU:lla moniroottorisia vaaka-akselisia tuuliturbiineita. Tällä ratkaisumallilla haetaan matalampia lapojen kuljetus- ja valmistuskustannuksia. Nyt testattavana olevan neliroottorisen turbiiniin lavat ovat pituudeltaan vain puolet vastaavan tehoisen yksiroottorisen lapoihin nähden, tosin niitä tarvitaan neljä kertaa enemmän.

General Electric on testannut tuuliturbiinin roottorin keskikohdan peittämistä umpinaisella kuvulla, jonka halkaisija olisi esimerkiksi neljäsosa roottorin halkaisijasta. Tällöin tuuli ohjautuisi tehottoman keskikohdan sijasta lähemmäs lapojen tehokkaita alueita, ja turbiini tuottaa siten enemmän energiaa. Kupu on suhteellisen edullinen ja yksinkertainen tapa vaikuttaa turbiinin toimintaan. Haittavaikutuksena on suurempi otsapinta-ala, jolloin torniin kohdistuu huomattavasti suurempia voimia kuin ilman kupua olevassa turbiinissa.

Leijuvat tuulivoimalat

Kokeilukäytössä on myös ollut voimalaitoksia, joissa tuulivoimala on nostettu ilmakehän raja-kerroksen yläpuolella vallitseviin voimakkaisiin tuuliin käyttämällä leijaa, lennokkia tai esimerkiksi helium-palloa.

Pystyaskeliset turbiinit ja merituulivoima

Pystyakselisiakin turbiineja kehitetään koko ajan, vaikka ne eivät olekaan tähän asti pystyneet kilpailemaan vaaka-akselisten turbiinien kanssa energian hinnalla. Merellä tuuli on tasaisempaa, mutta merituulivoima on kalliimpaa ja sitä varten tarvitaan uusia ratkaisuja. Kelluvat tuulivoimalat ja pystyakseliset turbiinit ovat mukana uusina vaihtoehtoina.

3.3 Geoenergiaratkaisut lämmitykseen ja viilennykseen

Geoenergialla tarkoitetaan auringon maan pintaosiin varaamaa lämpöenergiaa. Syvissä porakaivoissa ja syvälämpökaivoissa hyödynnetään myös geotermistä energiaa. Suomessa ilman lämpötilan voidaan katsoa vaikuttavan maaperän lämpötilaan aina 10–15 metrin syvyydelle. Vuodenaikojen vaihtelu näkyy siten maaperän lämpötiloissa noihin syvyyksiin asti (Leppäharju 2008, Mäkiranta et al. 2016). Syvemmälle mentäessä geotermisen lämmön osuus kasvaa ja auringon lämpösäteilyn vaikutus pienenee. Suomessa kallioperän lämpötila on 100–200 metrin syvyydellä n. 7–9 °C (GTK). Geoenergiaa voidaan Suomessa hyödyntää matalalämpöjärjestelmien avulla. Geotermisen gradientin maassamme on 1–1,5 °C/100 m. Geoenergia on uusiutuvaa ja paikallista energiaa, josta voidaan eri tavoin tuottaa lämpöä. Uusilla asuinalueilla tämän lämmitysmuodon valitsee jopa 80 % talonrakentajista.

Perinteistä geoenergiatekniikkaa

Maalämpö

Suomessa on hyödynnetty auringosta maaperän pintaosiin latautunutta lämpöenergiaa jo useiden vuosikymmenien ajan. Maalämpöputkisto asennetaan vaakatasoon tyypillisesti 1–1,5 metrin syvyyteen routarajasta riippuen. Parhaiten maalämpöä saadaan kosteasta savimaasta. Kivinen maaperä ei puolestaan sovellu tähän tarkoitukseen. Putkistolle tarvitaan tilaa tontilla, joten nämä ratkaisut ovat yleensä mahdollisia ja mielekkäitä vain pientalo-kohteissa.

Kalliolämpö

Maahan pystysuoraan poratuista kalliokaivoista voidaan saada sekä lämmitys että viilennysenergiaa monenkokoisille rakennuksille. Kaivoja voidaan tarvittaessa porata useita riittävän lämmitys- ja viilennyskapasiteetin takaamiseksi. Oikea mitoitus on tässäkin järjestelmässä tärkeää. Kaivojen täytyy olla riittävän syviä, jotta vuosittainen palautuminen voidaan taata eikä kaivojen radikaalia viilenemistä pääse tapahtumaan edes pitkällä aikavälillä.

Kalliolämpö on suosituin geoenergian hyödyntämismuoto maassamme tällä hetkellä. Asentamisen helppous, mahdollisuus toteuttamiseen myös pienellä tontilla, järjestelmän toimintavarmuus ja kohtuullinen investointikustannus takaisinmaksuaikoiheen ovat järjestelmän hyviä puolia. Kuluttajan kiusana ovat tällä hetkellä vielä hyvin erilaiset lämpökaivojen mitoituskäytännöt maalämpöurakoitsijoiden keskuudessa. Lämpökaivoille tarvittaisiin vakiintunut mitoitustapa, jotta alimittaisia kaivoja ei myytäisi kuluttajille.

Vesistölämpö

Lämmönkeruuputkisto voidaan asentaa kiinteistön lähellä sijaitsevan vesistön pohjaan. Putkisto ankkuroidaan painoilla paikalleen. Haasteena ovat kuitenkin vesistön jäätyminen ja erityisesti jäiden lähtö.

Uutta geoenergiatekniikkaa

Vesistölämmönvaihdin

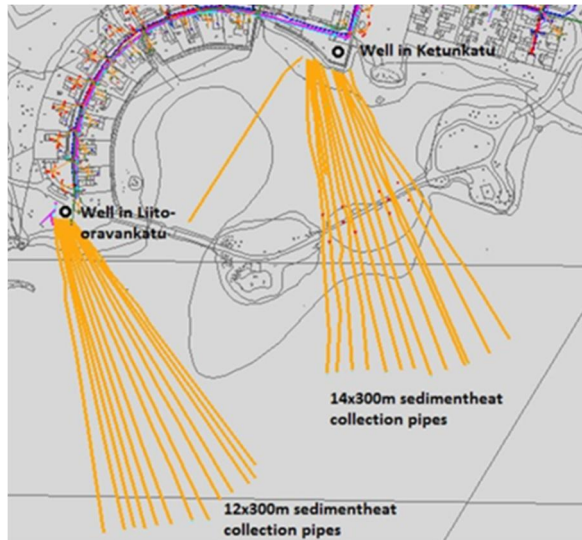
Vesistölämmönvaihdin on uusi innovaatio, joka mahdollistaa vesistölämmön hyödyntämisen ilman laajaa vesistöalaa. Lämmönkeruuputkisto on kierretty pitkulaiseksi spiraaliksi, jonka läpi vesi pääsee vapaasti virtaamaan ja luovuttamaan lämpöä putkistossa kiertävään lämmönkeruunesteeseen (kuva 3.1.). Vesistölämmönvaihdin ankkuroidaan vesistön pohjaan ja vaihdin mitoitetaan lämmitettävän kohteen mukaan. Yhden vesistölämmönvaihtimen teho on 13 kW lämpöpumpun kanssa. Vaihtimia voidaan kytkeä useita rinnan tehotarpeen mukaan. Vesistölämmönvaihdin on kokonaan veden alla ja siksi vesistön jäätyminen on otettava huomioon sijoituspaikkaa mietittäessä. Toisaalta lämmönvaihdin voidaan sijoittaa myös niin kovaan virtaukseen, joka ei jäädy.



Kuva 3.1. Vesistölämmönvaihtimen prototyyppi. Rakennelman alla putkistot, joilla ankkurointi tapahtuu. (kuva: Anne Mäkiranta)

Sedimenttienergia

Vesistön pohjasedimenttiä voidaan myös käyttää lämmönlähteenä. Sedimentin lämpötilojen on todettu olevan 8-9 °C 3-5 metrin syvyydellä Etelä-Pohjanmaalla ja Pohjanmaalla tehdyissä mittauksissa (GTK 2006). Merenpohjasedimenttiä käytettiin lämpöenergiälähteenä vuoden 2008 asunomessualueella Vaasan Suvilahdessa. Alueen 19 omakotitaloa ja 23 yhtiömuotoista pientaloa on liittynyt matalaenergiajärjestelmään. Lämmönkeruuputkistot viistovaakaporattiin meren pohjaan kolmen metrin syvyyteen sedimenttikerrokseen. Keruuputkistot on asennettu kahdesta kohdasta rannalta viuhkamaisiin muodostelmiin sisältäen 12x300 m ja 14x300 m putkiryhmät. Lämpöä kerätään näin ollen 7800 m pituisella putkistolla. Järjestelmän teoreettinen energiapotentiaali on 0,31 MW-0,39 MW, joka vastaa 1,1 GJ/h-1,4 GJ/h. (Hiltunen et al. 2015). Alueelta saadaan 560 MWh energiaa vuodessa. (Energy Vaasa). Jokaisella kiinteistöllä on oma maalämpöpumppu. Kesällä järjestelmää käytetään myös viilennykseen. Asuinalueen matalaenergiajärjestelmä on toiminut hyvin. Aluksi putkistoon pääsi ilmaa, mutta järjestelmään lisättiin automaattinen ilmausjärjestelmä ja putkiston painetta lisättiin. Vastaava energiaratkaisu voidaan toteuttaa muidenkin sedimenttipohjaisten vesistöjen äärellä.



Kuva 3.2. Lämmönkeruuputket on asennettu viuhkamaisesti 3 m:n syvyyteen ulottuen 300 metrin päähän rannasta. (kuva: Vaasan Ekolämpö Oy)

Asfalttienergia (päällystetyt urbaanit pinnat)

Urbaaniämpösaareke (Urban heat island) ilmiö on erityisesti maailman suurkaupungeissa tunnettu ongelma. Urbaaniämpösaareke ilmiö tarkoittaa sitä, että kaupunkialueilla on lämpimämpää kuin maaseudulla. Ilmiötä on tutkittu myös Suomessa (Suomi 2014). Lämmön kerääntyminen kaupunkiin johtuu rakennetusta ympäristöstä (rakennukset, pinnoitteet), ihmisistä, kasvien puutteesta ja liikenteestä (Allen et al. 2003). Kaupungeissa on siis sitoutunutta paljon lämpöenergiaa, mutta toisaalta siellä on myös paljon energian tarvisijoita. Lähienergian ideaa – käytetään energia sen synty paikalla – voidaan soveltaa hyvin tällaisessa ympäristössä.

Urbaaneissa ympäristöissä on paljon mustia asfalttipinnoitteita, jotka absorboivat auringonvaloa tehokkaasti. Lämpö siirtyy pinnoitteesta alapuolisiin kerroksiin soraan ja hiekkaan. Hiekakerroksen on todettu varastoivan lämpöä jonkin verran. (Martinkauppi et al. 2015). Tutkimuksella on myös osoitettu, että asfalttipinnoitteella on vaikutusta sen alapuolella mitattaviin lämpötiloihin. Vertailtaessa nurmikentän ja asfalttiparkkipaikan maanalaisia lämpötiloja on huomattu kevään ja syksyn lämpötilojen leikkauspisteen olevan eri syvyydellä riippuen pinnoitemateriaalista. Asfalttipinnoitteen alla leikkauspiste on 1 m syvyydessä ja nurmikentän alla lähes 2 m syvyydessä. (Mäkiranta et al. 2016)

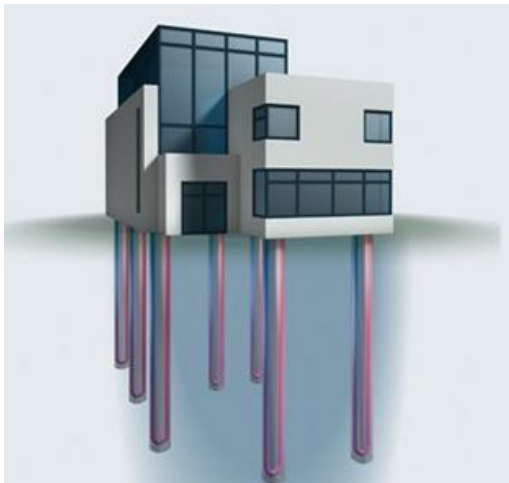
Asfaltin alle siirtynyttä lämpöä voidaan hyödyntää varastoinnin avulla. Lämpöä kertyy kesällä ja lämmitys- tai sulatustarpeita on talvella. Maailmalla on käytössä järjestelmiä, joissa asfaltin alla lämmennyt neste siirretään eristettyyn kausivarastoon rakennuksen alle. Varastoitu energia hyödynnetään rakennuksen lämmityksessä lämpöpumpun avulla talvella. Lämpö voidaan hyödyntää myös asfaltin sulana pitoon talvella.



Kuva 3.3. Asfalttilämmönmittauskentän poraukset marraskuussa 2013 Vaasassa. (kuva: Anne Mäkiranta)

Energiapaalut

Energiapaalut ovat yleensä teräksisiä putkia, joiden sisällä on lämmönkeruuputket. Energiapaalut ovat n. 10 m pituisia ja ne juntataan ja porataan rakennuksen alle pystysuoraan. Energiapaaluja voidaan lämmönkeruun ohella hyödyntää rakennuksen tukemiseen pehmeän maaperän alueella, jossa paalutus tulisi muutenkin kyseeseen. Paalu on alapäästä tukittu. Paalu täytetään betonilla, jotta lämmönsiirto tehostuu ja paalu vahvistuu.



Kuva 3.4. Energiapaaluja rakennuksen alla. (Kuva: Uponor Oyj)

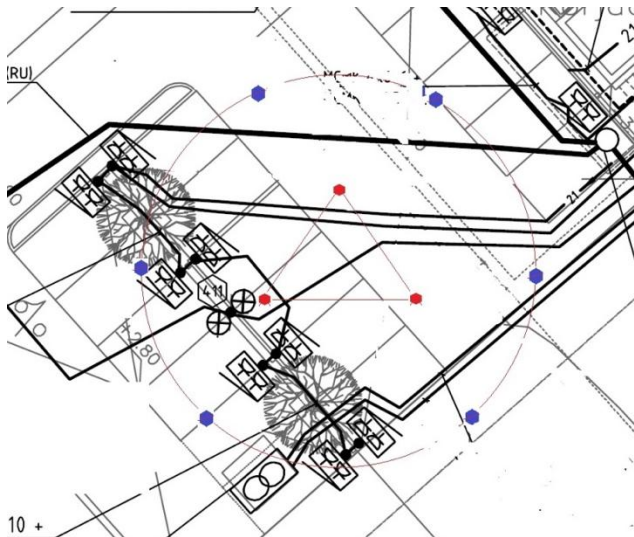
Energiapaalun toimintaperiaate on sama kuin kalliokaivoissa tai perinteisessä maalämmössä. Lämmönsiirtoneste kerää lämpöä paalusta ja lämmennyt neste kulkee jakotukkien ja kokoojaputkien kautta lämpöpumpulle. Energiapaalut hyödyntävät myös rakennuksen maahan sitomaa lämpöä, koska ne sijaitsevat rakennuksen alla. Paaluja voidaan käyttää talvella lämmitykseen ja kesällä niitä voidaan hyödyntää suoraa huonetilojen viilennykseen ilman lämpöpumppua.

Varastointi

Lämpöä on usein saatavilla silloin, kun sitä ei tarvita. Kausivarastointi on tulossa ratkaisuksi lämmöntarpeen vaihteluihin. Lämpöä voidaan varastoida maan alle UTES (underground thermal energy storage) veteen tai kalliioon. Vesilämpövarastona voidaan hyödyntää esim. käytöstä poistettua öljysäiliötä tai muuta maanalaista tankkia. Myös vanhoja kaivoksia on tutkittu potentiaalisina vesilämpöakkuina. (Martinkauppi et al. 2015, Watzlaf et al. 2006)

Useiden jopa kymmenien kalliokaivojen muodostamaa kalliokaivokenttää voidaan käyttää lämpöakkuna BTES (borehole thermal energy storage). Kaivot porataan säännölliseen esim. ympyrämuodostelmaan, jonka keskiosan kaivoihin ladataan kesällä lämpöä esim. asfalttipintojen alta, aurinkokeräimistä tai lämpöläitoksen ylijäämistä. Talvella kalliokaivokenttää käytetään rakennuksen lämmitykseen.

Lämpöakku voidaan muodostaa joko syvistä kaivoista (100-300m) tai matalammista kaivoista (esim. 40 m). Lisäksi edellä esitettyjä energiapaaluja voidaan käyttää lämpöenergiavarastoina.



Kuva 3.5. Suunnitelma kalliokaivoakun sijoituksesta tontille. Punaiset merkit tarkoittavat syöttökaivoja ja siniset ottokaivoja.

Faasitransitiomateriaalit

Faasimuutoksia eli faasitransitioita ovat aineen olomuodon muutokset (kiinteä, neste, kaasu). Faasimuutos voi tapahtua aina kumpaankin suuntaan tahansa eli se on reversiibeli. Faasimuutokset sitovat tai vapauttavat energiaa riippuen muutoksen suunnasta. Faasimuutosmateriaaleja on kokeiltu lupaavasti seinärakenteissa aurinkoenergian lyhytaikaiseen varastointiin. Sopivilla faasimuutosmateriaaleilla on mahdollista saavuttaa suuri energiatiheys tietyssä toimintalämpötilassa. Faasitransitiomateriaaleja on käytetty myös lämmönvarastoinnissa esim. parafiiniakkuina.

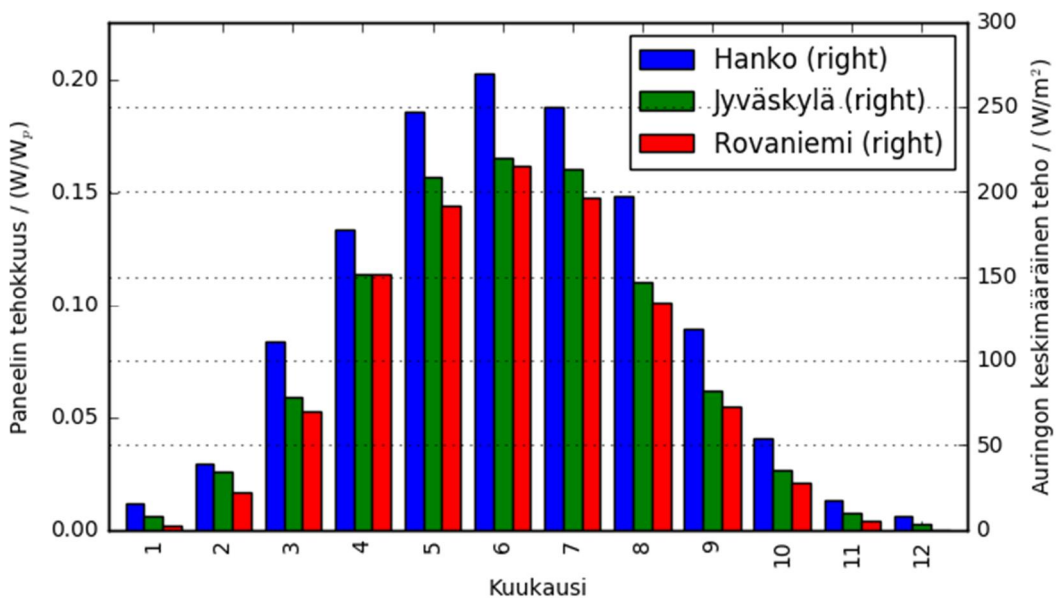
Käytetyimpiä materiaalityyppejä ovat suolahydraatit sekä parafiinit ja parafiinivahat. Parafiinit on todettu ominaisuuksiltaan parhaiksi erilaisiin sovelluksiin vaikkakaan ne eivät pysty varastoimaan lämpöenergiaa yhtä paljon kuin suolahydraatit. Lämmönsiirto on yksi tärkeimmistä ominaisuuksista, jota faasimuutosmateriaaleissa yritetään vielä parantaa. Lämpöenergian nopea varaaminen ja purkaminen ovat mahdollisia vain hyvän lämmönsiirron avulla. (Sharma et al. 2009). Faasimuutosmateriaalien käyttö lämmönvarastoinnissa yleisemmin on edelleen kustannuskysymys. Pilotointeja ja kokeiluja tarvitaan lisää, jotta kustannukset ja valmistustekniikat saadaan sopiviksi.

Viilennys

Maailmanlaajuisesti huoneistojen ja rakennusten viilennys on suuremmissa roolissa kuin lämmitys. Etenkin kehittyvässä maailmassa ilmastointitekniikan kysyntä on kasvussa. Geoenergiaa voidaan hyödyntää myös viilennysenergiana. Maan alla on kesäisin keskimäärin viileämpää kuin maan pinnalla. Siksi maaviileää voidaan käyttää jopa suoraa hyödyksi ilman lämpöpumpua ns. lämpimissä maissa.

3.4 Aurinkoenergia

Suomessa saatava Auringon vuorokauden keskiteho horisontaalista neliometriä kohden vaihtelee voimakkaasti vuodenajan mukaan (kts Kuva 3.16.). Taulukkoon (3.2.) on kerätty Auringon säteilyteho, aurinkopaneeleista saatu keskiteho ja vuosituotto muutamalla esimerkki-alueella.



Kuva 3.6. Auringon keskimääräinen teho eri kuukausina kolmella paikkakunnalla.

Taulukko 3.3. Aurinkoenergian saanti maapinta-alaa kohden Etelä-, Keski- ja Pohjois-Suomessa, sekä aurinkopaneeleilla saatava keskimääräinen sähköteho ja vuosituotto, kun paneelin hyötysuhteeksi oletetaan 20%.

Paikkakunta	Keskiteho W/m ²	Sähköteho (20%) W/m ²	Vuosituotto kWh/m ²
Hanko	126	25	221
Jyväskylä	100	20	175
Rovaniemi	91	18	160

Aurinkokeräimet

Auringon lämpöä voidaan kerätä antamalla auringon lämmittää tasopintaa, ja keräämällä lämpö talteen kierrättämällä nestettä tai kaasua tasopintaan asennetuissa jäähdytyskanavissa. Auringon lämpö siirtyy välittäjäaineen välityksellä pois keräimestä, ja voidaan varastoida tai käyttää suoraan esimerkiksi veden tai kiinteistön lämmitykseen. Kun keräin lämpiää, sen pinnalta pääsee osa lämmöstä karkaamaan ympäröivään ilmaan säteilemällä tai kulkeutumaan ilman mukana. Häviötä voidaan pienentää kattamalla keräin läpinäkyvällä suojakalvolla. Tällöin ilmavirtaus keräimen pinnalla vähenee, ja lämpöä karkaa vähemmän ilman mukana. Suojakalvo voi myös vähentää lämmön säteilemistä. Tyhjiöputkikeräimissä aurinkokeräin on putkimainen, ja sitä ympäröi läpinäkyvä suojaputki. Keräinputken ja suojaputken välistä on ilma imetty kokonaan pois lämmön kulkeutumisen eliminoimiseksi. Aurinkokeräimillä saatu lämpötilaero on yleensä alle 100 astetta, joten sitä ei pystytä suoraan käyttämään sähkön tuottamiseen. Jos auringon lämmöllä halutaan tuottaa sähköä, kannattaa käyttää keskittäviä aurinkokeräimiä (Concentrated Solar Power, CSP)

Nykyään jotkin suomalaisetkin valmistajat ovat jo alkaneet tuottaa kattopeltejä ja seinämateriaaleja, joihin aurinkokeräin on valmiiksi integroitu. Tällöin aurinkokeräimien asennustyöstä tulee vain vähän lisäkustannuksia kiinteistöjen rakennusvaiheessa, ja aurinkokeräimet vaikuttavat mahdollisimman vähän asunnon ulkonäköön.

Keskittävä aurinkokeräin (CSP)

Aurinkolämmöllä voidaan tuottaa korkeampia lämpötiloja keskittämällä auringonsäteet parabolisella heijastavalla kourulla polttopisteeseen sijoitettuun putkeen, jossa virtaava neste tai kaasu kuumenee jopa usean sadan asteen lämpötilaan, jolla voidaan käyttää esimerkiksi kaasuturbiinia tai Stirling-moottoria sähkön tuotantoon. Paras teho saadaan asentamalla kouru pohjois-eteläsuuntaan, ja kääntämällä sitä koko ajan auringon vuorokausittaisen liikkeen mukaan. Kouru voidaan myös asentaa Itä-Länsisuuntaan, jolloin sen asentoa tarvitsee muuttaa kuin kausittain, mutta teho on tällöin jonkin verran huonompi. Parabolisen heijastimen sijasta voidaan käyttää myös Fresnelin linssiä. Vielä suurempi lämpötila saavutetaan keskittämällä auringonsäteet vielä laajemmalta alueelta, kohdistamalla useamman parabolisen heijastimen polttopisteet yhteen pisteeseen, jota kuumentamalla tuotetaan lämpövoimakoneelle energia. Pieniin energiantarpeisiin voidaan käyttää yksittäistä parabolista peiliä, jonka polttopisteeseen sijoitetaan Stirling-moottori tuottamaan lämpötilaerosta sähköä.

Passiivinen aurinkoenergian hyödyntäminen

Aurinkoenergiaa hyödynnetään useimmiten passiivisesti. Keväällä aurinko lämmittää kiinteistöjä lämmittämällä ulkoseiniä, ja säteilemällä sisätiloihin ikkunoiden kautta. Passiivilämmityksen käyttöä voidaan tehostaa sijoittamalla asuntoihin isot ikkunat kaakkoon, etelään ja lounaaseen suuntautuville seinustoille. Eräessä uudessa rakennuskonseptissa suunniteltiin johdettavaksi ilmankierto talon ulkoseinustan ulkopuolelle asennetun ohuehkon kuorikerroksen ja varsinaisen ulkoseinän väliin ottamaan talteen auringon lämmittämän ulkoseinän lämpöä rakennuksen lämmityksessä hyödynnettäväksi.

Aurinkolämmön varastointi

Aurinkolämmön saatavuus vaihtelee kausiluonteisesti, kuten kuvasta 3.10. voi nähdä. Energian saatavuutta voidaan tasoittaa varastoimalla aurinkoenergiaa kausivarastoon. Tällä hetkellä keräimillä kerättyä lämpöä varastoidaan jo monissa kohteissa maalämmitystä varten porattuihin kalliokaivoihin. Kun kalliokaivoon varastoidaan aurinkokeräinten tuottamaan ylijäämälämpöä kesällä, kalliokaivoa ympäröivän peruskallion lämpötila nousee, jonka seurauksena kalliokaivosta saadaan lämpöä maalämpöpumpulla paremmalla hyötysuhteella seuraavan talven aikana. Tällainen porakaivoin lataaminen säästää sähkön tarvetta talvella, kun sähkön kysyntä on suurinta. Lämpöä voidaan tallentaa myös laajemmassa mittakaavassa useamman porakaivon kenttään, ja käyttää talvella lämmityksessä, parhaimmillaan jopa kokonaan ilman lämpöpumpua. Tällaisen maalämpökaivovaraston (BTES) hyötysuhde voi olla jopa 70 %.

Porakaivoin sijasta lämpövarastona voidaan käyttää myös ns. energiapaaluja, jotka ovat kiinteistön perustusten tukemiseksi juntattuja paaluja, joiden sisällä kiertää energiankeruunestettä. Paalun avulla energiaa voidaan joko varastoida tai kerätä rakennuksen alla olevasta maaperästä. Aurinkolämpöä voidaan varastoida myös faasimuutosmateriaaleihin, tai maanalaisiin vesitankkeihin, kuten on mainittu maalämmöstä kertovassa kappaleessa.

Aurinkosähkö

Auringon säteilyä voidaan muuttaa sähköksi suoraan valosähköisen ilmiön avulla aurinkopaneeleilla. Piipohjaiset (SI-crystalline) paneelit ovat osoittautuneet luotettaviksi. Niitä on ollut käytössä jo 20-30 vuotta. (Hernández-Moro and Martínez-Duart 2013). Aurinkopaneelien tehokkuudet riippuvat toteutustekniikasta. Laboratoriomittausten perusteella yksikiteisen piipaneelin tehokkuus on noin 25 %, monikiteisen piipaneelin noin 20 % ja ohutkalvopaneelien noin 13-19 % . Ohutkalvopaneeleita valmistetaan amorfisesta piistä tai muiden metallien ja puolijohdeiden yhdistelmistä, kuten GIGS ja CdTe tekniikat. Tulevaisuuden tekniikkaa ovat orgaaniset eli polymeeripohjaiset aurinkopaneelit. Tulevaisuudessa paneelit voivat olla läpinäkyviä, jolloin niillä voidaan kattaa ikkunapintoja. Hyötysuhteen parantamiseksi on kaavailtu monikerrospaneeleita, joissa kukin kerros hyödyntää auringon säteilystä eri aallonpituusalueen. Aurinkopaneeleita saa jo nyt myös valmiiksi kattopeltiin tai muihin rakennusmateriaaleihin integroituna, jolloin paneelien asennuskustannukset voivat pääosin sisältyä normaaleihin rakentamiskustannuksiin.

Horisontaalisilla aurinkopaneeleilla voidaan tuottaa sähkötehoa keskimäärin noin 20 W/m^2 , jolloin vuosituotto on noin 175 kWh/m^2 . Aurinkopaneelin tehokkuus Suomessa on noin $0,10 \text{ W/W}_p$ kun aurinkopaneeli on sijoitettu vaakatasoon, ja optimaalisessa kulmassa noin 25 % parempi eli luokkaa $0,13 \text{ W/W}_p$.

Investointikustannuksia aurinkovoimaan voi arvioida Suvilahden voimalan avulla, jonka kapasiteetti on 340 kWp, vuosituotto 275 MWh, hinta 600 k€ ja arvioitu keskiteho $0,1 \text{ W/W}_p$. Rakennuskustannuksiksi tulee $1,76 \text{ €/W}_p$, joista aurinkopaneelien osuus on pvXchangen julkaiseman hintaindeksin mukaan nyt noin $0,51 \text{ €/W}_p$. USA:ssa kaupallisten asennusten hinnasta noin 50-55 % menee asennuskustannuksiin, paneelien osuuden ollessa 30 % ja muun laitteiston 15 % ("Solar Industry Facts and Figures" 2016; Branker, Pathak, and Pearce 2011). Samaa suuruusluokkaa näyttää olevan Suvilahden voimalan kustannukset. Aurinkopaneelien takuu-aika on tyypillisesti 20-25 vuotta, mutta todellinen käyttöaika voi olla paremminkin 30 vuotta, paneelit eivät silloinkaan äkisti hajoa, mutta niiden hyötysuhde laskee alle 1% vuodessa (Branker, Pathak, and Pearce 2011). Inverterien tyypillinen käyttöikä on noin 10 vuotta, joten niiden vaihtaminen on suurin yksittäinen kustannuserä käytön aikana. Muut käyttö- ja ylläpitokustannukset sisältävät paneelien puhdistuksen ja korjaustoimenpiteet.

Olkiluoto 3:a tuottaman sähkön vuosituotannon tuottamiseksi tarvittaisiin vähintään 123 km^2 aurinkovoima-aluetta tämän hetken aurinkopaneeleilla. Koska paneelin tehokkuus on $0,13 \text{ W/W}_p$, niin aurinkopaneeleita tarvittaisiin 12 GW_p , ja siihen tarvittavat aurinkopaneelit maksaisivat noin 6.6 miljardia euroa, joka on noin 60 % voimalaitoksen kokonaiskuluista. OL3:n korvaava aurinkovoimalaitos tulisi siis maksamaan noin 11 miljardia. Vuoden 2016 sähköenergiankulutus Suomessa on noin 83 TWh. Vastaavan energiamäärän tuottamiseen tarvittaisiin noin 720 m^2 tuulivoima-alueita, joka on noin 0,2 prosenttia Suomen kokonaispinta-alasta.

Aurinkosähköä voidaan varastoida samoin kuin tuulisähkön yhteydessä mainittiin tai lämpönä aikaisemmin mainituilla tavoilla.

3.5 Hybriditekniikat

Hybriditekniikoilla energiatekniikassa ymmärretään yleensä järjestelmiä, joissa voi olla yhdistettynä uusiutuvan energian eri ratkaisuja keskenään tai uusiutuvan energian ratkaisuja yhdistettynä jo olemassa olevaan vanhempaan tekniikkaan. Uusiutuvan energian tekniikoiden yhdistämisessä ajatuksena on taata jatkuvampi, tasaisempi energiansaanti ja välttää kausivaihtelut tuotannossa. Uusiutuvan energian yhdistämisessä jo olemassa olevaan teknologiaan voi olla sama tavoite ja toisaalta vältetään poistamasta vielä toimivaa ja tuottavaa teknologiaa.

Erilaisia hybridiratkaisuja on lukemattomia, ne ovat aina monistettavissa ja jossain määrin skaalautuvia. Uusiutuvan energian osalta sovellettavuus on paikkakuntaakohtaista. Esimerkiksi biomassoja ei yleensä ole kannattavaa kuljettaa pitkiä matkoja. Hybridiratkaisuilla pystytään usein takaamaan keskeytymätön energiantuotto johtuen eri tuotantomenetelmien erilaisista kausivaihteluista ja energian varastoinnista. Samoin pystytään tuottamaan energiaa myös kulutushuippujen ajaksi.

Seuraavassa tarkastellaan joitakin esimerkkejä hyvistä käytänteistä.

Case 1: Maalämpöjärjestelmän, aurinkokeräimen ja öljypolttimen hybridi

Distributed Energy systems – DESY- tutkimushankkeessa on esitelty Helsingin Sakarinmäen koululle laadittu suunnitelma ottaa käyttöön geoenergiaa pääasialliseksi lämmitysmuodoksi, käyttää aurinkolämpöä veden lämmitykseen ja käyttää olemassa olevaa öljypoltinta täydentävänä lämmitysmuotona kulutushuippujen yhteydessä. Raportin mukaan öljypoltin toimii bioöljyllä ja sen on varauduttu tuottavan lämpöä seitsemän kuukauden aikana lokakuusta huhtikuuhun. Öljylämmitysjärjestelmään kuuluu lämpövarasto.

Maalämpölämpöjärjestelmä koostuu 21:stä 300 metriä syvästä kalliokaivosta ja 275 W:n maalämpöpumpusta. Vuosittaiseksi lämmöntuotoksi porakaivoista on laskettu 955 MWh, mikä vastaa 79 %:ia koulun tarvitsemasta 1200 MWh:n lämmöntarpeesta. Lämpöpumpun kompressorin sähkötarve on 299 MWh.

150 kW:n aurinkokeräinjärjestelmä on rakennettu 10 m² moduleista jotka on asennettu 45° kulmaan. Keräimen pinta-ala on 160 m², ja vuotuisesti lämmöntuotoksi on laskettu 170 MWh. Aurinkolämpöä käytetään lämpimän veden tuottoon lämpövarastoon (2 x 4000 m³). Lähtökohtana on, että aurinkokeräin pystyy ylläpitämään 63 °C:n lämpötilan lämpövarastossa. Tarvittaessa lämpöä voidaan lisänä käyttämällä lämpöpumppua.

Esitetty järjestelmä sopii hyvin erikokoisten rakennuksien lämmitysjärjestelmäksi ja myös pienehkön asuinalueen lämmitysmuodoksi. Järjestelmä on helposti monistettavissa ja skaalattavissa. Soveltuu käytettäväksi maan eri osissa. Lämpöpumpun käyttämä sähkö sekä muu taloussähkö saadaan tässä tapauksessa sähköverkosta. Konkreettisenä hyötynä järjestelmästä saadaan uusiutuvaa energiaa, aurinkoenergiaa ja geoenergiaa. Maan pinnalle asennettuina aurinkokeräimet tarvitsevat 60 m x 20 m = 1200 m² pinta-alan.

Case 2: Nollaenergiatalo

Distributed Energy systems – DESY- tutkimushankkeessa on esitelty Hyvinkäällä olevaa kaksikerroksista omakotitaloa (97,5 m² + 78 m² + 21 m² varastotilaa). Talossa hyödynnetään aurinkoenergiaa, aurinkopaneeleja sähköntuotannossa ja lämmön tuotannossa aurinkokeräimiä sekä geoenergiaa.

Taloon on asennettu 60 m² aurinkopaneeleja ja 6 m² aurinkokeräimiä. Kesäaikaan maaliskuusta syyskuuhun talo tuottaa ylimääräistä sähköä, joka myydään verkkoon, mutta talvella joudutaan sähköä ostamaan sähköverkosta. Vuosittainen sähkönkulutus on 8460 kWh, josta 4510 kWh käytetään taloussähkönä, 2320 kWh lämmitykseen ja 1630 kWh lämpimän veden tuottamiseen. Talo täyttää nettonollaenergiatalon määritelmät.

Case 3: Kolme maatilaa

Distributed Energy systems – DESY- tutkimushankkeessa on esitelty kahden viljatilaa ja yhden karjatilaa energiatarkeita. Tavoitteena oli löytää tehokkain hybriditarkeita maatilaa sähkö- ja lämmöntuotantoon. Tilaa energiatarkeita oli kartoitettu ja tehty laskelmat energian elikarkeita (LCOE, levelized cost of energy) laskemiseksi.

Ensimmäisellä viljatilalla oli maata 61 hehtaaria, josta viljelysmaata 26 hehtaaria. Sähkö ostettiin sähköyhtiöltä. Lämpö tuotettiin halkoja polttamalla ja lämmönjakelu perustui lämminvesikiertoon. Lisäksi tilalla oli puulämmitteinen viljan kuivuri. LCOE laskelmat soittivat, että siirtyminen tavallisesta puulämmityksestä (19,02 €/MWh) puuhakkeen (67,66 €/MWh) tai pellettien käyttöön ei ole taloudellisesti kannattavaa. Myös aurinkokeräinten käyttö lämpimän veden tuotantoon (207,16 €/MWh) osoittautui kalliiksi.

Toisella viljatilalla oli pinta-alaa kaikkiaan 180 hehtaaria, josta viljeltyä 60 hehtaaria. Sähkö hankittiin sähköyhtiöltä ja lämpö tuotettiin kevytöljypolttimella. Lämmön jakelu perustui lämminvesikiertoon. LCOE analyysissä verrattiin polttoöljyn kustannuksia (107,00 €/MWh) hakkeeseen (77,69 €/MWh) ja pelletteihin (101,14 €/MWh) sekä lämpöpumppeihin perustuvaan lämmitykseen. Analyysi osoitti, että pellettien ja erikoisesti puuhakkeen kustannukset olivat selvästi alhaisemmat. Lämpöpumppeilla lämpöä ajateltiin otettavan porakaivosta (92,63 €/MWh) ja toisaalta läheisestä lamasta (83,25 €/MWh). Molemmat tavat olivat öljylämmitystä edullisempia. Tässä tapauksessa öljylämmityksen korvaaminen uusiutuvalla energialla osoittautui kannattavaksi. Perinteisellä takaisinmaksuajalla mitaten lämpöpumppu osoittautui edullisimmaksi.

Maitotilalla oli 70 lehmää ja 45 vasikkaa. Tilan koko oli 133 hehtaaria, josta viljeltyä 105 hehtaaria. Automatisoitu navetta kulutti paljon sähköä, joka hankittiin sähköyhtiöltä. Lämpö tuotettiin brikettipolttimella, joka soveltui myös puuhakkeen ja pellettien polttoon. Eri vaihtoehdot osoittautuivat hyvin samanarvoisiksi. Lämmin vesi tuotettiin sähköllä, eikä sen vaihtaminen aurinkokeräimeen ollut kannattavaa. Sähkö tuotanto aurinkopaneelilla tai tuuliturbiinilla osoittautui myös kannattamattomaksi. Korvaavista vaihtoehdoista siis vain öljyn korvaaminen uusiutuvalla energialähteillä osoittautui kannattavaksi.

Johtopäätökset

Suomessa bioenergian käyttö on perinteisesti korkealla tasolla johtuen metsien hyödyntämisestä. Vuoteen 2030 mentäessä bioenergia on edelleen tärkein uusiutuvan energian muoto. Yritystoimintaa ajatellen pullonkauloja ovat alan kannattavuus ja energiapuun saatavuus. Viime vuosien aikana paljon kehitystä on tapahtunut puun kaasutuksen laitteistoissa ja CHP-tekniikassa, erityisesti mikro-CHP-laitteissa ja ORC-tekniikassa. Energiapuun tuorepolto on teoriassa tullut kannattavaksi kondensoivien kattiloiden tultua käyttöön, mutta laajempi käyttö edellyttää vielä tutkimusta. Pien-CHP:n pullonkaulana on sähkö hinnan edullisuudesta johtuva huono kannattavuus. Pienet yksiköt ovat kannattavia silloin, kun on käytettävissä itse tuotettua polttoainetta ja tuotanto tulee omaan käyttöön.

Levän kasvatusta on biomassaa tuotannossa aivan ylivoimainen niin biomassaa kasvun kuin käytettävyydenkin suhteen. Myös tilantarve kasvatuksessa on yleensä suhteellisen pieni. Levä soveltuu sekä bioetanolin, biodieselin että biokaasun tuotantoon. Kehitettäessä neljän-

nen sukupolven polttoaineita pyritään valmistusprosesseja lyhentämään vaikuttamalla metaboliaan modifioimalla kasvuolosuhteita tai geneetisellä muokkauksella (Daroch 2013). Tämä edellyttää edelleen lisää tutkimusta. Levän käytöstä biopolttoaineiden tuotantoon, leväbiomassan tuotannosta energiatarkoituksiin ja jäteveden käytöstä on tehty hyviä opinnäytetöitä: Korpi 2016, Rimppi 2009 ja Liandong Zhu 2015 väitöskirja.

Bioetanolin valmistus jätebiomassoista on käytössä olevaa teknologiaa ja on muunkin kuin energiantuotannon kannalta perusteltua. Mikäli etanolia halutaan tehdä viljellystä biomassasta, tulee levän kasvatusta ottaa huomioon.

Biodieselin tuotannon kannattavuus ensimmäisen sukupolven menetelmin perustuu omien raaka-aineiden hyödyntämiseen ja käyttö on tällöin lähinnä off-road koneiden moottoreissa.

Sähköautojen ohella myös biokaasuautot tulevat 2030 mentäessä yleistymään. Paineistettu biokaasu (CBG) soveltuu erinomaisesti henkilöautojen ja bussien polttoaineeksi. Raskasta liikennettä varten pitäisi tuottaa nesteytettyä biokaasua (LBG). Riittävän jakeluverkon luominen edellyttäneen alkuvaiheessa nesteytetyn maakaasun tarjontaa. Ensimmäinen nesteytetyn maakaasun jakeluasema aloitti toimintansa Vuosaaressa syyskuussa 2016 (Gasum).

Biokaasulaitosten tämän hetken tilanteesta saa hyvän kuvan Suomen biokaasulaitosrekisteristä n:o 18 (Huttunen ja Kuittinen (2015)). Raaka-aineista ja teknologiasta on Suomen Biokaasuyhdistyksen toimesta 2015 julkaistu laaja artikkeli Biokaasuteknologia (Kymäläinen ja Pakarinen 2015).

Pullonkaula kaasun jakelussa on tyypillinen muna-kana –ongelma: autot voivat yleistyä vasta kun polttoainetta on saatavissa ja jakeluasemat voivat yleistyä vasta kun kaasulle on kysyntää. Hinnaltaan biokaasu on kilpailukykyinen. Maatiloilla biokaasun tuotanto ja käyttö lisäävät kannattavuutta ja hajautettu tuotanto sopii hyvin maatalojen toimenkuvaan. Pullonkauloja on yleensä kaksi. Riittävä biomassan tuotanto esimerkiksi karjataloilla edellyttää hyvin suurta eläinmäärää. Toisaalta sähkön siirto tilojen välillä ei tällä hetkellä ole kannattavaa, mikä vaikeuttaa tilojen yhteistoimintaa.

Lämpöpumppeihin perustuvat geoenergian sovellutukset ovat jo vakiinnuttaneet asemansa suomalaisten kotien lämmitysmuotona. Aluksi asennetut maalämpö ja vesistölämpö ovat paljolti korvautuneet kalliolämmöllä. Omakotitalon lämmitykseen riittää yleensä yksi porakaivo, jonka syvyys määräytyy käyttötarpeen mukaan, nykyään yleensä 200-350 metriä. Porakaivon porauskustannus on tyypillisesti 5000-10 000 € ja kokonaisinvestointi noin 15 000-20 000 €.

Geoenergiaa on alettu hyödyntää yhä enemmän myös suurissa kohteissa. Esimerkiksi Vaasan Suvilahdessa neljä kahdeksan kerroksista kerrostaloa ja Vaasan Runsorissa 4500 m² toimistorakennus käyttävät geoenergiaa lämmitykseen.

Geoenergian eri tekniikat ottavat lämpöä maasta tai vedestä ja hyödyntävät lämpöpumppuja. Muilta osin tekniikat kuitenkin eroavat täysin toisistaan. Perinteisessä maalämmössä keruuputkisto asennetaan vaakasuoraan noin 1,0-1,5 metrin syvyyteen pehmeään maakerrokseen. Kalliokaivot porataan pystysuorasti kallioperään noin 200-350 m syvyyteen asti. Sedimenttilämpöputkistot asennetaan vedenalaiseen sedimenttiin.

Uusista tekniikoista eniten tutkittu ja kokeiltu on sedimenttilämpö. Ensimmäinen ja toistaiseksi ainoa kaupunginosakohtainen ratkaisu on Vaasan Suvilahdessa vuoden 2008 asuntomessu-alueella. Suvilahdessa 42 taloa kuuluu sedimenttienergiaverkkoon. Kokemukset ovat pääsääntöisesti positiivisia, mitä käynnissä olevat tutkimuksetkin osoittavat. Alkuvaiheen ongelmat aiheutuivat lähinnä vääristä mitoituksista. Tekniikka soveltuu käytettäväksi matalissa merenlahdissa ja matalissa järvissä. Tutkimusten mukaan sedimenttikerros talven käytön jälkeen latautuu uudelleen kesän aikana eikä lisälatausta tulla tarvitsemaan, vrt kalliokaivot. Suuresta mielenkiinnosta ja positiivisista tutkimustuloksista huolimatta sedimenttienergiaan perustuvia lämpöjärjestelmiä ei ole otettu enempää käyttöön. Syynä voisi olla epäluulo uutta järjestelmää kohtaa erityisesti, kun se koskisi kokonaista kaupunginosaa tai vastaavaa. Järjestelmä ei myöskään taloudellisesti ole hyväksi koettuja järjestelmiä edullisempi.

Suorien vesistöön asennettavien keruuputkien ongelmat voidaan välttää käyttämällä ympyrämuotoon kierrettyä vesistölämmönvaihdistinta. Lämpöpumppuun yhdistettynä pienen vesistölämmönvaihtimen teho voi olla 10-15 kW. Sekä lämmön riittävyyden että jäävaurioiden välttämisen vuoksi laite soveltuu erityisesti virtapaikkoihin. Järjestelmän hinta on samaa suuruusluokkaa kuin kalliokaivolämmityksen eli noin 15 000- 20 000 €. Laitteen testausta varten tarvittaisiin pilot-kohteita.

Asfalttienergia on esimerkki urbaanista energiasta ja lähienergiasta, energia on siellä missä kuluttajatkin. Mustat asfalttipinnat ovat myös erinomaisia lämmönkeräimiä. Toisaalta käyttö edellyttää kausivarastointia. Lämpöä voidaan lämpöpumppujen kanssa hyödyntää rakennusten lämmitykseen tai käyttää tiettyjen kriittisten katu- ja jalkakäytävösuuksien pitämiseen talvella sulina.

Energiapaaluja käytetään korvaamaan rakennusten normaalia paalutusta. Toisaalta ne toimivat kalliokaivojen tapaan lämmönlähteinä ja myös lämpövarastoina. Energiapaaluja on kaupallisesti saatavana ja käyttö on oletettavasti kasvamassa. Testausta varten tarvittaisiin lisää pilot-kohteita.

Lämpöä ei pidä tuottaa, lämpöä pitää siirtää sieltä, missä sitä on liikaa sinne, missä sitä tarvitaan. Sama pätee myös ajoitukseen. Lämpöä pitää kausivarastoida silloin, kun sitä on liikaa, ja käyttää silloin kun sitä tarvitaan. Lämmön varastoinnin tutkimiseen pitäisi Suomessa ohjata resursseja. Lämmityksen rinnalla kohta yhtä tärkeäksi lämmönsiirron muodoksi on nousemassa viilennys. Viilennykseen liittyvät tekniikat voisivat olla hyviä vientituotteita, sillä trooppisissa maissa käytetään jo tänä päivänä paljon rahaa viilennykseen.

Suomessa on paljon maapinta-alaa ja kohtuullisen hyvät tuuliolosuhteet tuulivoiman tuottamiseen. Tuulienergian kannattavuus on hyvin vahvasti riippuvainen tuulen nopeudesta ja tekniikan hinnasta. Tuulivoimala voidaan rakentaa korkean tornin varaan tai viedä merelle parempiin tuuliolosuhteisiin.

Erityisesti maa-alueille rakennettaessa pitää entistä tarkemmin ottaa huomioon tuulivoiman ympäristövaikutukset ja hyväksyttävyyden. Tällä hetkellä julkisuudessa keskustellaan eniten tuulivoimalan tuottamasta äänestä ja infraäänestä. Tutkimukset eivät ole pystyneet osoittamaan tuulivoiman infraäänien vaikuttavan lähellä asuvien terveyteen. Myös tuuliturbiinien kuuluvan melun vaikutukset ovat tehtyjen tutkimusten mukaan vähäisiä nykyisillä melutasoilla.

la. Turbiinien kehityksessä meluvaikutukset otetaan kuitenkin entistä paremmin huomioon. Sama koskee myös tuulivoima-alueiden kaavoitusta.

Aurinko- ja tuulivoiman laitteiden hintakehitys Suomessa seuraa globaalia hintakehitystä. Patronen (2016) mukaan "Aurinkosähkön osalta kustannusten lasku voi kuitenkin olla nopeaa, ja myös verkkoon syötöstä voi tulla kannattavaa ilman tukea". IEA:n ennusteen mukaan aurinkosähkön hinta laskee 25 % ja maatuulivoiman hinta 15 % vuoteen 2021 mennessä vuoden 2015 tasoon verrattuna. Suomessa hintakehitykseen vaikuttaa paitsi laitekustannukset myös muun muassa työvoimakustannusten kehitys.

Aurinko- ja tuulivoiman laitekustannusten laskun jatkuessa voidaan olettaa niiden molempien hintakilpailukyvyyn paranevan. Sähkön tuotannon lisääminen vaatii kuitenkin myös panostusta sähköverkkoon, energian varastointiin ja kuorman säätelyyn, koska energian tuottoa ei pystytä samalla tavalla ohjaamaan kuin fossiilisilla energiantuotantomuodoilla. Aurinkopaneelien hinnan odotetaan laskevan nopeammin kuin keskittäviin keräimiin perustuvan aurinkosähkön tuotantoon liittyvän tekniikan hinnan. Fossiilisten polttoaineiden korvaaminen uusiutuvilla energiamuodoilla luo kysyntää myös aurinkolämpötekniikoille ja niiden tuotannon ja käytön on ennustettu olevan kasvamassa.

Hybriditekniikkaa ja lämmönvarastointia hyödyntäen pyritään välttämään kausivaihteluja, jotka aiheutuvat uusiutuvan energian tuotannon mahdollisesta ajoittaisesta vaihtelusta. Hybriditekniikan sovellutus on myös uusiutuvan energian tekniikoiden ja jo käytössä olevan tekniikan yhdistäminen. Tällöin vanha tekniikka toimii säätöenergian tavoin. Erilaisia hybridiyhdistelmiä on lukemattomia. Edellä on esitelty kolmea esimerkkitapausta, jotka ovat olleet mukana tutkimushankkeessa. Eräänlaista hybriditekniikkaa tai esimerkki virtuaalivoimalasta on Oulun Energian markkinoima Farmivirta. Pienyrittäjät tuottavat sähköä mikro- ja pienvoimaloissa uusiutuvalla energialla. Oulun Energia toimii välittäjänä tuottajien ja kuluttajien välillä.

4. TEOLLINEN SYMBIOOSI

Erkki Hiltunen, Vaasan yliopisto, Teknillinen tiedekunta

Teollisella symbioosilla ymmärretään tilannetta, jossa tietyn tuoteketjun toteuttaminen on mahdollista vain useamman yrityksen saumattoman yhteistyön tuloksena. Symbioosi tulee ymmärtää niin, että kaikkien ketjun osien läsnäolo on toiminnan edellytys. Teollisen symbioosin syntymiselle on neljä perusedellytystä, joiden kaikkien tulisi täytyä jo hankkeen perustamisvaiheessa (Hiltunen, Stenvall, 2016).

Tarvitaan

1. investoivat yritykset
2. rahoittaja
3. raaka-aineet
4. tuotteiden hyödyntäjät

Investoivilla yrityksillä tarkoitetaan toisaalta yritystä/yrityksiä, jotka toimivat varsinaisen toiminnan ylläpitäjinä (esimerkiksi biokaasulaitos). Toisaalta yritykset voivat olla raaka-aineen tuottajia, joille symbioosi merkitsee sivutuotteena (tai jätteenä) syntyvän raaka-aineen hyödyntämistä tai ainakin tapaa saada jäte asialliseen käsittelyyn. Sivutuotteen tapauksessa kyse on yrityksen kannattavasta tuotteesta ja jätteen tapauksessa säästöstä jätteenkäsittelyn järjestämisessä. Esimerkkitapauksessa, case 1: biokaasulaitos, yrityksen päätuote on biokaasu ja raaka-aineeksi hankitaan teurastamolta jätettä. Symbioosista molemmat yritykset hyötyvät myös taloudellisesti. Rahoitusta ajatellen mukaan tulisi saada vakavaraisia jo toimivia yrityksiä. Kaikki yritykset eivät voi olla pieniä toimintaansa aloittelevia yrityksiä. Esimerkkitapauksessakin rahoittaja alkuvaiheessa piti biokaasulaitosta liian pienenä yrityksenä suhteessa osakepääomaan.

Rahoittajan tulee olla vakavarainen rahalaitos, joka on valmis myös riskinottoon ja sitoutuu hankkeen toteuttamiseen. Hankkeen alkuvaiheessa tarvitaan myös lähes poikkeuksetta mukana olevien yritysten omarahoitusta. Hajautetun energiantuotannon yrityksille tyypillistä on, että hankkeen alkuvaiheessa tarvitaan suurin osa infrastruktuurin rakentamiseen tarvittavasta rahoituksesta. Hankkeen alkuun saattamiseksi investointituen tyyppinen tukirahoitus on tarpeellinen.

Raaka-aineet tulisi saada joko hankkeessa mukana olevilta yrityksiltä tai tuotantoa harjoittavan yrityksen välittömästä läheisyydestä. Esimerkiksi biokaasuntuotannon tarvitseman biomassan tulee olla hankintahinnaltaan edullista ja kuljetuskustannusten matalia, jotta toiminta pysyisi kannattavana.

Tuotteiden hyödyntäjät ovat usein mukana jo raaka-aineiden tuottajina. Olennaista kuitenkin on, että nämä yritykset voivat käyttää symbioosista saatavaa tuotetta prosessissaan tai korvaamaan esimerkiksi öljyllä tuotettua lämpöä.

Yhteistyön täytyy olla kaikille osapuolille win-win -tilanne.

Case 1: Jepuan biokaasulaitos

Jepuan biokaasulaitos tuottaa uusiutuvaa energiaa 100 prosenttisesti lähialueen alkutuotannon raaka-aineista, kuten lanta, rehu- ja elintarviketeollisuuden lietteet, nahkatehtaan karvontaliete, vihermassat ja muut erilaiset biojätteet. Snellmannin lihanjalostuslaitos toimittaa biokaasulaitokselle kaasutukseen lietettä navetasta ja pesuhallista sekä sivutuotteita/jätettä eri prosesseista. Kaasun valmistuksen ohessa syntyvä kiinteä hygienisoitu mädätysjäännös on Elintarviketurvallisuusviraston hyväksymä lannoitustuote (Jepuan Kasvuvoima). Se soveltuu maaparannusaineeksi peltokäyttöön sekä vilja- että energiakasveille. Tuotetta voidaan käyttää laitoksen lähialueilla, lähinnä maanviljelyksessä. Laitoksella on myös valmius erotella ravinteita: typpipitoinen neste ja fosforipitoinen kiinteäaine.

Tuotettua biokaasua voidaan käyttää liikenteen polttoaineena, sillä kaasuasemalla on paineistetun biokaasun tankkaukseen soveltuva jakeluasema. Kaasun hinnaksi yritys ilmoittaa www-sivuilla 1,40 €/kg.



Kuva 4.1. Paineistetun biokaasun tankkaukseen soveltuva tankkausasema Jepuan biokaasulaitoksella. (kuva: Jepuan biokaasulaitos)

Valmistaa biokaasua hyödynnetään myös läheisillä teollisuuslaitoksilla, joissa mm korvataan aikaisemmin käytettyä propaania. Siirto voidaan suorittaa käyttäen suoraa siirtolinjaa (KWH Mirka) tai maantiekuljetuksena käyttäen paineistettuja kaasukontteja. KWH Mirka uutisoi 31.8.2016 (Mirka 2016), että yhtiön päätehdas Jepualla on kokonaan riippumaton fossiilisista polttoaineista. Energiauudistukset ovat tehneet mahdolliseksi myös oman kaatopaikan sulkemisen.

Jo 01.09.2016 alkaen Snellmannilla (Snellman 2014) on käytetty Jepuan Biokaasun kaasua lämmitykseen ja makkarauunien höyryntuotantoon. Biokaasun käytön myötä hiilidioksidipääs-

töjen on laskettu vähentyneen 3000 tonnilla / vuosi ja noin 1 miljoona kiloa öljyä on korvattu biokaasulla.



Kuva 4.2. Jepuan biokaasun jalostus- ja paineistusyksikkö sekä kaasukontti maantiekuljetukseen (kuva: Jepuan biokaasulaitos).

Case 2: Forssan teolliset symbioosit

Forssan teolliset symbioosit on saanut alkunsa jätteiden käsittelystä, kierrätyksestä ja biotaloudesta (<http://www.energiakokeilut.fi/node/9> ; havainto 06.10.2016). Lähtökohtana on viljan tuotanto ja siihen liittyen Boreal Kasvinjalostus Oy. Dupontin Jokioisten tehdas erottaa viljasta entsyymejä. ST1:n bioetanolitehtaalla valmistetaan etanolia, joka sekoitetaan liikennepolttoaineisiin. Valkuaisainerehu toimitetaan sikatiloille rehuksi. Prosessin eri vaiheisiin energiaa tuotetaan hakkeella.

Hanke edistää materiaalitehokkuutta, energiatehokkuutta, uusiutuvan energian käyttöä sekä uudenlaista liiketoimintaa. Forssan teolliset symbioosit on lajissaan pilot-hanke.

Johtopäätökset

Teollisessa symbioosissa useampi yritys toimii kiinteässä yhteistoiminnassa. Jokaisen osuus on olennaisen tärkeä kokonaisuuden toiminnan kannalta. Kokonaisuuden onnistumisen kannalta tärkeää on, että eri osapuolet, yritykset, rahoittajat, raaka-ainetoimittajat ja tuotteiden hyödyntäjät, ovat mahdollisimman aikaisessa vaiheessa selvillä ja sitoutetut hankkeeseen. Jepuan tapauksessa biomassat saadaan lähialueelta, jalostaminen tapahtuu biokaasulaitoksella ja tuotteet markkinoidaan osin samaan tuotantoketjuun, josta saadaan raaka-aineet (suljettu systeemi). Forssan tapauksessa ketju ei sulkeudu, vaan etanoli ja valkuaisainerehu poistuvat ketjusta.

Kuvatunlaisten teollisten symbioosien syntymisen edellytys on eri yritysten sijaitseminen riittävän lähellä toisiaan, sillä biomassojen kuljettaminen pitkiä matkoja ei ole taloudellisesti kannattavaa. Kuntapolitiikalla voidaan teollisuuden sijoittumiseen vaikuttaa ratkaisevasti, joten kuntien mukanaolo edesauttaa symbioosin muodostumista.

Potentiaalisia teollisia symbiooseja on energia-alalta helppo löytää. Nestemäisen biokaasun (LBG) valmistus liikenteen polttoaineeksi edellyttää kaasun tuotannon lisäksi puhdistamista, nesteytystä, kuljetusta, varastointi ja jakelua kulkuneuvoille. Tekniikat näihin ovat olemassa ja raskaan liikenteen yrityksillä on kiinnostusta nesteytetyn kaasun käyttöönottoon. Tässäkin ongelmana on kana-muna ongelma eli millä tavoin toiminta saadaan aloitettua.

Suurimuotoista levän tuotantoa ei Suomessa vielä ole hyödynnettävissä. Levästä polttoainetta olisi tyypillisesti hanke, jossa tarvittaisiin useampien yritysten tiivistä yhteistyötä. Levän kasvatus ja korjuu olisi ensimmäinen vaihe. Levän käyttö polttoaineen tuotantoon (biokaasu, bioetanoli, biodiesel) olisi tuotannon toinen vaihe ja polttoaineen kuljetus ja jakelu kolmas vaihe.

5. HAJAUTETUN JA UUSIUTUVAN ENERGIAN CASE-TUTKIMUKSIA ASIAKKAAN, ILMASTOVAIKUTUSTEN JA ELINKAARIKUSTANNUSTEN NÄKÖKULMASTA

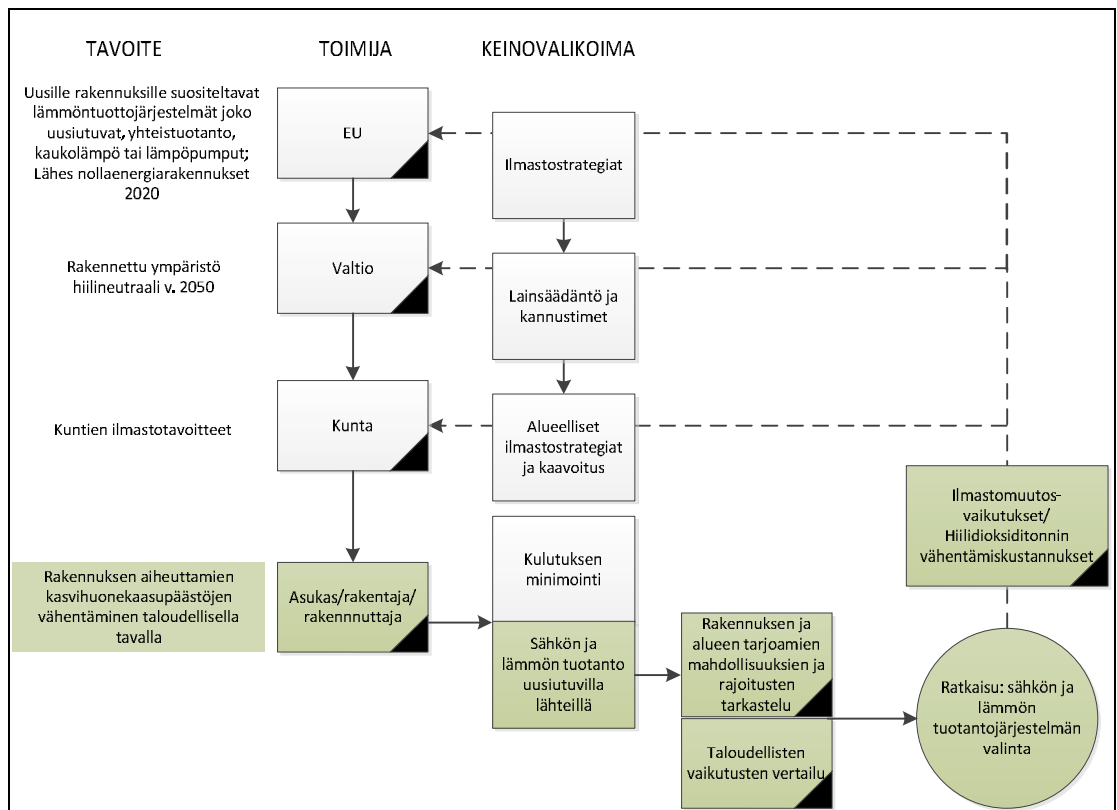
Risto Soukka, Kaisa Grönman, Lappeenrannan Teknillinen yliopisto

5.1 Johdanto

Tausta

Rakennusten lämmittäminen kattaa merkittävän osan, noin 25 % energian loppukäytöstä Suomessa (Suomen virallinen tilasto 2015). Kasvihuonekaasupäästöinä mitattuna rakennusten lämmitys aiheuttaa noin seitsemän prosenttia Suomen kasvihuonekaasupäästöistä (Suomen virallinen tilasto 2012). Rakennusten ja asumisen energiankulutukseen ja kasvihuonekaasupäästöihin pyritään vaikuttamaan monella eri tasolla (ks. myös kuva 1). Kansainvälisenä ja kansallisena tavoitteena on rakennusten energiankulutuksen ja hiilidioksidipäästöjen merkittävä vähentäminen sekä uusiutuvien energioiden käytön lisääminen, samalla vähentäen fossiilisen tuontienergian osuutta. Rakennusten energiatehokkuusdirektiivillä (2010/31/EU) tavoitellaan hiilidioksidipäästöjen vähentämistä rakennusten energiatehokkuutta parantamalla. Tavoitteena on myös, että kaikki uudet rakennukset ovat lähes nollaenergiarakennuksia vuoden 2020 loppuun mennessä. Edelleen direktiivi suosittelee uusien rakennusten lämmitykseen uusiutuvia energialähteitä, yhteistuotantoa, kauko- tai aluelämmitystä ja lämpöpumppuja, mikäli näitä on saatavilla ja ne ovat teknisesti ja taloudellisesti toteutettavia sekä ympäristön kannalta suotuisia. (2010/31/EU.) Suomi on asettanut oman visionsa rakennetulle ympäristölle. Tavoitteena on maailman paras ja hiilineutraali rakennettu ympäristö vuonna 2050 (Martinkauppi 2010). Myös kunnat ovat ryhtyneet viemään eteenpäin omia ilmastotavoitteitaan. Strategista ilmastotyötä tehdään jo lähes kaikissa yli 50 000 asukkaan kunnissa. Kunnat voivat kaavoituksen ja rakentamisen ohjauksella vaikuttaa ilmastomuutoksen hillintään ja sopeutumiseen. Mikäli kunnalla on omistusta mm. energiayhtiöissä ja joukko-liikennelaitossa, voivat ne vaikuttaa aiheutuviin päästöihin, kuitenkin markkinoiden ja tukimuotojen ehdoilla. (Parviainen 2015.)

Rakennusten osalta edellä esitettyjen ilmastotavoitteiden täytyminen riippuu lopulta pitkälti yksittäisen asukkaan, rakentajan tai rakennuttajan tekemistä valinnoista. Asukkaiden ja omistajien tavoitteena on yleensä pienentää rakennuksen energiankulutuksen kustannuksia. Rakennusten energiankulutuksen kustannuksia voidaan pienentää periaatteessa kahdella tavalla: joko yksinkertaisesti kuluttamalla vähemmän tai lisäämällä ilmaisenergian käyttöä. Energiankulutuksen vähentäminen tai ilmaisenergian, eli uusiutuvan energian käyttö kuitenkin tulee senkin olla kustannustehokasta. Asukas tai rakentaja ei tee ilmastoystävällistä valintaa, jos investointiin käytettävä rahamäärä on suurempi, kuin olisi energiankulutuksen pienentämisellä saavutettavissa oleva kustannussäästö. Tällöin myös EU:n, Suomen valtion ja kuntien asettamien ilmastotavoitteiden saavuttaminen on vaikeampaa. Rakennusten aiheuttamien kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen toimintakehää on kuvattu kuvassa 5.1.



Kuva 5.1. Rakennusten aiheuttamien kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen

Tavoitteet ja rakenne

Jotta ilmastotavoitteet olisivat saavutettavissa, on rakennusten lämmön tuotannon kasvihuonekaasupäästöjä vähennettävä. Hajautetun uusiutuvan energian käyttöä lisäämällä voidaan vähentää hiilidioksidipäästöjä, mutta investoijan on pystyttävä toimimaan alueen ja rakennuksen tarjoamien reunaehtojen puitteissa. Samoin investoinnin on oltava taloudellisesti kannattava. Tässä raportissa esitellään case-tapauksia uusiutuvan ja hajautetun energian soveltamisesta rakennusten lämmön tuotantoon. Tavoitteena on esitellä näiden tapausten avulla elinkaarikustannuksia ja ilmastonmuutosvaikutuksia, kun uusiutuvaa energiaa käytetään hajautetusti fossiilisten kanssa rinnakkain tai niiden sijasta. Samoin halutaan esitellä käytännön rajoitteita sekä mahdollisuuksia, joita asukas, rakentaja tai rakennuttaja joutuu ottamaan huomioon valitessaan tai uusiessaan lämmöntuotantjärjestelmää. Osion tavoitteena on siis tuoda ilmi ruohonjuuritasolla tapahtuvan päätöksenteon haasteita ja reunaehtoja, jotka on otettava huomioon uusiutuvan ja hajautetun energian käyttöönottoa suunniteltaessa.

Näitä seikkoja tarkistellaan kolmen tapaustutkimuksen avulla. Tapaustutkimukset on tehty diplomitöinä Lappeenrannan teknillisen yliopiston Ympäristötekniikan koulutusohjelmassa. Matti Jaarasen työssä tarkastellaan lämmöntuotantovaihtoehtojen *elinkaarikustannuksia*, kun saneerataan olemassa olevaa kerrostaloa sekä rakennetaan täysin uusi asuinkerrostalo. Markus Hirvosen työssä tarkastellaan uuden asuinrakennusalueen tarjoamia mahdollisuuksia

lämmitysjärjestelmän valinnalle ja tarkastellaan vaihtoehtoisia järjestelmiä sekä *elinkaarikustannusten kuin niiden ilmastopotentiaalien perusteella*. Kolmantena esitellään Pekka Kettusen työ, jonka avulla tuodaan ilmi *rakennuksen ja alueen asettamia reunaehtoja* uusiutuvan ja hajautetun lämmön ja sähkön tuotantoon.

5.2 Case-tarkastelut

Case 1: Asuinkerrostalon lämmöntuotantojärjestelmän optimointi elinkaarikustannusten perusteella hyödynnettäessä lämpöpumpulla useita lämmönlähteitä

Matti Jaarasen diplomityössä (Jaaranen 2014) lähtökohtana oli optimoida useita lämmönlähteitä käyttävän lämpöpumpun kilpailukyky asuinkerrostalon lämmöntuotantojärjestelmänä. Tarkasteltavia lämmöntuotantojärjestelmiä vertailtiin elinkaarikustannuslaskennan avulla. Elinkaarikustannuslaskennassa tärkeää on huomioida tuotteen koko elinkaari sekä tuotteen suorituskyky, turvallisuus, luotettavuus ja huollettavuus eli seikat, jotka vaikuttavat tuotteeseen liittyviin kustannuksiin koko sen elinkaaren ajalla. Seuraavassa esitellään Matti Jaarasen tutkimustyö ja sen tärkeimmät tulokset.

Lämmöntuotantojärjestelmiä tarkasteltiin kahdessa erilaisessa kohteessa. Case 1 edustaa korjausrakentamista ja case 2 uudisrakentamista. Case 1 on vuonna 1979 rakennettu asuinkerrostalo, eli se edustaa asuinkerrostalorakentamisen huippuvuosia Suomessa. Case 2 taas edustaa vuoden 2014 voimassaolevien rakennusmääräysten mukaisesti rakennettavaa uudisrakentamista.

Case 1 on Lappeenrannassa sijaitseva, opiskelija-asuntolana toimiva asuinkerrostalokiinteistö. Se muodostuu kahdesta betonielementtikerrostalosta. Rakennusvuoden 1979 jälkeen kiinteistölle on suoritettu peruskunnostus vuonna 2000, jossa kunnostettiin ikkunat ja parvekkeet sekä uusittiin sisäpintoja. Kiinteistön nykyinen lämmöntuotantojärjestelmä on kaukolämpö. Kiinteistön lämmönjakojärjestelmä on vesikiertoinen patterilämmitys.

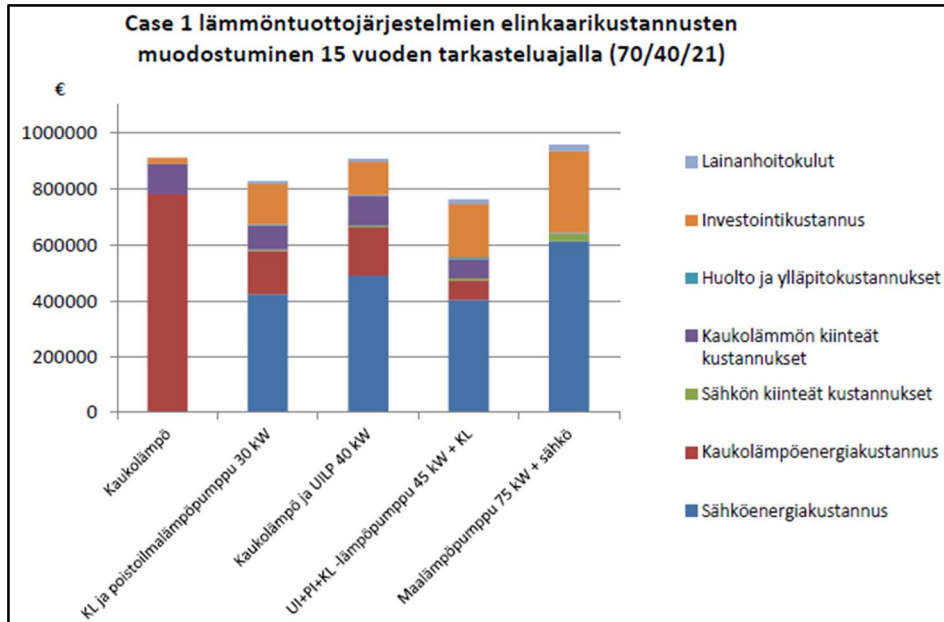
Vertailtavat lämmitysjärjestelmät case 1 kiinteistössä ovat

- 1) Kaukolämpö
- 2) Kaukolämpö ja poistoilmalämpöpumppu 30 kW
- 3) Kaukolämpö ja ulkoilma-vesilämpöpumppu 35 kW
- 4) Kaukolämpö ja ulkoilma-vesilämpöpumppu 40 kW
- 5) Ulkoilma+poistoilma+kaukolämpö -hybridilämpöpumppu 45 kW ja kaukolämpö
- 6) Maalämpöpumppu 75 kW ja sähkö

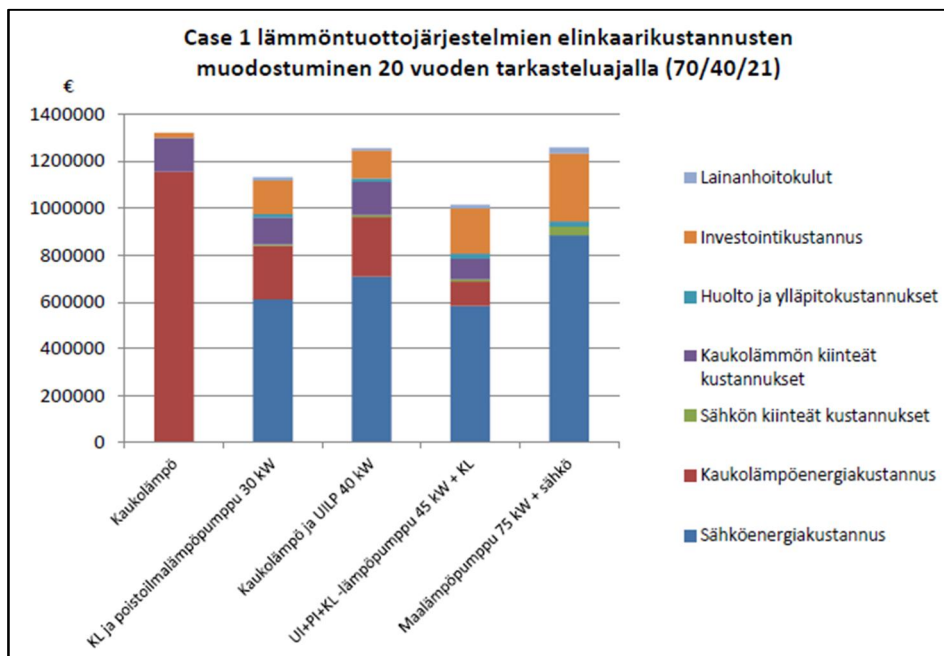
Elinkaarilaskelmassa käytettyjä alkuarvoja ja -oletuksia

- Sähköenergian alkuhinta 125 €/MWh
- Sähkön hinnannousu 3 %/a
- Sähköliittymän muutoskustannukset 74 €/kW (Lappeenrannan Energia Oy Sähkön v. 2014 liittymishinnaston mukaan)
- Kaukolämmön alkuhinta 68,5 €/MWh
- Kaukolämmön hinnannousu 3,8 %/a

- Kaukolämmön lämmöntuoton hyötysuhde 97 %
- Energiavaraajalla varustettujen lämmöntuotantojärjestelmien hyötysuhde 90 %
- Energiakaivojen maaosuus 5 metriä, jonka jälkeen kallio-osuus
- Poraushinta maa-osuudelle 68,2 €/m ja kallio-osuudelle 29,14 €/m (alv. 24 %)
- Energiakaivokentän liitosputkien hinta 15,5 €/m² lämmitettyä nettoalaa



Kuva 5.2. Case 1 lämmöntuotantojärjestelmien elinkaarikustannukset 15 vuoden tarkastelu-ajanjaksolla lämmitysverkoston mitoituslämpötiloilla (70/40/21) (Jaaranen 2014)



Kuva 5.3. Case 1 lämmöntuotantojärjestelmien elinkaarikustannukset 20 vuoden tarkastelu-ajanjaksolla lämmitysverkoston mitoituslämpötiloilla (70/40/21) (Jaaranen 2014)

Kuvissa 5.2 ja 5.3 on esitetty korjausrakennuskohteen lämmöntuotantojärjestelmien elinkaarikustannukset 15 ja 20 vuoden tarkasteluajanjaksoilla. Lämpöpumppujärjestelmien investointikustannukset ovat huomattavia. Maalämpöpumpun investointikustannuksista lähes 60 % aiheutuu energiakaivokenttään liittyvistä kustannuksista. Tarkasteluajan pidentyessä 15 vuodesta 20 vuoteen investointikustannusten osuus elinkaarikustannuksista luonnollisesti pienenee ja suurimman kustannuserän muodostavat sähköenergiakustannukset määrittävät tuloksia enemmän.

Mitoituslämpötiloilla on selkeä vaikutus tuloksiin. Tarkastellessa järjestelmiä kahdella eri mitoituslämpötiloilla, 80/50/21 sekä 70/40/21, lämpöpumput selvästi hyötävät, kun lämmitysverkoston lämpötilatasot laskevat. Verkoston lämpötilatasojen alentaminen parantaa lämpöpumppua hyödyntävien lämmöntuotantojärjestelmien suorituskerrointa, jolloin niiden energiakustannukset pienenevät. Tämä luonnollisesti näkyy elinkaarikustannusten alenemisena.

Mitoituslämpötilalla 70/40/21 kaikilla vertailtavilla lämmöntuotantojärjestelmillä on pienemmät elinkaarikustannukset kuin kaukolämmöllä. Tulosten perusteella elinkaarikustannuksiltaan edullisin järjestelmä on hybridilämpöpumppu, jonka lämmön lähteinä toimivat ulkoilma, poistoilma ja kaukolämpö.

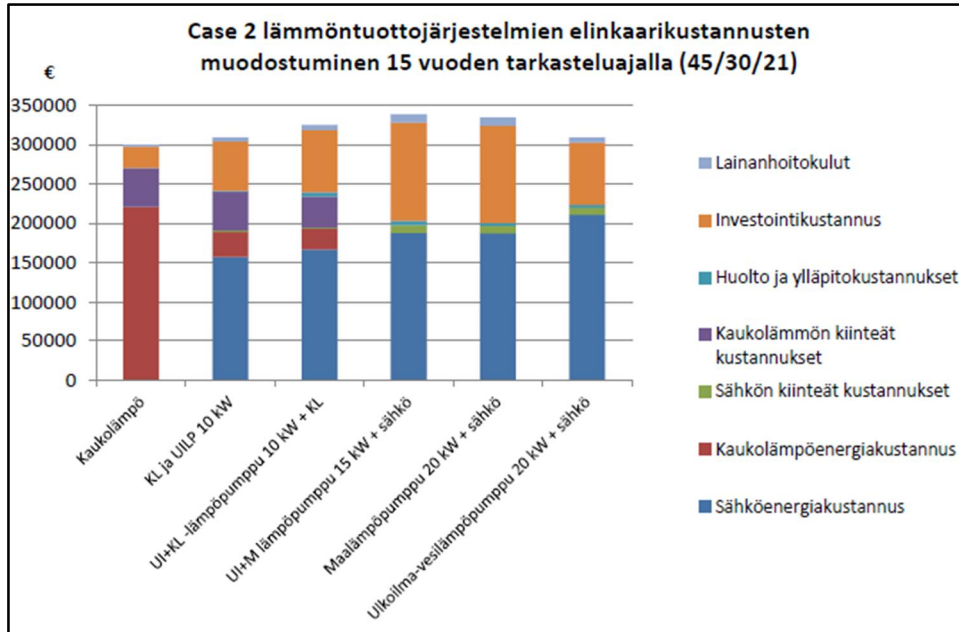
Toisena case-kiinteistönä on kuvitteellinen hankesuunnitteluvaiheessa oleva uudiskerrostalo, joka sijaitsisi Lappeenrannassa kaukolämpöverkon ulottuvilla.

Elinkaarilaskelmissa käytettyjä alkuarvoja ja -oletuksia

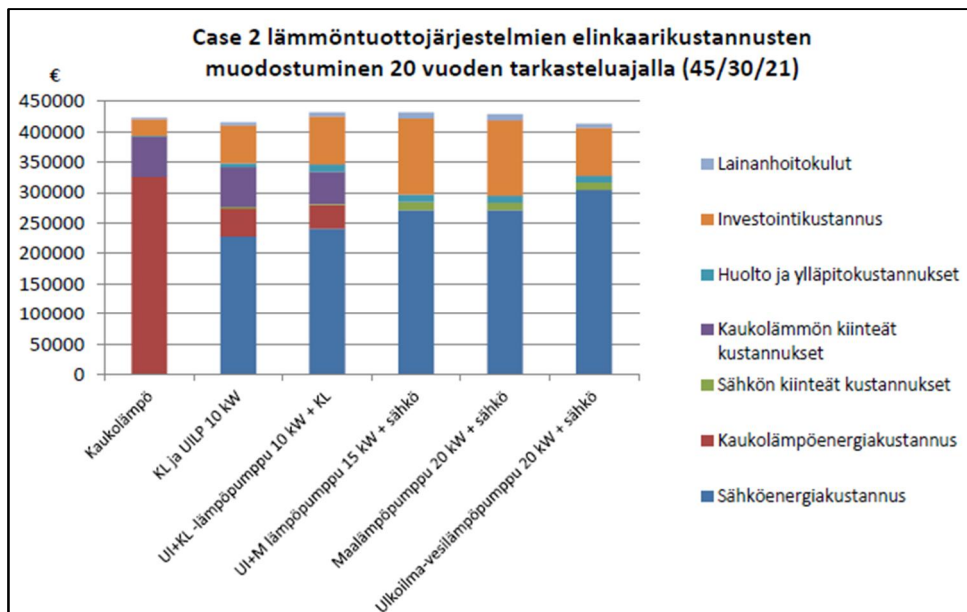
- Sähkön ja kaukolämmön hinnat samat kuin edellä case-kiinteistössä 1
- Lämmöntuotannon hyötysuhteet samat kuin edellä case-kiinteistössä 1
- Poraushinta energiakaivojen maaosuudelle (5 m) 71,3 €/m ja kallio-osuudelle 30,75 €/m, hinnat korkeammat kuin case 1:n kiinteistössä, koska kaivoista otetaan suurempi teho, mikä vaatii kahden U-putkikilometrin käyttöä yhdessä kaivossa
- 15 vuoden tarkastelujaksolla oletetaan, ettei lämmöntuotantolaitteille tarvita korjausinvestointeja
- 20 vuoden tarkastelujaksolla oletetaan uusittavaksi moottoriventtiilien toimilaitteet, automaation kenttälaitteet sekä lämpöpumpun kompressori, jonka hinta oletetaan olevan 20 % lämpöpumpun hankintahinnasta

Vertailtavat lämmitysjärjestelmät case 2 kiinteistössä ovat

- 1) Kaukolämpö
- 2) Kaukolämpö ja ulkoilmalämpöpumppu 10 kW
- 3) Ulkoilma+kaukolämpö -lämpöpumppu 10 kW +kaukolämpö
- 4) Ulkoilma+maalämpöpumppu 15 kW +sähkö
- 5) Maalämpöpumppu 20 kW + sähkö
- 6) Ulkoilma-vesilämpöpumppu 20 kW + sähkö



Kuva 5.4. Case 2 lämmöntuotantojärjestelmien elinkaarikustannukset 15 vuoden tarkasteluajanjaksolla lämmitysverkoston mitoituksella (45/30/21) (Jaaranen 2014)



Kuva 5.5. Case 2 lämmöntuotantojärjestelmien elinkaarikustannukset 20 vuoden tarkasteluajanjaksolla lämmitysverkoston mitoituksella (45/30/21) (Jaaranen 2014)

Kuvissa 5.4 ja 5.5 on esitetty uudisrakennuksen lämmöntuotantojärjestelmien elinkaarikustannukset 15 ja 20 vuoden tarkasteluajanjaksolla. Uudisrakennuksen tapauksessa lämmityksen tehontarve on vähäisempi kuin korjausrakentamista edustavassa kiinteistössä. Lämpöpumpuilta vaadittavan pienemmän tehon tarpeen takia investointikustannukset jäävät case 1:een verrattuna alhaisimmiksi case 2:ssa.

Kaukolämmön edullisten investointikustannusten ansiosta kaukolämmitysjärjestelmä tulee elinkaarikustannuksiltaan edullisimmaksi 15 vuoden tarkastelujaksolla. Myöskään 20 vuoden tarkasteluajanjaksolla lämpöpumppujärjestelmien ansiosta saadut energiasäästöt eivät riitä suurempien investointien kattamiseen yksittäisen asuinkerrostalon tapauksessa. Erot tarkasteltavien lämmöntuotantojärjestelmien välillä ovat hyvin pieniä 20 vuoden tarkastelujaksolla, korkeimpien ja matalimpien kustannusten eron ollessa vain n. 20 000 €

Koska lämmöntuotantojärjestelmien elinkaarikustannusten erot 20 vuoden tarkasteluajanjaksolla ovat hyvin pieniä, järjestelmä on hyvin herkkä kustannuskomponenttien muutoksille. Investointikustannusten nousu 15 %:lla nostaa ulkoilma-vesilämpöpumpun elinkaarikustannukset suuremmiksi kuin kaukolämmityksellä. Sähkön hinta on merkittävä tekijä ulkoilma-vesilämpöpumpun elinkaarikustannusten kannalta. Sähköenergian alkuhinnan kallistuessa 5 % tulee kaukolämmitys 20 vuoden aikana halvemmaksi, mikäli kaukolämmön hinta ei muutu arvioitua enemmän. Merkittävin tekijä kannattavuuteen on sähköenergian vuosittainen hinnannousu. Sähkön hinnannousu vain yhdellä prosentilla vuosittain tarkoittaa, että kaukolämpö on elinkaarikustannuksiltaan edullisin vaihtoehto, taas olettaen, että kaukolämmön hinnannousu pysyy nykyisenä. Sähkön ja laitteiston hinnannousu-uhkien takia ei voida taloudellisesti perustella ulkoilmavesilämpöpumpun hankkimista tarkasteltuun uudiskerrostaloon, vaikka se 20 vuoden tarkastelujaksolla onkin vertailtavista järjestelmistä hienoisesti elinkaarikustannuksiltaan edullisin.

Johtopäätökset

Elinkaarikustannuslaskennan perusteella hybridilämpöpumppu, jolla hyödynnetään useita lämmönlähteitä, voi olla kannattava investointi suuressa osassa nykyistä asuinkerrostalojen rakennuskantaa. Hybridijärjestelmien suuret investointikustannukset saadaan kuoletettua energiakustannussäästöinä, jos rakennuksen energiankulutus on suhteellisen suuri. Tulosten perusteella korkeatkaan lämmitysverkoston mitoituslämpötilat eivät välttämättä tee lämpöpumppujärjestelmiä kannattamattomaksi. Toisaalta uudisrakennusten kohdalla lämmitysenergian tuottaminen lämpöpumppujärjestelmin ei välttämättä ole kannattavampaa verrattuna kaukolämmitykseen. Uudisrakennusten lämmöntarve on selvästi pienempi kuin ennen 2000-lukua valmistuneissa asuinkerrostaloissa, eikä lämpöpumppujärjestelmillä saavutetut energiasäästöt jokaisessa tapauksessa kata kallista investointia.

Uudisrakennuksissa jäähdytystarve tulee hyvin todennäköisesti lisääntymään. Jäähdytysenergian tuottaminen onnistuu lämpöpumpuilla, mikä nostaa kompressorin käyttämän sähköenergian hyödyntämistä. Todennäköisesti jäähdytyksen huomioiminen parantaa lämpöpumppujärjestelmien kilpailukykyä, koska erillisen jäähdytysjärjestelmän investointikustannukset voivat olla huomattavia.

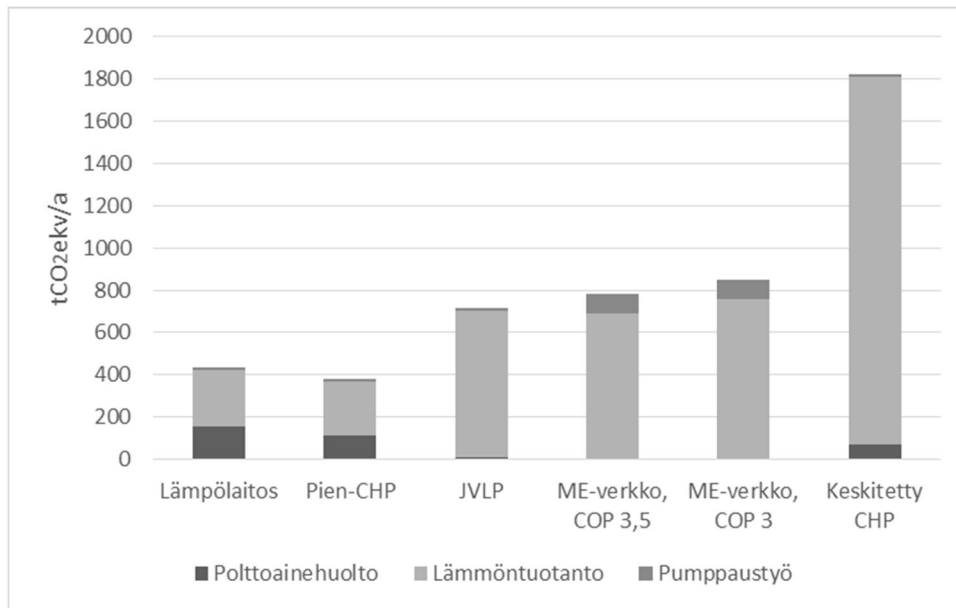
Case 2: Penttilänrannan uudisrakennusalueen lämmitysjärjestelmän valinta hiilijalanjälki- ja elinkaarikustannusnäkökulmasta

Markus Hirvonen on tutkinut diplomityössään (Hirvonen 2010) Joensuussa rakenteilla olevan Penttilänrannan asuinalueen lämmitysratkaisuja. Penttilänrannan uudisasuntoalue rakennetaan pitkällä, noin 25 vuoden aikajänteellä, joten valittavan lämmitysjärjestelmän on mukautettava hitaasti kasvavaan lämpökuormaan. Lisäksi halutaan hyödyntää mahdollisuuksien mukaan lähialueen tarjoamia lämpöenergian lähteitä.

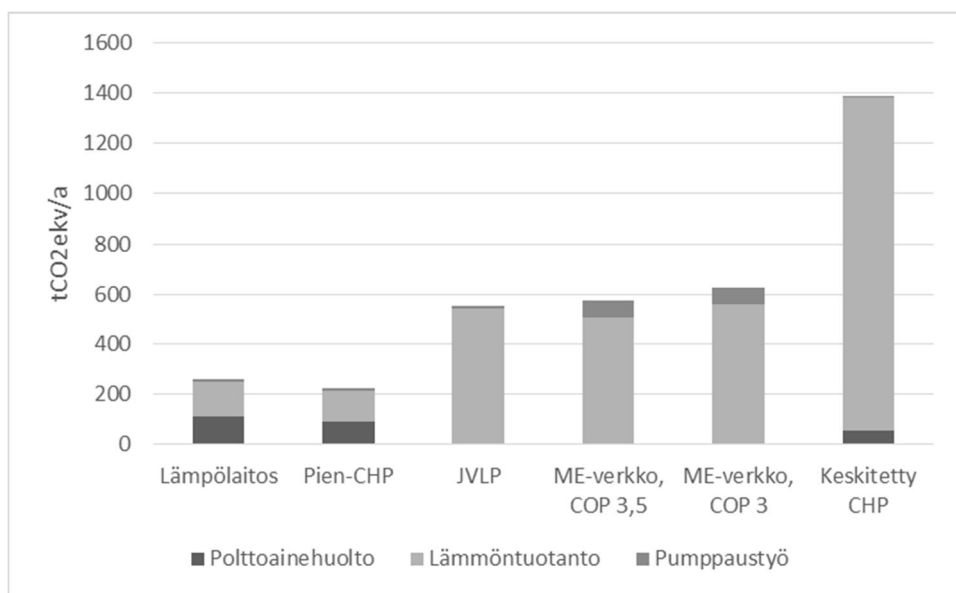
Tarkasteltaviksi lämpöenergiaratkaisuksi valittiin seuraavat vaihtoehdot:

- 1) Lämpölaitos
 - Rakennetaan kaksi erikokoista haketta polttoaineenaan käyttävää lämpölaitosta, lämmönjakelu kaukolämpöverkolla
 - Vara- ja huippulämpö raskasta polttoöljyä käyttävällä lämpökattilalla
- 2) Pien-CHP-laitos ja kaukolämpö (Pien-CHP)
 - Rakennetaan haketta polttoaineena käyttävä pien-CHP-laitos ja pienikokoinen lämpölaitoksen yhdistelmä, lämmönjakelu kaukolämpöverkolla
 - Vara- ja huippulämpö raskasta polttoöljyä käyttävällä lämpökattilalla
- 3) Jätevesilämpöpumppu ja kaukolämpö (JVLP)
 - Käytetään olemassa olevan Kuhasalon jätevedenpuhdistamon puhdistettua jätevettä lämpöpumpun lämmönlähteenä, lämmönjakelu kaukolämpöverkolla
 - Vara- ja huippulämpö raskasta polttoöljyä käyttävällä lämpökattilalla
- 4) Matalaenergiaverkko ja kiinteistökohtaiset lämpöpumput (ME-verkko COP 3,5 & ME-verkko COP 3)
 - Johdetaan lämmönsiirtimien avulla olemassa olevan Kuhasalon jätevedenpuhdistamon puhdistettua jätevettä matalaenergiaverkostoa pitkin lämpö kiinteistöille, joissa kiinteistökohtaiset lämpöpumput ottavat tarvittavan lämpöenergian
- 5) Fortumin keskitetty CHP-laitos ja kaukolämpö
 - Kytkeytyminen olemassa olevaan Fortum Oyj:n hallinnoimaan kaukolämpöverkkoon, jossa energia tuotetaan CHP-laitoksen ja biokattilan sekä hajautettujen raskasta polttoainetta käyttävien lämpökattiloiden kokonaisuudella

Edellä esitellyjä vaihtoehtoja Penttilänrannan asuntoalueen lämmitysratkaisuksi tarkasteltiin vaihtoehtojen elinkaariarvioinnin avulla ilmastonmuutospotentiaalia, joka aiheutuu rakennuskannan vuotuisesta lämmitystarpeesta ja lämpimän käyttöveden tarpeesta. Koska rakentaminen tapahtuu pitkällä aikavälillä ja alueen lämmöntarve kasvaa ajan myötä, tarkastelu tehtiin sekä maksimilämpötarpeelle 10858 MWh/a, että minimilämmöntarpeelle, 7945 MWh/a. Seuraavissa kuvissa on esitetty vaihtoehtojen ilmastonmuutospotentiaalitulokset maksimilämmöntarpeelle (kuva 5.6) ja minimilämmöntarpeelle (kuva 5.7).



Kuva 5.6. Lämmöntuotantovaihtoehtojen ilmastonmuutospotentiaalit maksimilämmön kulutus- tasolla (Hirvonen 2010)



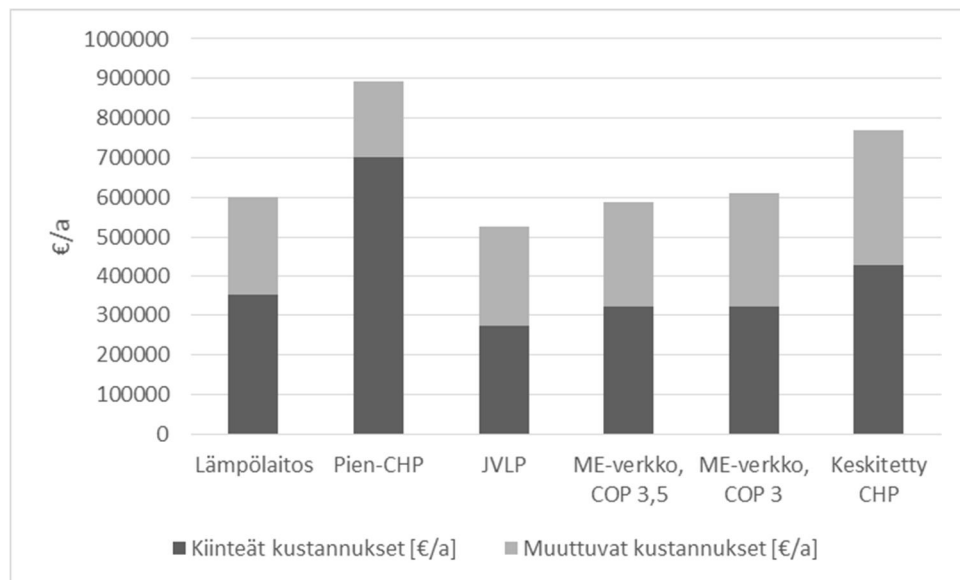
Kuva 5.7. Lämmöntuotantovaihtoehtojen ilmastonmuutospotentiaalit minimilämmön kulutus- tasolla (Hirvonen 2010).

Tuloksista havaitaan, että hake-pohjaisilla lämmitysjärjestelmillä on pienimmät ilmastonmuutosvaikutukset. Pien-CHP-laitos saa kaikista pienimmän ilmastonmuutospotentiaalin, sillä verrattuna lämpölaitosvaihtoehtoon, pien-CHP-laitos hyötyy laskennasta siitä, että osa sen aiheuttamista päästöistä allokoidaan laitoksen tuottamalle sähkölle. Lämpöpumppusovelluksiin perustuvien jätevesilämpöpumppu- ja matalaenergiaverkkovaihtoehtojen ilmastonmuutospotentiaalierot keskenään ovat suhteellisen pieniä. Sen sijaan keskitetty CHP-vaihtoehto erottuu muista vaihtoehdoista selkeästi suuremmalla ilmastonmuutospotentiaalillaan.

Polttoainehuollon osuus näkyy lähinnä lämpölaitos- ja pien-CHP -vaihtoehdoissa, joissa käytetään haketta polttoaineena. Tarkastelussa ei huomioitu verkkosähköntuotannon polttoainehuoltoa, jonka vuoksi matalaenergiaverkkovaihtoehdoissa ei ole esitetty sähköntuotannon polttoainehuollon vaikutusta. Lämmöntuotanto aiheuttaa jokaisessa vaihtoehdossa suurimman osuuden ilmastonmuutospotentialista. Lämmöntuotannon kokonaispäästöt ovat pienimmät lämpölaitoksella ja pien-CHP-laitoksella, koska polttoaineena käytetään suurelta osalta näissä vaihtoehdoissa hiilivapaaksi katsottavaa, bioperäistä haketta. Maksimi- ja minimilämmönkulutustasojen väliset erot selittyvät luonnollisesti suuremmalla lämmitystarpeella, mutta maksimikulutuskenaariossa raskaan polttoöljyn käyttö vara- ja huippulämpönä aiheuttaa korkealla päästökertoimellaan suuremmat kasvihuonekaasupäästöt.

Jätevesilämpöpumppuvaihtoehdossa ilmastonmuutospotentialia määrätty pitkälti käytettävän lämpöpumpun COP-kertoimen ja käytettävän sähkön CO₂-ekv.-kertoimen mukaan. Matalaenergiaverkon lämmöntuotanto toteutetaan täysin kiinteistökohtaisilla lämpöpumpuilla, jolloin lämmöntuotannon osuus määrätty täysin lämpöpumppujen COP-kertoimen ja lämpöpumppujen kuluttaman sähkön päästökertoimen perusteella. Matalaverkkoratkaisuissa pumppaus aiheuttaa n. 10–12% vaihtoehdon kokonaispäästöistä. Keskitetyn CHP-laitoksen lämmöntuotannon määräävä osuus johtuu turpeen poltosta ja siitä aiheutuvista suurista kasvihuonekaasupäästöistä.

Penttilänrannan uudisrakennusalueen vaihtoehtoisia lämmitysratkaisuja tarkasteltiin myös elinkaarikustannuslaskennan avulla. Laskennassa huomioitiin polttoaineiden ja sähköenergian hinta sekä investointi- ja huoltokustannukset lämmöntuotantolaitteille, lämmönjakeluverkolle ja rakennusten ja verkon välisille liityntälaitteille. Kaikille investoinneille laskettiin vuotuisen kustannus annuiteettimenetelmällä käyttäen investoinnin poistoaikana investoinnin tekniistä käyttöikä. Kuvassa 5.8 on esitetty vaihtoehtoisten lämmitysratkaisujen vuotuiset kustannukset.



Kuva 5.8 Vaihtoehtojen vuosittaiset kustannukset (Hirvonen 2010).

Ilmastonmuutospotentialiltaan edullisin pien-CHP-laitos oli tarkastelussa kustannuksiltaan kallein vaihtoehto. Sen investoinneista ja ylläpitokuluista johtuvat korkeat vuotuiset kustannukset heikentävät laitoksen kannattavuutta. Pien-CHP-laitoksen muuttuvat kustannukset ovat muihin vaihtoehtoihin verrattuna alhaisemmat johtuen myyntiin saatavasta sähköstä.

Lämpölaitosvaihtoehdon, jätevesilämpöpumppuvaihtoehdon ja matalaenergiaverkkovaihtoehtojen vuosittaiset kustannukset ovat samaa suuruusluokkaa. Keskitetty pumppuratkaisu jätevesilämpövaihtoehdossa on hieman edullisempi kustannuksiltaan verrattuna kiinteistökohtaisiin lämpöpumppuihin ME-verkkovaihtoehdoissa. Jätevesilämpöpumppu on vaihtoehdoista edullisin, mikä selittyy pitkälti alhaisista henkilöstökuluista ja suhteellisen alhaisista investointikustannuksista lämmöntuotantolaitteistoon. Lämpölaitosvaihtoehdon etuna ovat suhteellisen alhaiset muuttuvat kustannukset, jolloin lämpölaitosvaihtoehdossa tuotetun energian yksikköhintaa saataisiin alaspäin, mikäli laitokselle saataisiin lisää lämpökuormaa.

Keskitetyn CHP-vaihtoehdon kustannukset on laskettu lämmöntuottajan antamien ohjehintojen perusteella, eli ne sisältävät lämmöntuottajan katteen. Näin ollen ei ole mielekäästä suoraan vertailla keskitetyn CHP-laitoksen vuosittaisia kustannuksia muihin vaihtoehtoihin.

Johtopäätökset

Lämmöntuotantovaihtoehtoja tarkastellessa sekä ilmastonmuutos- kuin kustannusnäkökulmasta ei ole yksiselitteisesti parasta vaihtoehtoa Penttilänrannan asuinalueen lämmöntuotannolle. Pien-CHP-laitos on ilmastonmuutospotentialiltaan paras vaihtoehto, mutta kustannuksiltaan kallein. Lämpölaitosvaihtoehto on ilmastonmuutospotentialiltaan lähes yhtä hyvä vaihtoehto kuin pien-CHP-laitos ja myös sen kustannukset olivat kohtuullisia. Pienen kokoluokituksen lämpölaitosta arvioitaessa ja sijoittaessa sitä lähelle asutusta on otettava kuitenkin muitakin seikkoja kuin talous- ja ilmastonmuutosvaikutukset huomioon. Haketta poltettaessa alueelle aiheutuu hiukkaspäästöjä, jotka heikentävät ilmanlaatua. Jätevesilämpöpumppuvaihtoehto on kustannuksiltaan edullisin vaihtoehto, ja sen ilmastonmuutospotentialiakin voidaan pienentää, mikäli sen kuluttama sähkö olisi vähäpäästöistä. Jätevesilämpöpumppu soveltuu myös hyvin vähitellen kasvavaan lämmöntarpeeseen, sillä asuinalueen kasvaessa samalla myös jätevesivirtaamat ja hukkalämmön määrä nousevat, ja lämpöpumppuyksiköitä voidaan rakentaa tarpeen vaatiessa lisää.

Case 3: Opistorakennuksen lämmitysjärjestelmän valinnan reunaehdot

Pekka Kettusen diplomityössä (Kettunen 2016) on tutkittu Kouvolassa kansanopistona toimivan Kymenlaakson opiston rakennuskokonaisuuden energiatehokkuuden parantamista uuden lämmitysratkaisun avulla. Nykyisin lämmitysratkaisuna toimii kaukolämpö. Opiston rakennukset on rakennettu 60-, 70- ja 80-luvuilla.

Uutta lämmitysjärjestelmää valittaessa kohdataan erilaisia rakennuksen ja alueen asettamia reunaehtoja sekä järjestelmiin liittyviä riskejä. Kymenlaakson opiston tapauksessa reunaehdot ovat seuraavia: Lämmitystehon tarve ja lämmitysenergian kulutus on opistolla niin suurta, että esimerkiksi ilma-vesilämpöpumppujen teho ei riitä vaan niitä voi käyttää ainoastaan päälämmönlähteen tukena. Lämmönjakohuone on mitoitettu kaukolämmönlaitteistoa varten ja tila uusille järjestelmille on rajallinen. Ahtaan tilan takia järkevintä olisi, että maalämmön vaatima

tekniikka sijoitetaan erilliseen konttiin lämmönjakohuoneen välittömään läheisyyteen rakennuksen ulkopuolelle. Asemakaavan ehdot ja rajoitukset paikalliselle energiantuotannolle on huomioitava. Kouvolan kaupungin alueella energiakaivon poraaminen ja vesistöön sijoitettavan lämmönkeruuputkiston asentaminen on luvanvaraista. Myös yli kahden neliömetrin kokoiset aurinkopaneelit ja -järjestelmät vaativat toimenpideluvan.

Eri lämmitysjärjestelmien käyttöikä sekä huoltotarve vaikuttavat oleellisesti niiden valintaan käyttäjän näkökulmasta. Lämmitysjärjestelmien keskimääräiset käyttöiät ovat seuraavat (RIL 265-2014 2014):

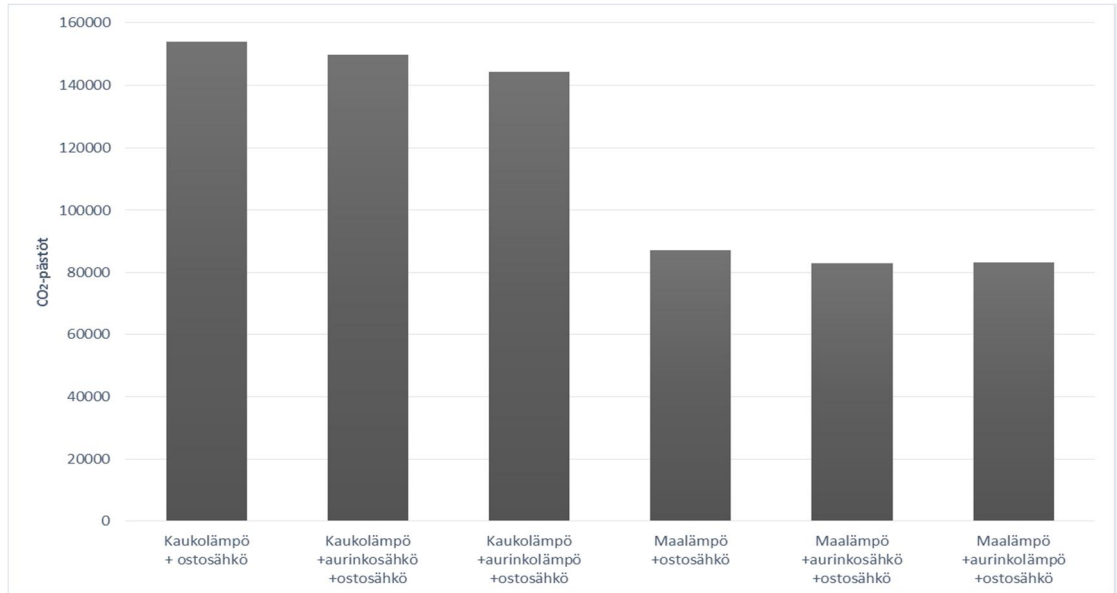
- Aurinkolämpö: 10–30 vuotta (keskimäärin 15 vuotta)
- Maalämpöpumppuyksikkö: 50 vuotta
- Maalämpöasennus ja lämmönlähde: 20–25 vuotta
- Poistoilmalämpöpumput: 15–20 vuotta
- Ilmalämpöpumput: 10–15 vuotta

Aurinkojärjestelmät eivät vaadi juurikaan huoltotoimenpiteitä, samoin kuin kaukolämpöjärjestelmä. Maalämpöpumpun kuluvin osa lienee kompressori ja mikäli se rikkoutuu, tilalle voidaan vaihtaa uusi kompressori ilman lämpöpumpun vaihtamista. Maalämpöpumpun asennusvaiheen suurimmat riskit liittyvät lämpökaivojen poraamiseen pohjavesivahinkojen ja kaluston hajoamisen takia. Maalämpöputkien kaivaminen vaakatasoon vaatii tilaa tontilta, ja Kymenlaakson opiston tapauksessa tarvittavaa tilaa ei tontilla ole riittävästi. Myös vesistölämmön käyttö lähellä virtaavasta Kymijosta on vaikeaa, sillä opiston tontti ei ylety joelle asti, ja tarvittavan lämmönkeruulaitteiston 140 metriä leveään jokeen sijoittaminen on tilan kannalta haastavaa. Opiston tontti soveltuu kuitenkin hyvin energiakaivon poraamiseen, sillä maanpeitteen paksuus on alle 10 metriä ja kallioperä on rapakiveä, jonka lämmönjohtavuus on erinomaista. Opiston päärakennuksen ja asuntolarakennuksen katto soveltuvat kohtalaisen hyvin aurinkoenergian hyödyntämiseen, sillä lappeet ovat pinta-alaltaan suuria ja sijoittuvat etelä-kaakkosuuntaisesti, myöskään varjostavia puita juuri ole.

Opiston läheisyydessä sijaitsevat uimahalli ja jäähalli tarjoavat paikallisia mahdollisuuksia energian yhteishyödyntämiseen. Uimahallia käytetään ympäri vuoden, jolloin opistolla kesäaikaan syntyvä ylimäärälämpö voitaisiin ajaa uimahallin käyttöön. Jäähalli vaatii jäähdytystehoa ja sen yhteyteen voitaisiin suunnitella kaukojäähdytystä esimerkiksi vesistölämpöratkaisulla erillisen lämmönvaihtimen avulla. Haasteena energian yhteishyödyntämisessä on kuitenkin eri omistajatahojen intressit. Kaupungin omistamat kunta ja jäähalli käyttävät kaupungin omistaman energiayhtiön energiaa, ja motiivit liittyä esimerkiksi uuteen energianhankinnan ympärille muodostettavaan osuuskuntaan Kymenlaakson opiston kanssa jäävät selvitetäviksi.

Rakennuksen ja alueen asettamien reunaehtojen lisäksi lämmitysjärjestelmien valintaan vaikuttavat oleellisesti taloudelliset seikat, sekä joissain määrin ympäristöhyödyt. Kettusen työssä on arvioitu näitä näkökohtia yksinkertaisin laskelmin, samankaltaisin keinoin, joita yksittäinen asukas tai rakennuttaja käyttänee hyväkseen. Taloudellinen arviointi on tehty tarjouspyyntöjen ja takaisinmaksuaikojen perusteella. Näitä tuloksia ei kuitenkaan tässä esitellä, koska ei ole mielekää yleistää yhden kohteen tarjouspyyntöihin perustuvia kannattavuuslaskelmia.

Ympäristöhyötyjä on arvioitu laskemalla energian käytön aikaiset hiilidioksidipäästöt ja verrattu niitä nykyiseen kaukolämmön ja ostosähkön käytön aiheuttamiin hiilidioksidipäästöihin. Laskennassa on oletettu, että uusiutuvilla lähteillä tuotettu sähkö ja lämpö ovat nollapäästöisiä ja tuotettu osuus vähentää kaukolämmön ja ostosähkön kulutusta ja samalla niiden aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä. Hiilidioksidipäästölaskennan tulokset on esitetty kuvassa 5.9.



Kuva 5.9. Vaihtoehtoisten järjestelmien käytönaikaiset hiilidioksidipäästöt vuoden 2015 sähkön ja lämmön kulutusarvoilla (Kettunen 2016)

Tuloksista nähdään, että suurimmat CO₂-päästövähennykset kaukolämpöön ja ostosähkөөn verrattuna saavutettaisiin maalämpöön perustuvilla hybridijärjestelmillä. Maalämpö on kuitenkin investointina aurinkojärjestelmiä kalliimpi, joten maalämmöllä saavutetun päästövähennyksen hinta on paljon kalliimpi kuin päästövähennyksen hinta aurinkoenergialla tuotettuna. Maalämmön avulla toteutetun päästövähennyksen hinta on 10 vuoden tarkasteluajanjaksolta 530 €/t_{CO2}, kun vastaavasti aurinkosähköllä päästövähennyksen hinta on 220 €/t_{CO2}. Maalämmön avulla saavutettavan päästövähennyksen hinta on kalliimpi johtuen maalämpöön tarvittavan alkuinvestoinnin kalleudesta verrattuna aurinkosähkөөn. Aurinkosähkөөn päästövähennyksen laskennassa ei ole otettu huomioon mahdollista energiatukea. Mikäli tämä huomioitaisiin, aurinkosähkөөn avulla saavutettava päästövähennyksen hinta olisi vielä edullisempi.

Edellä esitetyt tulokset ovat kuitenkin suuntaa-antavia. On huomioitava, että uusiutuvaan energiaan perustuvat järjestelmät eivät ole täysin nollapäästöisiä, vaan niiden raaka-aineiden, osien ja järjestelmien valmistuksessa, asentamisessa ja huollossa sekä käytöstä poistossa aiheutuu kasvihuonekaasupäästöjä. Siksi onkin suositeltavaa vertailla järjestelmien elinkaaren aikaisia ympäristövaikutuksia elinkaariarvioinnin keinoin.

Johtopäätökset

Maalämpöjärjestelmä osoittautui Kymenlaakson opistolle taloudellisesti kannattavimmaksi järjestelmäksi ja aurinkoenergian kanssa se on myöskin varteenotettava vaihtoehto hiilidioksidipäästöjen vähentämisen kannalta. Opiston tontti soveltuu kallioperältään erinomaisesti maalämmön keräämiseen mutta tontin ja rakennuksen ahtaus tuottaa haasteita järjestelmän asentamiselle.

5.3 Yhteenveto case-tutkimustuloksista

Tässä työssä on esitelty kolme hajautetun ja uusiutuvan energian case-tutkimusta painottaen elinkaarinäkökulmaa ja arvioiden vaihtoehtoisten järjestelmien elinkaarikustannuksia asiakkaan näkökulmasta sekä ilmastovaikutuksia. Kotimaisella, hajautetulla energiantuotannolla on positiivisia aluetaloudellisia vaikutuksia ja uusiutuvan energian käyttöä tarvitaan vähentämään rakennetun ympäristön kasvihuonekaasupäästöjä. Paikallisia lämmitys- ja sähköntuotantotapoja valitessa on kuitenkin huomioitava teknologian ja toimintaympäristön vaikutus lopputulemaan. Merkittävimpiä teknologiaan liittyviä huomioonotettavia seikkoja ovat saavutettavissa oleva absoluuttinen päästövähennys, päästövähennyskustannus ja uusiutuvan energian rinnalla käytettävä energiaratkaisu kulutushuippujen aikana. Toimintaympäristössä taas ratkaisevia seikkoja ovat uusiutuvan hajautetun energian sovelluskohteiden ikä ja laatu, muutokset alueen energiantarpeessa, alueella korvattava energianlähde ja uuden järjestelmän soveltuvuus olemassa olevaan tekniseen järjestelmään niin alueella kuin rakennuksessakin. Seuraavassa käydään näitä seikkoja läpi case-kohtaisesti.

Ensimmäisessä casessa tarkasteltiin saneerauskohteen ja uudisrakennuksen lämmitysjärjestelmän elinkaarikustannuksia. Casen osalta on huomioitava, että rakennuksen lämpöenergian määrä on ratkaiseva tekijä, kannattaako investoida suhteelliseen kalliiseen hybridilämpöpumppujärjestelmään. Kun lämpöenergian tarve on pieni, lämpöpumppujärjestelmällä saavutettava säästö energiakustannuksissa ei välttämättä kata korkeaa investointikustannusta. Suhteellisen paljon lämmitysenergiaa vaativissa kohteissa hybridilämpöpumppujärjestelmät ovat kilpailukykyisiä verrattuna kaukolämpöön. Tarkastelussa on huomioitava, että elinkaari-laskennan tulokset ovat herkkiä lähtöarvojen muutoksille. Etenkin sähkön ja kaukolämmön hinnat ovat herkkiä muutoksille, ja ne samalla vaikuttavat paljon tarkastelun lopputuloksiin.

Toisessa casessa etsittiin elinkaarikustannuksiltaan ja ilmastonmuutospotentialtaan parasta ratkaisua Penttilänrannan uudisrakennusalueelle. Tarkastelussa otettiin keskiöön alueen tarjoamat lämmönlähteet. On tärkeää, että tämän kaltaisissa tarkasteluissa lähdetään liikkeelle paikallisista mahdollisuuksista, sillä lähtökohtaisesti niin voidaan luoda alueelle työpaikkoja ja hyödyntää alueen raaka-ainevaroja. Samanaikaisesti on kuitenkin huomioitava myös uhkakuvat. Uudisrakennusalueen tapauksessa niitä ovat hitaasti kasvava energian tarve alueella ja tästä johtuva energialaitosten mitoitusaste. Mahdollisesti tarvittavat väliaikaisratkaisut voivat aiheuttaa lähipäästöjä alueelle ja taas huippuenergian käyttö tuottaa perusenergian tuotantoon verrattuna paljon enemmän kasvihuonekaasupäästöjä.

Kolmannen casen avulla esiteltiin paikallisia reunaehtoja uusiutuvan ja hajautetun energian tuotantoon ja samalla tarkasteltiin ratkaisujen päästövähennysten kustannuksia. Hajautetun uusiutuvan energijärjestelmän valinta perustuu yleisimmin taloudellisen kannattavuuteen

perustuvaan valintaan, mutta alue ja rakennus asettavat tiettyjä reunaehtoja, joiden puitteissa valinta tehdään.

Kiinteistöjen omistajat painottavat lämmitysjärjestelmähankinnoissaan taloudellisia seikkoja ja tästä syystä vaihtoehtojen elinkaarikustannukset tulee määrittää. Järjestelmien muutostarpeen aiheutuessa kasvihuonekaasujen vähentämistarpeesta, myös saavutettavissa oleva päästövähennys tulee laskea. On myös tärkeää määrittää eri teknologioilla saavutettava päästövähennysten ominaiskustannus, jotta isossa kuvassa kasvihuonekaasujen vähentämisestä aiheutuva kustannus saadaan pidettyä kohtuullisena. Sen perusteella ei kuitenkaan tule teknologioita laittaa paremmuusjärjestykseen.

Tällä hetkellä suurimman päästövähennyspotentiaalin energiantuotantojärjestelmä saattaa olla kustannuksiltaan kallein. Se tekee päästövähennemän erittäin kalliiksi, eikä kannusta päästövähennyksiin järjestelmiä uusimalla. Toisaalta, on tarkasteltava aluetta ja sen energiajärjestelmiä kokonaissysteeminä ja huomioitava alueella sekä energian tarjonta että kysyntä. Voimme saada edullisia päästövähennyksiä esimerkiksi pelkästään aurinkoenergiaan perustuen, mutta on huomioitava suomalaisten olosuhteiden reunaehdot ja usein hybridiratkaisut tarjoavat joustavimman kokonaisratkaisun.

Kohteessa saavutettavissa oleva päästövähennys määräytyy ennen kaikkea korvattavissa olevan polttoaineen käytön vähentämisen seurauksena, mutta myös paikallisten ja alueellisten reunaehtojen kautta. Kuvattujen esimerkkien pohjalta voidaan osoittaa, että parasta ratkaisua tulee hakea tapauskohtaisesti ja erilaisista hybridiratkaisuista löytyy usein suurin potentiaali päästövähennyksiin. Investoinnin taloudellisen kannattavuuden ratkaisevat kuitenkin elinkaarikustannukset. Niihin vaikuttavat ratkaisevasti teknologioiden sovellettavuus toimintaympäristöissä ja suorituskyvyn määräävät tekijät kuten järjestelmien mitoitus. Tästä syystä mahdollisten taloudellisten tukitoimien ei tulisi perustua mihinkään tiettyyn teknologiaan vaan saavutettaviin päästövähennyksiin. Ehdotammekin, että elinkaarikustannus- ja ilmastonmuutostarkastelua tehdessä on hyvä huomioida taulukon 1 mukaisesti seuraavat, oleellisesti tarkastelun tuloksiin vaikuttavat seikat järjestelmän koko elinkaaren ajalta. Taulukossa on jaoteltu nämä seikat myös energiajärjestelmältä odotettavan neljän pääkriteerin alle, joita ovat 1) suorituskyky, 2) sovelttavuus kohdealueelle, 3) sovelttavuus kohderakennukselle ja käyttäjille, ja 4) huollettavuus ja toimitusvarmuus.

Taulukko 5.1. Elinkaarikaarikustannuksiin (harmaa tausta) ja ilmastonmuutospotentiaaliin (valkoinen tausta) vaikuttavat tekijät hajautettua uusiutuvaa energiaa suunniteltaessa, asentaessa ja käytettäessä.

	Suorituskyky	Soveltuvuus kohdealueelle	Soveltuvuus kohderakennuksille ja käyttäjille	Huollettavuus ja toiminta varmuus
Suunnittelu ja investointi	sovelluskohteiden iän ja laadun vaikutus tehontarpeeseen	alueella jo tarjolla olevien energialähteiden energiapotentiaali ja/tai uusien laitosinvestointien tarve	rakennuksen ikä ja valmius uudelle energijärjestelmälle	tarve rinnakkaiselle energiantuotantojärjestelmälle ja huippuenergian tuotannolle
		saavutettavissa oleva energiantarjonta suhteessa syntyviin khk-päästöihin		rinnakkaisjärjestelmän ja huippuenergian tuotannon khk-päästöt
Asennus		olemassa olevan jakeluverkoston käyttömahdollisuus ja/tai muutostarpeiden laajuus	muutostarpeiden laajuus	varautuminen asennusvaiheen riskeihin
		rakentamisen aikaiset khk-päästöt		
Käyttö	järjestelmän ja mahdollisen rinnakkaisjärjestelmän käyttökustannukset toivotulla lämmön ja sähkön tuotantotasolla	väliaikaisratkaisut muuttuvalle energiantarpeelle	säästöt käyttämällä ilmaisenergiaa verrattuna fossiiliseen energiantuotantoon	järjestelmän kunnossapitokustannukset, vikaantumisväli, tekninen käyttöikä
	kulutusta vastaavat tuotannon khk-päästöt	väliaikaisratkaisujen aiheuttamat lähipäästöt	vältetyt khk-päästöt korvattuun energiantuotantoon nähden	varajärjestelmän aiheuttamat khk-päästöt, kylmäainevuotojen khk-päästöt

6. UUSIUTUVAN ENERGIAN INVESTOINTIEN TALOUDELLISET MAHDOLLISUUDET JA RAJOITTEET

Karoliina Auvinen, Aalto-yliopiston kauppakorkeakoulu
Johanna Pohjola, Suomen ympäristökeskus

6.1 Johdanto: Kannattaako öljyä ja hiiltä korvata uusiutuvalla energialla Suomessa?

Aalto-yliopiston kauppakorkeakoulun ja Suomen ympäristökeskuksen toteuttamassa Hajautetun energian mahdollisuudet ja rajoitteet –hankkeen osaselvityksessä tutkittiin asiakaslähtöisestä näkökulmasta, onko Suomessa taloudellisesti kannattavaa korvata öljyä ja kivihiiltä uusiutuvalla energialla energiayhtiöissä, kunnissa ja kotitalouksissa. Uusiutuvan energian investointien kannattavuutta analysoitiin case-kannattavuuslaskelmien avulla, joissa lähtöarvoina käytettiin vuosien 2014-2015 keskimääräisiä polttoaineiden ja teknologioiden hintatietoja sekä asiakasryhmille tyypillisiä, keskimääräisiä investointikriteereitä. Korvausinvestointien kannattavuuslaskelmat ilmentävät suuntaa-antavasti, millaisia taloudellisia mahdollisuuksia tai haasteita eri asiakasryhmillä on uusiutuvien energiainvestointien tekemisessä.

Osaselvityksessä pyritään vastaamaan seuraaviin kysymyksiin: Kuinka paljon uusiutuva energia maksaa verrattuna fossiiliseen energiaan? Kannattaako hiilivoimaa tai öljylämmitystä korvata uusiutuvalla energialla energiayhtiöissä, kunnissa ja omakotitaloissa nykyisillä hintatasoilla ja ohjauskeinoilla?

6.2 Uusiutuvan energian hybridiratkaisut keskiössä hiilen ja öljyn korvaajana

Geotermisellä energialla, aurinkoenergialla, bio- ja hukkaenergialla sekä niiden yhdistelmillä voidaan korvata kiinteistökohtaista öljylämmitystä sekä kaukolämmössä hiiltä, turvetta ja öljyä. Yhdistämällä useampi energiantuotantotapa hybridituotannoksi muodostetaan paikallisiin tarpeisiin vahva energiantuotanto. Energiantuotantoa voidaan myös paikallisesti ketjuttaa siten, että toisen prosessin jäte-energia voi olla toisen prosessin energialähde. Näin voidaan saavuttaa primäärienergian tehokas hyötykäyttö. (Sipilä K., 2015)

Hajautettu paikallinen energiantuotanto parantaa kokonaishyötysuhdetta, koska pitkät polttoaineen kuljetusmatkat jäävät pois ja energiasiirtomatkat lyhenevät. Maa- tai poistoilmalämpöpumppu pienentää primäärienergian tarvetta ja lämpöpumpun sähkön tarvetta voidaan pienentää aurinkosähköllä. Aurinkolämmön tehokas hyödyntäminen edellyttää riittävän hyvän ja edullisen kausivaraston kehittämistä. Aurinkolämmöllä tuetun aluelämmitysjärjestelmän simuloinneilla on havaittu, että lyhytaikaista erillistä lämpövarastoa ei välttämättä tarvita, vaan paikallinen lämpöverkko pystyy hoitamaan sen tehtävän. (Sipilä K., 2015) Aurinkolämpö parantaa lämpöpumpun käyttöikää sekä hyötysuhdetta kuvaavaa COP (Coefficient Of Perfor-

mance) -lukua, joka kertoo, kuinka tehokkaasti kulutettu sähköenergia saadaan muutettua lämpöenergiaksi. Aurinkolämmön ja lämpövarastojen avulla voidaan vähentää myös biokattiloiden huollon tarvetta, kun kattiloita ei tarvitse pitää käynnissä parhaimmillaan puoleen vuoteen. (Auvinen K., 2015).

Paikallinen tuotanto lisää liiketoimintamahdollisuuksia ja luo työpaikkoja, ja jätteestä tehty energia vähentää jätteen kuljetuskustannuksia. Paikallinen hajautettu energiantuotanto parantaa energiaturvallisuutta ja vähentää tuontienergian tarvetta. (Sipilä K., 2015)

Fossiilisten polttoaineiden korvaaminen hajautetulla uusiutuvalla energialla kauko- ja aluelämpöverkoissa

Perinteisesti kaukolämpöverkkoa käytetään keskitettyjen suurten lämmöntuotantolaitosten lämmönjakeluun lämmönkuluttajille. Hajautettu lämmöntuotanto ja kaukolämpö nähdään helposti vaihtoehtoisina tapoina tuottaa lämpöä. Kuitenkin hajautettu lämmöntuotanto voi toimia osana kaukolämpöjärjestelmää. Tällöin voidaan hyödyntää kaukolämpöverkon ja hajautetun lämmöntuotannon hyviä puolia.

Kaukolämmön tuotannossa on otettu käyttöön useita uusia tuotantomenetelmiä ja polttoaineita ympäristövaikutusten vähentämiseksi ja energiatehokkuuden parantamiseksi. Näköpiirissä on myös, että kiinteistöjen lämmitystarve tulee pienentymään ja jäähdytystarve kasvamaan energiatehokkaan rakentamisen myötä. Tähän muutokseen pystytään vastaamaan kevyt-kaukolämpöverkon ja kaukokylmän avulla. Kaukolämmön tuotannossa on otettu usealla paikakunnalla käyttöön lämpöpumppuja. Lämpöpumpuilla voidaan hyödyntää hukkalämpöä erilaisista lähteistä kuten jätevesistä, teollisuudesta, konesalien ja muiden kiinteistöjen jäähdytyksen lauhdelämmöstä tai kaukojäähdytyksestä. Lämpöpumput ja hukkalämmön hyödyntäminen parantavat energiatehokkuutta. (Motiva, 2016)

Kivihiiltä käytetään useissa suurissa yhteistuotantolaitoksissa. Suomen rannikkokaupungeissa on vielä lukuisia hiilivoimaloita toiminnassa (Hiilitieto ry, 2016). Kaukolämmön ja siihen liittyvän sähköntuotannon polttoaineista (yht. 52,4 TWh) vuonna 2015 kivihiilen osuus oli 21,2%, turpeen osuus 15,5%, öljyn osuus 2,1% ja maakaasun osuus 20,2% (Energiateollisuus ry, 2016).

Kivihiilen korvaaminen uusiutuvalla energialla vaatii monipuolisia ratkaisuja. Helsingissä poltetaan puupellettiä pölypolttona kivihiilen seassa. Kivihiiltä voidaan korvata myös biohiilellä, joka valmistetaan puusta. (Motiva, 2016) Kivihiilestä luopuminen tarkoittaa myös uuteen teknologiaan ja hajautettuihin hybridiennergia ratkaisuihin siirtymistä. Hybridivoimaloissa eri teknologiat tukevat ja täydentävät toisiaan. Tanskassa hybridivoimaloita rakennetaan kauko- ja aluelämpöverkkoihin teollisessa mittakaavassa (Solar District Heating, 2016).

Lämpöverkko tukee hajautettuun lämmöntuotantoon perustuvaa järjestelmää. Lämpöverkko mahdollistaa lämmön tuottamisen siellä, missä on tilaa ja parhaat tuotanto-olosuhteet sekä lämpövarastojen alueellisen keskittämisen. Hajautetun lämmöntuotannon kehitys ei poista tarvetta lämpöverkolle, vaan päinvastoin. Lämpöverkko voi esimerkiksi edistää maalämpöinvestoinnin tehokkaampaa hyödyntämistä alueellisesti. (Koikkalainen A., 2015)



Kuva 6.1. Marstalin hybridivoimala Tanskassa. Marstalin hybridivoimalassa on 15000 m² aurinkolämpökeräimiä, 4 MW:n biovoimala yhdistettynä sähköä tuottavaan ORC-voimalaan, 1,5 MW:n lämpöpumppu sekä 75000 kuution lämpövarasto. (Solar District Heating, 2010)



Kuva 6.2. Aalto-yliopistokiinteistöt Oy:n Energiaomavarainen Otaniemi 2030 -projektissa tutkittiin lämpöverkon merkitystä hajautetun lämmöntuotannon kannalta. Tutkimuksessa verrattiin yhteensä 11,3 MW:n maalämpökaivojen käyttöä 29 tai vaihtoehtoisesti 10 rakennuksessa. Laskelman perusteella 10 rakennuksen järjestelmiä voitaisiin hyödyntää vuodessa 19000 MWh enemmän, mikäli kaikki rakennukset pystyisivät käyttämään niitä lämpöverkon välityksellä. (Koikkalainen A., 2015) Kuva: Aalto-yliopistokiinteistöt Oy.

Uusilla asuinalueilla, joissa rakennukset ovat hyvin energiatehokkaita, lämmön tarve on pieni. Tällaisille alueille perinteisen kaukolämpöverkon rakentaminen on suhteellisen kallista. Kevytkaukolämpöverkossa veden lämpötila on perinteistä verkkoa matalampi ja verkko voidaan rakentaa muoviputkista, mikä pienentää rakennuskustannuksia. Kevytkaukolämpöverkkoa kokeillaan muun muassa Helsingissä Honkasuolla. (Motiva, 2016) Lämpöverkon keskeisin ominaisuus hajautetun lämmöntuotannon kannalta on lämpötilataso. Aurinkolämmön ja maalämmön hyötysuhde ja rakennusten ja teollisuuden lämmönlähteiden hyödynnettävyys ovat sitä paremmat, mitä matalammassa lämpötilassa lämpö on tuotettava. (Koikkalainen A., 2015)

Esimerkki Tanskasta: Kaukolämpöyhtiöt korvaavat kivihiltä uusiutuvan energian hybridilämpölaitoksilla

Tanskassa hybridivoimaloita rakennetaan kauko- ja aluelämpöverkkoihin teollisessa mittakaavassa. Tanskassa kaukolämmön osuus lämpömarkkinoista on yli 63% (Euroheat and power, 2015). Tanskan kauko- ja aluelämpöverkkoihin rakennetaan vauhdilla uusiutuvan energian hybridilämpölaitoksia. Hybridivoimaloiden energialähteinä käytetään yleensä puuhaketta tai pellettejä, aurinkolämpöä, maalämpöä, lämpövarastoja sekä olemassa olevia kaasu- ja biokaasulaitoksia.

Tanskan kaukolämpöverkkoihin on nyt asennettu aurinkolämpökeräimiä yli miljoona neliometriä (Solar District Heating, 2016). Silkeborgiin rakennetaan maailman suurinta 110 MW:n aurinkeräinkenttää (State of Green, 2016), jonka koko on yli 150 000 neliometriä eli noin 23 jalkapallokenttää.



Kuva 6.3. Løgumklosterissa Tanskassa on yli 10 MW tai 15 000 neliötä suomalaisia aurinkolämpökeräimiä. (GSTEC Global Solar Thermal Energy Council, 2015) Kuva: Savo-Solar Oyj.

Hybridivoimalat ovat Tanskassa kilpailukykyisiä taitavan suunnittelun ansiosta

Tanskassa kaukolämpöyhtiö tekee tarkan strategian voimalan suunnitteluvaiheessa, milloin laitoksessa kannattaa käyttää mitään energialähdettä ja millä tavalla. Energialähteiden, läm-

pövaraston, asiakkaiden määrän ja lämmönkäyttöprofiilien keskinäinen optimointi on keskiössä, kun laitoksesta suunnitellaan mahdollisimman kustannustehokas. Onnistuneella optimoinnilla, mitoituksella ja älykkäällä ohjauksella hybridienergiailaitoksen lämmöntuotantokustannus saadaan hyvin kilpailukykyiseksi tasolle 25-50 eur/MWh 20 vuoden laskenta-ajalla. (Varjotie, 2016)

Tanskan hybridilämpölaitoksissa kaksi yleistä aurinkolämpökentän ja lämpövaraston mitoitus tapaa on tuottaa 20 tai 50-60 % vuotuisesta lämmitysenergiantarpeesta kaukolämpöverkossa. Kenttien koot ovat tällöin 1/3 – 11 jalkapallonkenttää ja vesivaraajat vastaavat noin 1-40 uima-allasta.

Tanskassa uusiutuvan energian investointeja edistetään polttoaineiden verotuksella ja tuilla

Tanskassa on asetettu kunnianhimoinen tavoite päästöjen vähentämiseksi. Tanskan tavoitteena on toimia 100 prosenttisesti uusiutuvalla energialla vuoteen 2050 mennessä ja lopettaa fossiilisten polttoaineiden käyttö sähkön- ja lämmöntuotannossa vuoteen 2035 mennessä (Nordic Energy Research, 2016). Tanskassa käytetään edelleen paljon kivihiiltä, joten tehtävää riittää. Haluttua muutosta on ohjattu polttoaineiden verotuksella: öljylle, hiilelle ja kaasulle on säädetty korkeampia veroja ja samalla kaukolämpöyhtiöt ovat saaneet myös tukia uusiutuviin energiamuotoihin siirtymiseksi. Esimerkiksi kivihiilen CO₂-vero on 217,8 DKK eli noin 29 euroa/tonni (Confédération Fiscale Européenne, 2016).

Tanskan tavoitteena on lisäksi kotimaisen vientiteollisuuden ja liiketoiminnan edistäminen (Invest in Denmark, 2016). Tanskassa halutaan toteuttaa hajautettua energiantuotantoa myös teollisessa mittakaavassa. Uusiutuvaan energiaan liittyvät verot ja tuet on kohdennettu niin, että niillä on autettu kotimaista teollisuutta kehittämään tuotantoa ja kasvamaan vientikykyisiksi. Myös muuta lainsäädäntöä on muokattu tältä pohjalta. (Varjotie J., 2016)

Fossiilisten polttoaineiden korvaaminen uusiutuvalla energialla rakennuksissa

Rakennuksissa käytetään lähes 40 prosenttia kaikesta Suomessa kulutettavasta energiasta ja ne aiheuttavat yli 30 prosenttia päästöistä. Valtaosa energiasta kuluu kiinteistöjen lämmitykseen. Rakennusten energiankäytön vähentämisellä ja uusiutuvalla energialla on merkittävä rooli ilmastonmuutoksen hillinnässä. Energia- ja ympäristötehokkuuden kannalta on tärkeää huomioida rakennuksen koko elinkaari, sillä valtaosa rakennetun ympäristön päästöistä syntyy kiinteistöjen käytön aikaisesta energiankulutuksesta. Rakennuksia lämmitetään, jäähdytetään ja niissä kuluu sähköä. (Vehviläinen et al., 2010)

Hybridilämmitys tarkoittaa useamman eri energialähteen hyödyntämistä lämmitykseen ja lämpimän käyttöveden tuottamiseen eri vuodenaikoina. Hybridijärjestelmässä pyritään käyttämään pääasiassa uusiutuvia energialähteitä ja tuottamaan lämpöä tehokkaasti. Hybridijärjestelmä soveltuu niin yksittäisten kuin suurempien kiinteistöjen kuten koulujen, sairaaloiden ja muiden suurten kohteiden energiamuodoksi. Hybridijärjestelmän pääosia ovat:

- lämpöpumppu, joka hoitaa suurimman osan lämmityksestä ja viilennyksen kokonaan
- aurinkolämpökeräimet, jotka tuottavat kuumaa vettä sekä lämmintä vettä lämpöpumpulle paremman hyötysuhteen (COP-arvo) aikaansaamiseksi sekä
- poltin, jolla katetaan lämmitystarpeen piikit (Oilon Oy, 2015)

Kiinteistökohtainen lämpövoimala voidaan liittää kaukolämpöverkkoon esimerkiksi paluuvettä lämmittämään. Alueellinen matalalämpöverkko voidaan liittää lämmönsiirtimellä osaksi olemassa olevaa kaukolämpöverkkoa (Koikkalainen A, 2015).

HP4NZEB ”Lämpöpumppuratkaisut lähes nollaenergiarakentamisessa ” -hankkeessa selvitettiin asuintaloihin ja niiden korjausrakentamiseen liittyviä lähes nollaenergiarakentamisen ratkaisuja Suomessa. Lämpöpumppujen energiatehokkuutta sekä ratkaisujen kustannusvaikutuksia tutkittiin tyypillisessä uudispientalossa, uudiskerrostalossa sekä 1960-luvulla rakennetussa kerrostalossa. Tulosten mukaan rakennusten lähes nollaenergiataso oli saavutettavissa kustannustehokkaammin lämpöpumppuihin perustuvilla ratkaisuilla kuin kaukolämmöllä. Lisäksi tutkittiin aurinkokeräimien ja -paneelien lisäämisen vaikutuksia E-lukuun ja kustannuksiin. Aurinkoenergian todettiin alentavan E-lukua niin, ettei se nosta merkittävästi investointikustannuksia. (Green Net Finland, 2015)

Seuraavat kaksi esimerkkiä keskittyvät tarkastelemaan isompien kiinteistöjen hajautettuja energiaratkaisuja, joilla voidaan korvata lämmöntuotannossa ja osittain sähköntuotannossa fossiilisten polttoaineiden käyttöä.

Esimerkki Helsingistä: Sakarinmäen koulun hybridienergiaratkaisu

Helen Oy on rakentanut Sakarinmäen koulukeskukselle uusiutuvan energian lämmitysratkaisun, jonka muodostaa aurinkokeräinten, maalämpöjärjestelmän, öljykattilan ja lämpövarastojen kokonaisuus. (Helen Oy, 2016)



Kuva 6.4. Sakarinmäen hybridienergiavoimala. Kuva: Savosolar Oy

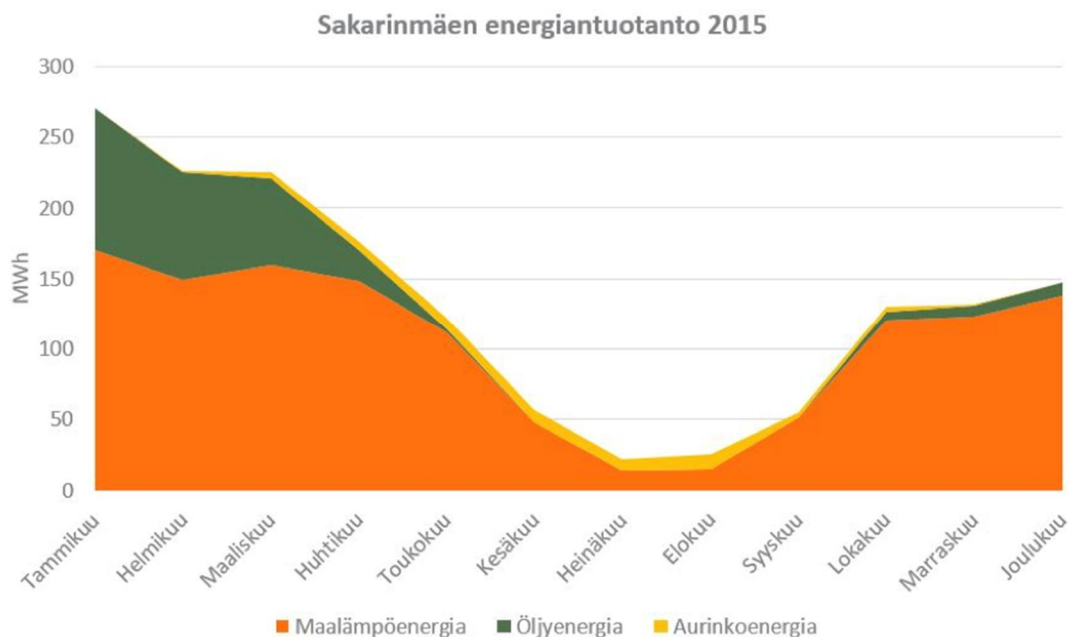
Sakarinmäen koulun energiajärjestelmän kuvaus:

- **Energian käyttäjä ja asennuspaikka:** Sakarinmäen koulukeskus, Östersundom, Helsinki. Koulun maksimi lämmitystehon tarve on 1200 kW.
- **Uusiutuvat energialähteet ja -teknologiat:** Aurinkolämpö, maalämpö, lämmön varastointi ja bioöljy. Lämpö siirretään kouluun vesikiertoisella lämmönjakojärjestelmällä.

- **Maalämpökaivot:** Maalämpökaivoista kerätään lämpöenergiaa maaperästä lämpöpumpuille. Maalämpökaivoja on 21 kappaletta ja ne on porattu 300 metrin syvyyteen. Kaivon sisällä olevassa putkistossa kiertää bioetanolia.
- **Lämpöpumput:** Lämpöpumppuja käytetään koulun lämmittämiseen. Asennettu Oilon Scancool P 300 -lämpöpumppu, 250 kW, COP 3,1 – 4 (Oilon, 2016). Pitoaika 20 vuotta. Hinta maalämpöjärjestelmien keskiarvokustannusten 900 eur/kW perusteella laskettuna yhteensä 225 000 euroa.
- **Aurinkolämpökeräimet:** Aurinkokeräimillä kerätään talteen auringon lämpöä koulun ja käyttöveden lämmittämistä varten. Aurinkokeräinten tuottama lämpö saadaan talteen kokonaisuudessaan, koska se ohjataan olosuhteiden mukaan suoraan lämmitysverkkoon, lämpöpumpulle tai maapiiriin. Aurinkolämpökeräimillä saadaan nostettua porakaivoilta lämpöpumpulle tulevan kiertonesteen lämpötilaa, mikä parantaa lämpöpumpun hyötysuhdetta (COP) merkittävästi. Aurinkokeräinten tuotantoteho on 150 kW. Yksi aurinkokeräin on 2 metriä korkea ja 5 metriä leveä. Keräimiä on 16, joiden pinta-ala on yhteensä 160 neliometriä. Aurinkokeräin- ja –varaajainvestointi yhteensä 189 000 euroa (Nissilä H., 2015). Pitoaika 30 vuotta. Aurinkolämpökeräininvestoinnin kotimaisuusaste 71%, koska keräimet ovat kotimaiset (Nissilä H., 2016).
- **Aurinkolämmön varastointi:** Kahdella lämminvesivaraajalla varastoidaan aurinkolämpöä. Kaksi 4 000 litran varaajaa. (Galkin-Aalto M., 2014)
- **Lämpökeskuksen polttimet:** Lämpökeskuksen polttimilla lämmitetään koulua silloin, kun maalämpö ja aurinkolämpö eivät riitä kattamaan kulutusta kaikkein kylmimpinä aikoina. Lämpökeskus tuottaa energiaa pääasiassa bioöljyllä. Lämpökeskuksen maksimiteho on 1500 kW, joten se on mitoitettu kattamaan koulun lämmitystarve kaikissa tilanteissa. Kahden Oilon-polttimen tehot ovat 500 kW ja 1000 kW.
- **Investoinnin toteuttaja:** Helen Oy
- **Laitetoimittajat:** Oilon Scancool Oy avaimet käteen –ratkaisuna, aurinkolämpökeräinten valmistaja Savo-Solar Oyj.
- **Toteutusvuosi:** 2014

Järjestelmää suunniteltaessa Helen asetti tavoitteeksi saavuttaa 80 % uusiutuvan osuus aurinko- ja maalämpöenergialla. Tavoite saavutettiin ensimmäisenä käyttövuotena 2015, jolloin maalämmön osuus oli 79 % ja aurinkolämmön osuus noin 3 %.

Lämpökeskuksen kahdessa öljykattilassa on kokeiltu bioöljyn polttoa onnistuneesti. Siten alkuvuonna 2016 poltetusta öljystä pääosa on ollut bioöljyä, mikä edelleen kasvattaa uusiutuvan osuutta noin 90 prosenttiin.



Kuva 6.5. Sakarimäen energiantuotanto 2015. Kuva: Helen Oy, 2015

Sakarimäen uusiutuvan energian demokohde on ollut Helenille oppimisprosessi siitä, miten paikallisesti eri tuotantomuotoja hyödynnetään yhdessä. Järjestelmän käyttäjien on tärkeä ymmärtää eri tuotantomuodoista koostuvaa järjestelmää kokonaisuutena, jotta se saadaan toimimaan energiankulutuksen ja ympäristön kannalta tehokkaasti. Sakarimäen koulussa lämmöntuotanto on myös osa opetusta. Koululaiset ovat muun muassa tutustuneet eri lämmitysmuotojen periaatteisiin fysiikantunnilla, opetelleet käsittelemään ja tulkitsemaan tilastotietoa koulun energiadatan avulla ja käyttäneet dataa taulukkolaskennan opettelussa tietotekniikan tunneilla. (Aaltonen J., 2016)

Esimerkki Porista: Tuotanto- ja toimistokiinteistö lämpenee lämpöpumppu- ja aurinkosähköhybridillä

Kiinteistöosakeyhtiö Aurinkopajan tuotanto- ja toimistotiloissa lämpö tulee maasta aurinkosähkön avulla. Maalämmön ja aurinkoenergian yhdistäminen huomioitiin jo kiinteistön suunnitteluvaiheessa.

Kolmikerroksisen rakennuksen tasakatto laskee etelän suuntaan ja lape on asennettu täyteen aurinkopaneeleja. Korkealla ja avaralla asennuspaikalla vältetään aurinkopaneelien huipputehoa haittaavat varjostukset. Kiinteistössä on normaalia massiivisemmat rakenteet ja paksut välipohjat, jotka varaavat lämpöä. Päivällä auringon paistaessa tuotettua lämpöä voidaan näin varata yön ja jopa seuraavan päivän lämmitystarpeeseen. Paneelit toimivat tehokkaammin, kun ilma pääsee virtaamaan vapaasti niiden välissä ja viilentämään niitä. (Vatajankoski, 2016)



Kuva 6.6. Aurinkopajan kiinteistörakennus. Kuva: Haaslahti Mikko

KOy Aurinkopajan energiajärjestelmän kuvaus:

- **Energian käyttäjä ja asennuspaikka:** Kiinteistöosakeyhtiö Aurinkopajan toimisto- ja tuotantokiinteistö Porin kaupungin Tiiliruukin kaupunginosassa teollisuusalueella. 1500 neliön kiinteistö, jossa vesikiertoinen lattialämmitys. Kiinteistöyhtiön sähkönkulutus on vuositasolla noin 150 MWh, josta lämmityksen ja lämpimän käyttöveden osuus on noin 40 MWh. (Tahkokorpi M., 2014)
- **Uusiutuvat energialähteet:** Aurinkosähkö ja maalämpö
- **Lämpöpumput ja –kaivot:** Kiinteistö ja sen käyttövesi lämmitetään lämpöpumpulla, joihin lämpöenergiaa kerätään energiakaivoista. Maalämpöpumpun teho on 60 kW ja COP noin 3,5. Maalämpöpumppujen hankintahinta keskimääräisen hintojen 900 - 1000 eur/kW (Hirvonen J., 2015) perusteella on noin 54 000 – 60 000 euroa (alv 0%).
- **Aurinkosähkövoimala:** Aurinkosähköjärjestelmä on mitoitettu vastaamaan maalämpöjärjestelmän vaatimaa sähkön vuosikulutusta. 200 paneelin aurinkosähkövoimalan huipputeho on 49,5 kWp ja pitoaika 30 vuotta. Paneeleilla on 25 vuoden 80 % nimellistuottotakuu. Hankintakustannus 80 000 € (alv 0%). Aurinkovoimalan ensimmäisen vuoden tuotto oli lähes 40 MWh ja tuotto noin 800 kWh/kWp. Aurinkosähköinvestoinnin kotimaisuusaste oli 62 %, koska paneelit olivat kotimaiset (Nissilä H., 2015).
- **Investoinnin toteuttaja:** KOy Aurinkopaja rakennutti voimalan itse
- **Toteutusvuosi:** 2014
- **Laitetoimittajat:** Aurinkosähköpaneelien valmistaja ja toimittaja Valoe. Inverterit ja ketjuohjaimet toimitti Fronius. Maalämpöjärjestelmän toimittaja ei selvinnyt lähteistä.
- **Investoinnin kannattavuus:** Aurinkosähköinvestoinnin sisäinen korkokanta (IRR) 6,2 % ja nettonykyarvo (NPV) 41 970 euroa 25 vuoden laskenta-ajalla sekä takaisinmaksuaika 13 vuotta. Aurinkosähkön omakustannustuotantohinta 5 snt/kWh 30 vuoden pitoajalla. Laskennan lähtötietoja ja oletuksia: TEM:n 30 %:n energiatuki aurinkosähköjärjestelmälle v. 2014, rahoituskulut 0 % (voimala toteutettiin omalla pää-

omalla), laskentakorko 1%, ostosähkön arvioitu keskiarvohinta 30 vuoden aikana 12 snt/kWh, voimalan tuotto 900 kWh/kWp paneelien toimittajan mukaan. (Tahkokorpi M., 2014)

6.3 Energiayhtiöiden, kuntien ja kotitalouksien investointikriteerit ja investointiympäristöt

Investointikriteerit

Uusiutuvaan energiaan investointeja tekeviä tahoja ovat tyypillisesti asukkaat, kaupalliset kiinteistönomistajat, maatilat, kunnat sekä energiayhtiöt. Jokaisella ryhmällä on erilaiset investointikriteerit, hallinnollinen toimintaympäristö ja rahoituskustannukset.

Fossiilisten energialähteiden korvaaminen uusiutuvalla energialla edellyttää käytännössä sitä, että investointien tulee olla taloudellisesti kannattavia investointien tekijöille sekä liiketoiminnan kannattavaa ratkaisuja tarjoaville yrityksille. **Investoinnin taloudellinen kannattavuus edellyttää aina sitä, että fossiilisten polttoaineiden käyttö on suhteellisesti kalliimpaa verrattuna uusiutuvaan energiaan.**

Toimijoiden investointikriteerien eroista voidaan nähdä, että investointien kiinnostavuus vaihtelee merkittävästi toimijoiden erilaisten ansaintamallien ja tavoitteiden mukaan (Taulukko 6.1.). Investointiympäristön tarkastelua monimutkaistaa lisäksi eri toimijoita koskevat erilaiset verotuskäytännöt (esim. alv) ja hallinnolliset määräykset. Lisäksi teknologioiden soveltuvuuteen ja kustannuksiin vaikuttavat asiakasryhmittäin vaihtelevat energiankäyttöprofiilit, soveltuvien laitteistojen koko ja paikalliset ympäristöolosuhteet. Tästä johtuen **hajautetun energian edistämiseksi ei ole yksinkertaista reseptiä, vaan soveltuvia teknologioita, kannattavuutta ja uusiutuvan energian edistämiseksi tarvittavia toimenpiteitä on tarkasteltava käyttäjäryhmittäin.**

Tyypillisesti energiayhtiöt ovat Suomessa osakeyhtiöitä, joiden odotetaan maksavan omistajilleen osinkoa. Tästä johtuen energiayhtiöiden tuottovaatimus on yleensä varsin korkea ja laskenta-aika lyhyt verrattuna puhtaiden energiateknologioiden 20-30 vuoden pitoaikoihin. Suuri osa kaukolämpöyhtiöistä on kuntien omistuksessa yli 50 %:n osuudella, jolloin energiayhtiöiden on mahdollisuus saada edullista rahoitusta investointihankkeisiin. Kunnat ja muut osakkeenomistajat kuitenkin edellyttävät yhtiöiltä voittoa ja tuloja, mikä johtaa investoinneissa korkeisiin laskentakorkoihin.

Tanskassa kaukolämpöyhtiöt panostavat merkittävästi hajautettuun uusiutuvan energiaan. Tämä johtuu osittain siitä, että Tanskassa kuntien kaukolämpöyhtiöt ovat usein osuuskuntia, joiden tavoitteena on alentaa lämmön asiakashintoja pitemmällä tähtäimellä eikä tuottaa voittoa lyhyellä tähtäimellä. (Varjotie, 2016)

Kunnilla ja kotitalouksilla ei ole tyypillisesti energiainvestoinneille mitään prosentuaalista tuotto-odotusta, vaan investointien kannattavuutta mitataan takaisinmaksuajalla. Kunnat edellyttävät yleensä investoinneiltaan noin kahdeksan vuoden takaisinmaksuaikaa ja kotitaloudet kymmentä vuotta, vaikka teknologioiden pitoajat ovat tyypillisesti 20-30 vuotta.

Taulukko 6.1. Esimerkkejä toimijoiden investointikriteereistä (Auvinen K., 2015)

Toimija	Investointikriteerit
Asukkaat, kuten omakotitalojen ja asuntojen omistajat	<ul style="list-style-type: none"> • Tekninen toimintavarmuus ja riskittömyys • Taloudellinen kannattavuus <ul style="list-style-type: none"> ○ Investointi parantaa kiinteistön arvoa ○ Säästöt juoksevilla energiakuluissa ○ Takaisinmaksuaika mieluiten alle 10 vuotta (investoinnin tuottoa ei käytetä taloudellisuuden mittarina) • Hankinnan helppous ja ylläpidon vaivattomuus • Ympäristöarvot
Kunnat	<ul style="list-style-type: none"> • Tekninen toimintavarmuus ja riskittömyys • Tarvittava hankintaosaaminen ja –resurssit olemassa • Taloudellinen kannattavuus: takaisinmaksuaika mieluiten alle 8 vuotta • Ilmastotavoitteet ja -sitoumukset
Kaupalliset kiinteistön-omistajat	<ul style="list-style-type: none"> • Tekninen toimintavarmuus ja riskittömyys • Taloudellinen kannattavuus <ul style="list-style-type: none"> ○ Investointi parantaa kiinteistön arvoa ja vuokrattavuutta ○ Kiinteistön huoltokulut alenevat ○ Investoinnin tuottovaatimus 5-8% • Vaikutus kiinteistön käyttömukavuuteen • Brändihyödyt • Ympäristösertifikaatit (mm. LEED, BREEAM)
Osuuskunnat	<ul style="list-style-type: none"> • Tekninen toimintavarmuus ja riskittömyys, ylläpidon vaivattomuus • Taloudellinen kannattavuus: mahdollisimman alhainen energiakustannus osuuskunnan jäsenille (vrt. Mankala-yhtiöt) • Osuuskunnan jäsenten tarpeet ja arvot
Energiayhtiöt (osa-keyhtiöt)	<ul style="list-style-type: none"> • Taloudellinen kannattavuus ja omistajien tuottovaatimukset: Yrityksissä on tyypillisesti investointien laskenta-aika 2-15 vuotta ja laskentakorko yli 10%. Kunnallisten kaukolämpöyhtiöiden investoinnin tuottovaatimus on yleensä yli 7%, jotta kuntaomistajille voidaan maksaa osinkoa.
Alan laitetoimittajat ja palveluyritykset	<ul style="list-style-type: none"> • Ratkaisuille on kysyntää kotimarkkinoilla ja myös vientimarkkinoilla • Liiketoiminta on skaalautuvaa ja/tai kasvupotentiaali on merkittävä • Liiketoiminta on kannattavaa: laitetoimittajien myyntikate 10-30% ja palveluntarjoajien kate vähintään 100% (palvelumyynnistä saatavan katteen tulee kattaa palvelun tarjoamisesta aiheutuvat kulut)
Valtio	<ul style="list-style-type: none"> • Ilmastopäästöjen vähentäminen mahdollisimman alhaisella päästövähennyskustannuksella • Elinkeinoelämän kilpailukyyn ylläpitäminen • Työllisyysvaikutukset

Kuntien ja kotitalouksien etu on, että molemmilla ryhmillä on mahdollisuus saada investointeihin hyvin edullista rahoitusta: kunnat voivat saada alhaisen koron rahoitusta Kuntarahoituksesta ja kotitaloudet voivat saada energiaremontteja varten edullista asuntolainaa pankeista. Rahoituskustannuksen vaikutus uusiutuvan energian tuotantohintaan ja kilpailukykyyn on erittäin suuri.

Taloudelliset ohjaukeinit

Jokaisella asiakasryhmällä on tyypillisesti erilainen hallinnollinen säännös-, tuki- ja verotusympäristö, joka vaikuttaa investointien kannattavuuteen (Taulukko 6.2.).

Kotitalouksien osalta uusiutuvaan energiaan siirtymisen kustannusta alentaa kotitalousvähennys. Vähennys myönnetään investoinnin työkuluista, joita ovat esimerkiksi asennuksen kustannukset. Kotitalousvähennys on 50% vähennykseen oikeuttavista kuluista ja maksimsumma on 2400 euroa henkilöä kohden vuonna 2017 toteutuneista kuluista. FinSolarin esimerkkitapauksissa kotitalousvähennys kattoi n. 15 % ja aurinkolämpöinvestoinnissa 10 % kokonaiskustannuksista (FinSolar 2016). Asunto-osakeyhtiöiden uusiutuvan energian hankkeet ovat väliinputoajia, sillä niihin ei saa kotitalousvähennystä mutta ei myöskään energiaturkea. Investointipäätökseen vaikuttavat myös kilpailevien energialähteiden kustannukset, kuten polttoöljyn verot, kaukolämmön tuotannon polttoaineverot sekä päästökauppa. Sähkön osalta uusiutuvaan energiaan siirtymistä edesauttaa se, että sähkön pientuotannon omasta käytöstä ei tarvitse maksaa siirtomaksuja ja energiaveroja. Aurinkosähköstä onkin tullut Suomessa vuodesta 2014 alkaen taloudellisesti kannattavaa, jos aurinkosähköä hyödynnetään suoraan kiinteistön ja sen käyttäjien omaan kulutukseen (Auvinen ja Jalas 2015).

Energiayhtiölle energiaturki ja syöttötariffijärjestelmä ovat keskeiset uusiutuvan energian edistämisen tukimuodot. Energiaturkia myönnetään yritysten ja julkisten toimijoiden uusiutuvaan energiaan liittyville pienille investoinneille, esim. lämpökeskusten osalta tuki on rajattu korkeintaan 10 MW laitoksille. Suhteellisesti suurimmat tuet vuonna 2016 on myönnetty biokaasuhankkeille tuen ollessa 20-30 % investointikustannuksesta ja aurinkosähköinvestoinneille 25% investointikustannuksista. Aurinkolämmölle tuki on 20%, ja lämpöpumppuhankkeille 15 % vuonna 2016. Suhteellisesti vähiten tuetaan puupolttoaineita käyttäviä lämpökeskushankkeita, joille energiaturki on 10-15 %. Innovatiivisille investoinneille tuki on suurempi, enintään 40%. Esimerkiksi aurinkoenergia voi olla osana innovatiivista hanketta, mutta laskeaan yksinään tavanomaiseksi teknologiaksi.

Syöttötariffilla puolestaan on tuettu tuulivoimaan, metsähakkeeseen, biokaasuun ja puupolttoaineeseen perustuvaa sähkön tuotantoa. Tuulivoimalle, puupolttoaineille ja biokaasulle tuki määräytyy tavoitehinnan ja sähkön markkinahinnan erotuksena ja tuki myönnetään vain uusille voimalaitoksille edellyttäen, että ne eivät ole saaneet investointitukea. Metsähakevoimaloissa tuki riippuu päästöoikeuden markkinahinnasta ja turpeen verosta ja sillä parannetaan metsähakkeen kilpailukykyä turpeeseen ja kivihiileen nähden olemassa olevissa voimaloissa. Pienissä voimaloissa sähkön osuus energian tuotannosta on alhainen, joten sähkön tuotannosta maksettavien tukien vaikutus jää vähäiseksi (Pesola ym. 2014), joskin lämmön tuotannosta hyötykäyttöön maksetaan myös lämpöpreemiota. Esimerkiksi Pöyryn laatimassa Kivaniemen bioselvityksessä investointituki oli selvästi syöttötariffia kannattavampi (Laukkanen ja Korhonen 2012). Vain yksi puupolttoainevoimala onkin toistaiseksi liittynyt syöttötariffijärjestelmään (<https://www.energiavirasto.fi/tilastoja-ja-paatoksia>). Energia- ja ilmastostrategiasa linjataan, että tuulivoiman syöttötariffijärjestelmästä luovutaan ja ylimenokaudeksi markkinaehtoiseen toteutumiseen siirryttäessä esitetään teknologianeutraaliin tarjouskilpailuun perustuvaa tukijärjestelmää (Valtioneuvosto 2016). Tämä tarkoittaa muutoksia myös bioenergian tukemiseen. Metsätalouden tuista nuoren metsän hoidon yhteydessä kerätyn pienpuun tuki parantaa puun energiakäytön kannattavuutta.

Päästökauppaan kuuluvissa isoissa voimalaitoksissa päästökauppa parantaa uusiutuvien polttoaineiden kannattavuutta. Päästökauppa vaikuttaa myös hajautettujen aurinko- ja lämpöpumppujärjestelmien kannattavuuteen keskitettyyn fossiiliseen tuotantoon verrattuna. Fossiililla polttoaineilla tuotetun lämmön kannattavuutta uusiutuvaan energiaan verrattuna heikentävät myös polttoaineverot.

Kuntien kiinteistöt ja yhteisöt voivat myös hakea energiatukea uusiutuvan energian investointeihin. Tukiprosentit eri energiamuodoille ovat samat kuin energiayhtiöille. Uusiutuvan hajautetun energian kannattavuuteen vaikuttavat ostosähkön ja kaukolämmön osalta päästökauppa ja lämmön tuotannon polttoaineverot sekä polttoöljyn osalta polttoaineverot. Kuntien kiinteistöjen uusiutuvan energian tukia rajoittaa se, että energiatukea ei myönnetä lämmön tuotantohankkeille, jos hankkeen seurauksena siirrytään kaukolämmöstä erilliseen lämmön tuotantoon, eikä uudisrakennuskohteiden lämpöpumppuhankkeisiin.

Taulukko 6.2. Uusiutuvan energian investointeihin vaikuttavat suorat ja epäsuorat taloudelliset ohjaukeinit toimijoittain ja energialähteittäin. Epäsuorat ohjaukeinit on merkitty kursivilla.

	Maalämpöjärjestelmät	Aurinkolämpöjärjestelmät	Bioenergiakattilat ja -tulisijat	Aurinkosähköjärjestelmät
Kotitaloudet	Kotitalousvähennys <i>Polttoaineverot</i> <i>Päästökauppa</i>	Kotitalousvähennys <i>Polttoaineverot</i> <i>Päästökauppa</i>	Kotitalousvähennys <i>Polttoaineverot</i> <i>Päästökauppa</i>	Kotitalousvähennys Vapautus siirtomaksuista ja sähköveroista oman kulutuksen osalta <i>Polttoaineverot</i> <i>Päästökauppa</i>
Kuntien kiinteistöt	Energiatuki 15% ^{a),b)} <i>Polttoaineverot</i> <i>Päästökauppa</i>	Energiatuki 20% ^{a)} <i>Polttoaineverot</i> <i>Päästökauppa</i>	Energiatuki 10-30% ^{c)/} Syöttötariffijärjestelmä <i>Polttoaineverot</i> <i>Päästökauppa</i>	Energiatuki 25% Ei siirtomaksuja ja sähköveroja oman kulutuksen osalta <i>Polttoaineverot</i> <i>Päästökauppa</i>
Energiayhtiöt	Energiatuki 15% ^{c)} Mahdollinen kärkihanketuki <i>Päästökauppa</i> <i>Polttoaineverot</i>	Energiatuki 20% Mahdollinen kärkihanketuki <i>Päästökauppa</i> <i>Polttoaineverot</i>	Energiatuki 10-30% ^{c)/} Syöttötariffijärjestelmä Mahdollinen kärkihanketuki Metsätalouden tuet <i>Päästökauppa</i> <i>Polttoaineverot</i>	Energiatuki 25% Ei siirtomaksuja ja sähköveroja oman kulutuksen osalta 800 MWh vuosituotantoon asti <i>Päästökauppa</i> <i>Polttoaineverot</i>

a) Tukea ei myönnetä lämmöntuotantohankkeille, jos hankkeen seurauksena siirrytään kaukolämmöstä erilliseen lämmöntuotantoon.

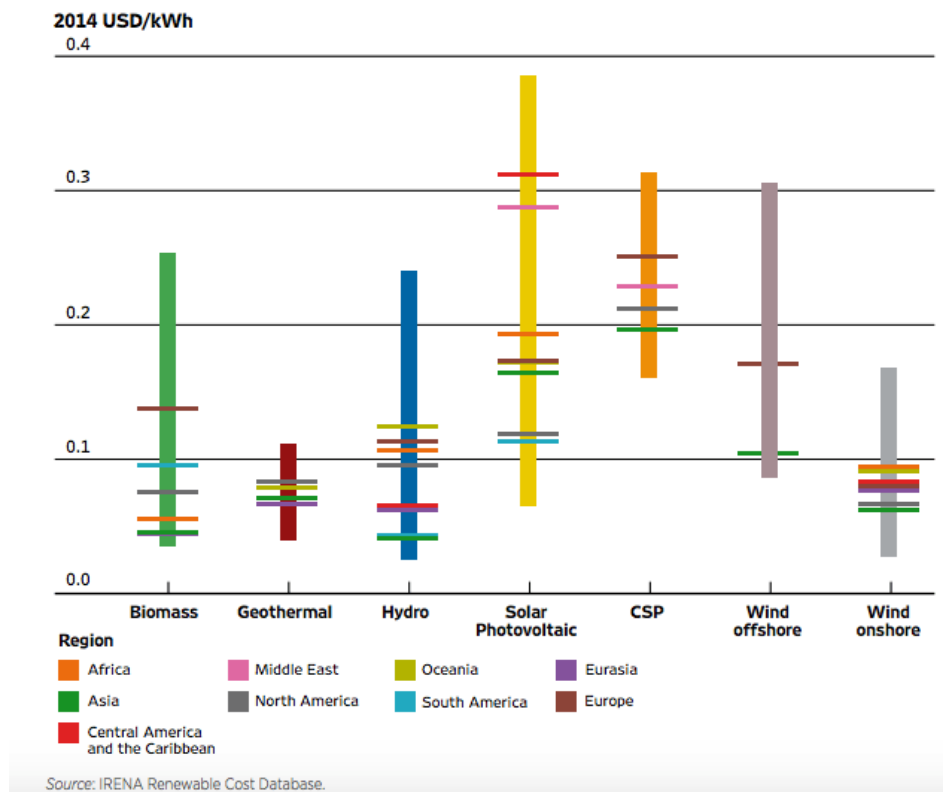
b) Tukea ei myönnetä uudisrakennuskohteissa tehtäviin lämpöpumppuhankkeisiin.

c) Tukea ei myönnetä lämpökeskuksille, joiden teho on yli 10 MW.

6.4 Investointien kannattavuuslaskelmien analysointimenetelmät ja lähtöarvot

LCOE (levelized cost of energy) -hinnan laskentamenetelmän avulla voidaan laskea eri energiantuotantomuodoille keskenään vertailukelpoisia tuotantohintoja (eur/MWh). Energialähteiden LCOE-hintaan vaikuttavat laitteiston hinta, pääomakustannukset, huolto- ja ylläpitokustannukset, polttoainekustannukset ja tuotetun energian määrä. Energiantuotantomuotojen LCOE-hintavertailuja julkaisevat esimerkiksi IEA, IRENA ja EU.

FIGURE 2.3: TYPICAL LEVELIZED COST OF ELECTRICITY RANGES AND REGIONAL WEIGHTED AVERAGES BY TECHNOLOGY, 2013/2014



Kuva 6.7. Uusiutuvan sähköntuotannon LCOE (levelized cost of energy) –vertailuhintaja USD/kWh 2013/2014. (IRENA, 2015)

Kansainväliset vertailut eivät ilmennä kovin hyvin maakohtaisia tuotantohintoja, koska kansalliset ja alueelliset tekijät vaikuttavat hintoihin merkittävästi. Uusiutuvien ja fossiilisten energialähteiden hinnat voivat vaihdella huomattavasti lainsäädännöllisten ja paikallisten olosuhteiden mukaan. Suomesta ei löydy vuosien 2014-2015 osalta julkisia vertailutietoja eri energiamuotojen asiakasryhmäkohtaisista tuotantohinnoista. Energiapoliittisten päätösten pohjaksi ajantasaisten vertailuhintojen seuraaminen olisi tärkeää. Esimerkiksi Yhdysvaltojen hallituksen Department of Energyn toimeksiannosta National Renewable Energy Laboratory tuottaa jatkuvasti päätöksentekijöille ajantasaista uusiutuvan energian markkinakehitys- ja hintatietoa.

Tässä selvityksessä kivihillen, öljyn ja ostoenergian käyttökustannuksia verrataan uusiutuvan energian tuotantohintoihin. Uusiutuvan energian ja fossiilisen energian hinnat eivät ole täysin vertailukelpoisia, koska hiilen ja öljyn hinnassa ei ole mukana laitteiden investointi- ja ylläpito-kustannuksia, vaan pelkkä polttoaineen käyttökustannus. Uusiutuvan energian hinnoissa on mukana laitekustannukset koko pitoajalta.

Tässä rajallisilla resursseilla laaditussa selvityksessä uusiutuvan energian tuotantohintojen laskennassa on käytetty yksinkertaistettua LCOE-kaavaa, jossa ei ole pääoma- ja huoltokustannukset mukana:

energian tuotantohinta €/MWh = (järjestelmäinvestointi eur - mahdollinen investointituki eur) / järjestelmän tuotto MWh/v * pitoaika v + polttoaine- ja/tai laitteiston ylläpitokulut eur/MWh

Uusiutuvan energian tuotantokustannukset on laskettu teknologioiden elinkaaren ajalta. Järjestelmissä on yleensä komponentteja, joita joudutaan uusimaan järjestelmän pitoaikana, joten nämä kustannukset on pyritty huomioimaan pitoajoissa tai uusiutuvan energian laitteistojen ylläpitokuluissa. Esimerkiksi omakotitaloissa lämmityslaitteistojen tyypillisiä elinaikaodotuksia ovat: pellettikattila 20-30 vuotta, kaukolämmönvaihdin 20-30 vuotta, maalämpöpumppu 15-30 vuotta ja öljylämmityskattila 20-30 vuotta (Motiva, 2015).

Kannattavuuslaskelmissa on käytetty seuraavia keskimääräisiä investointikriteereitä asiakasryhmäkohtaisesti:

- Kuntien omistamien **energiayhtiöiden** tyypillinen laskenta-aika 15 vuotta ja laskentakorko 10%, sisältäen tuottovaatimuksen noin 7 % ja rahoituskulut 3 %.
- **Kuntien** tyypillinen laskenta-aika (takaisinmaksuaikavaatimus) 8 vuotta ja laskentakorko 2% (rahoituskulut).
- **Kotitalouksien** tyypillinen laskenta-aika ja takaisinmaksuaikaaodote 10 vuotta sekä laskentakorko 2 % (rahoituskulut).

On kuitenkin huomattava, että todellisuudessa investointien laskenta-ajat ja tuottovaatimukset vaihtelevat organisaatiokohtaisesti.

Kannattavuutta tarkastellaan case-laskelmissa investoinnin nettonykyarvon, sisäisen korkokannan ja takaisinmaksuajan menetelmillä. Uusiutuvan energiainvestoinnin taloudellista hyötyä ja tuottoja tulisi tarkastella koko elinkaaren yli. Investointien kannattavuutta arvioidaan ensisijaisesti vertailemalla voimalan tuottaman energian hintaa sen käyttöiän aikana vaihtoehtoisen energialähteen kustannuksiin. Nettonykyarvo (net present value, NPV) on tulo- ja menovirtojen nykyarvojen erotus sekä sisäinen korkokanta (internal rate of return, IRR) kertoo, kuinka monen prosentin tuottoasteen investointi antaa pääomalle.

Takaisinmaksuaika ei sovi yksin energiainvestointien kannattavuuden arviointimenetelmäksi. Yksittäisenä investoinnin mittana takaisinmaksuaikamenetelmää voidaan pitää perusteltuna vain, jos investoinnin vanhenemisriski on huomattava. Takaisinmaksuaika ei anna oikeaa kuvaa investoinnin kannattavuudesta, koska se ei ota huomioon investoinnin pitoaikaa eikä jäännösarvoa (Vierros T, 2009). Energiateknologioiden käyttöiät ovat yleensä 15-30 vuotta.

Lähtötiedot, lähteet ja kannattavuuslaskelmat ovat katsottavissa ja ladattavissa excel-tiedostona avoimen datan periaatteella linkissä:

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1rnA7uHyA74x6yIPNIh7Bo1sim1bExpNBQ5HIUZCx fWQ/edit?usp=sharing>

6.5. Tulokset: korvausinvestointien taloudelliset mahdollisuudet ja rajoitteet

Kannattavuuslaskelmien tulokset kertovat suuntaa-antavasti, onko fossiilisen polttoaineiden korvaaminen uusiutuvalla energialla taloudellisesti kannattavaa. Laskelmat perustuvat keskiarvoisiin hintatietoihin vuosilta 2014-2015. Investointilaskelmien tulokset ilmentävät karkeasti, millaisia taloudellisia mahdollisuuksia tai haasteita eri asiakasryhmillä on uusiutuvien energiainvestointien tekemisessä.

Laskelmat eivät kuvaa yksittäisten investointitapausten todellista kannattavuutta, koska lähtöarvojen muutokset vaikuttavat tuloksiin merkittävästi. Todellisissa investointilaskelmissa huomioidaan myös mm. poistot, kokonaisvaltaiset ylläpito- ja huoltokulut, kiinteistöverot ja vakuutukset. Yksinkertaistettujen case-laskelmien tavoitteena on osoittaa, miten investointien kannattavuutta pääpiirteissään lasketaan ja miten ratkaisevasti keskeisimmät taloudelliset reunaehdot, kuten rahoituskustannukset, investointien tekijöiden tuottovaatimukset, ohjauskeinot ja laskenta-aika vaikuttavat investointien kannattavuuteen ja houkuttelevuuteen.

Korvausinvestointien kannattavuus ja taloudelliset haasteet energiayhtiöissä

Teollisten lämpöpumppujen, pellettivoimalan ja aurinkolämpökeräinten kannattavuutta tarkasteltiin suhteessa kivihiiilen käyttöön.

Taulukko 6.3. Kaukolämpöyhtiön vaihtoehtoiset energiakustannukset

	Polttoaineen hinta ja/tai käyttökulut, eur/MWh	Tuotantohinta eur/MWh, sis. laitein- vestointi ja mahd. tuet
Kivihiiilen hinta lämpövoimalassa, sis. päästöoikeuskustannus	39,4	Noin 50
Kivihiiilen hinta CHP-laitoksessa lämmöntuotannossa, sis. päästöoikeuskustannus	26,6	
Pellettivoimala, 115 MW, energiatuki 0%	40,6	42,6
Lämpöpumppulaitos, 90 MW, energiatuki 0%	27	35,1
Aurinkolämpöpuisto, 15 000 keräinliömetrin kenttä, energiatuki 20%	2	18,7

Tuotantohintojen vertailun perusteella uudisinvestoinneissa uusiutuva energia voi olla kilpailukykyinen vaihtoehto. Korvausinvestoinneissa kannattavuuden edellytys on kuitenkin, että

fossiilisten polttoaineiden käytön tulisi olla merkittävästi kalliimpaa verrattuna uusiutuvaan energiaan.

Alla on esimerkki kannattavuuslaskelmasta, jossa kivihiilen polttoa korvataan teollisilla lämpöpumpuilla.

Taulukko 6.4. Kannattavuuslaskelma, kun energiayhtiö korvaa kivihiiltä teollisilla lämpöpumpuilla kaukolämmön tuotannossa.

Tuotanto- ja hintatiedot		
Korvattava lämmöntuotanto vuodessa	420 000	MWh/v
<i>Vrt. Katri Valan lämpöpumppulaitoksen lämmön vuosituotanto</i>		
Kivihiilen ostohinta energiantuotannossa sis. päästökauppa	39	€/MWh
Keskimääräiset kulut vuodessa	16 380 000	€/v
Uusiutuvan energialähteen lähtötiedot: Teolliset lämpöpumput		
Polttoaineen hinta (sähkö)		
<i>Sähkön hinta v. 2015 teollisuusyrityksille 64 - 83 eur/MWh. Laskenta arvoilla 73 eur/MWh ja COP 2,7</i>	27	€/MWh
Lämpöpumppujärjestelmän pitoaika	20	vuotta
Investointituen osuus alkuinvestoinnista (<i>Energiatukea ei myönnetä yli 10 MW:n lämpökeskushankkeisiin.</i>)	0	%
Alkuinvestoinnin arvo		
<i>Oletetun lämpöpumppulaitoksen teho 90 MW ja maalämpöjärjestelmän hankintahinta teollisessa kokoluokassa keskimäärin noin 750 euroa/kW, alv 0%.</i>	67 500 000	€
Lämmön tuotantohinta lämpöpumpuilla	35	€/MWh
<i>Sis. ostosähkö ja laiteinvestointi</i>		
Investoinnin tekijän tiedot:		
Kunnan pääomistuksessa oleva kaukolämpöyhtiö		
Rahoituksen korkokulu, %	3	%
Investoinnin tuotto-odotus, %	7	%
Investoinnin laskentakorko (rahoituskulut + tuotto-odotus, %)	10	%
<i>Energiayhtiöiden tuotto-odotus on yleensä yli 10%</i>		
Investoinnin laskenta-aika	15	vuotta

Lähde:

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1rnA7uHyA74x6yIPNIh7Bo1sim1bExpNBQ5HIUZCxfWQ/edit?usp=sharing>

Energiainvestoinnin tuotto- ja talouslaskelmat:

Vuodet	Investoinnin kassavirta €v	Investoinnin sisäisiä korkokantoja % (IRR)	Investoinnin kumulatiivinen tuotto €v	Investoinnin nettohyötyarvoja (NPV) 10 %:n laskentakorkolla
0	-67 500 000 €		-67 500 000 €	-61 363 636 €
1	5 024 444 €	-92,6%	-62 475 556 €	-57 211 203 €
2	5 024 444 €	-68,7%	-57 451 111 €	-53 436 263 €
12	5 024 444 €	-1,7%	-7 206 667 €	-30 240 895 €
13	5 024 444 €	-0,5%	-2 182 222 €	-28 917 801 €
14	5 024 444 €	0,6%	2 842 222 €	-27 714 989 €
15	5 024 444 €	1,4%	7 866 667 €	-26 621 524 €
16	5 024 444 €	2,1%	12 891 111 €	-25 627 464 €
17	5 024 444 €	2,8%	17 915 556 €	-24 723 774 €
18	5 024 444 €	3,3%	22 940 000 €	-23 902 237 €
19	5 024 444 €	3,7%	27 964 444 €	-23 155 385 €
20	5 024 444 €	4,1%	32 988 889 €	-22 476 429 €

Tulokset:

Kannattavuus, kun laskenta-aika 15 vuotta ja laskentakorko 10%		
Investoinnin sisäinen korkokanta (IRR)	1,4	%
Investoinnin nettohyötyarvo (NPV)	-26,6 miljoonaa	€
Takaisinmaksuaika	yli 20	v
Kannattavuus lämpöpumppujärjestelmän 20 vuoden pitoajan/elinkaaren mukaan		
Investoinnin sisäinen korkokanta (IRR)	4,1	%
Investoinnin nettohyötyarvo (NPV)	-22,5 miljoonaa	€

Johtopäätös: Investointi ei ole kannattava, koska investoinnin nettohyötyarvo on negatiivinen sekä energiayhtiön tuotto-odotus 10 % suurempi kuin investoinnin sisäinen korkokanta. Kivihiilen pitäisi olla suhteellisesti kalliimpaa: investointi muuttuu kannattavaksi, jos kivihiilen hinta olisi 39 eur/MWh sijaan yli 48 eur/MWh.

Seuraavassa taulukoissa on yhteenveto case-kannattavuuslaskelmien tuloksista. Vaikka uusiutuvan energian tuotantohinnat ovat kivihiiltä edullisempia, ei korvausinvestoinnit ole silti kannattavia, kun laskelmiin sisällytetään yhtiön tuottovaatimukset.

Turpeen ja kivihiilen tulisi olla merkittävästi kalliimpia, jotta niiden korvaaminen biopolttoaineilla (biohiili, pelletti) tai muilla uusiutuvilla energiateknologioilla olisi kannattavaa joko keskitetysti tai hajautetusti.

Energiamuotojen hinnoissa tulisi näkyä myös niiden ulkoiskustannukset. Ulkoiskustannuksiin lasketaan mukaan mm. energialähteiden ympäristö- ja terveyshaitoista aiheutuvat kustannukset.

Taulukko 6.5. Korvausinvestointien kannattavuus energiayhtiön näkökulmasta, kun laskenta-aika 15 vuotta ja laskentakorko 10%

	Pellettivoimala	Lämpöpumppulaitos	Aurinkolämpö
Sisäinen korkokanta IRR (%)		1,4%	1,3%
Takaisinmaksuaika 10% laskentakorolla	yli 20 vuotta	yli 20 vuotta	yli 30 vuotta
Nettonykyarvo NPV (€)	-133 652 090	-26 621 524	-1 499 375
Investoinnin kannattavuus	Hiilen korvaaminen pellettivoimalalla ei ole kannattavaa.	Hiilen korvaaminen lämpöpumppulaitoksella ei ole kannattavaa.	Hiilen korvaaminen aurinkolämpöpöpuistolla ei ole kannattavaa.
Simulointi: Sisäinen korkokanta, kun mukana ilmastonmuutoksen ulkoiskustannukset ja kivihiilen hinta 100 €/MWh	147%	45%	18%

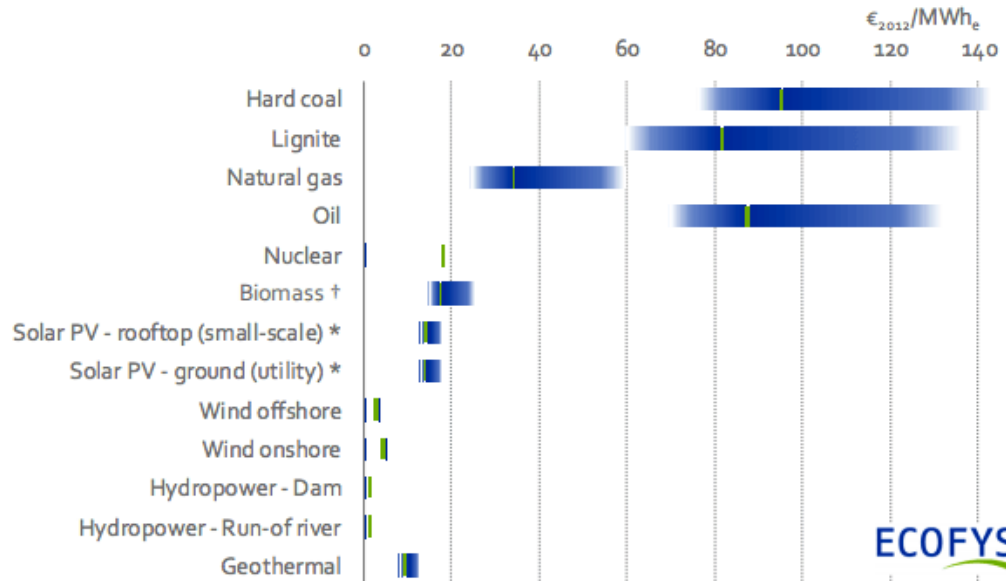


Figure 3-14: Total external costs of electricity technologies following from the sensitivity analysis of monetary values for climate change for (EU28 average) (in €2012/MWh_e). The blue bars indicate the range of external costs found in the sensitivity analysis; the green line indicates the results for the central assumption of 50 €2012/tCO_{2e}.

Kuva 6.8. Energialähteiden hintaerot eur/MWh, kun ilmastohaitat ovat kustannuksissa mukana. Kuva: Ecofys, 2014

Jos esimerkiksi kivihiihen hinnassa olisi ilmastonmuutoksen kustannukset mukana, sen hinta olisi 39 eur/MWh sijaan 80-140 euroa/MWh (Ecofys, 2014). Tällä hintatasolla uusiutuvan energian korvausinvestoinnit olisivat erittäin kannattavia.

Case Iso-Britannia: Hiilestä pyritään eroon kattavalla ohjauskeinopaketilla vuoteen 2025 mennessä

Iso-Britanniassa suunnitellaan hiilen käytön lopettamista energian tuotannossa vuoteen 2025 mennessä niin, ettei siitä aiheudu ongelmia maan energiaturvallisuudelle. Toimenpidettä perustellaan Pariisin ilmastopimuksella, Iso-Britannian ilmastolakiin (The Climate Change Act 2008) määritellyllä tavoitteella vähentää päästöjä vähintään 80% vuoteen 2050 mennessä vuoden 1990 tasosta sekä kapasiteetin vanhenemisella.

Vuonna 2015 kivihiihellä tuotettiin Iso-Britanniassa lähes neljännes maan sähköstä kahdeksassa ikääntyvässä voimalassa (keski-ikä 47 vuotta) ja hiilen osuus kokonaistuotantokapasiteetista oli 15%.

Olemassa olevassa ohjauskeinovalikoimassa hiilen käytön vähentämiseksi on mukana esimerkiksi kapasiteettimarkkinat sähkön saatavuuden varmistamiseksi ja päästökauppaa täydentävä hiilen käytön lisämaksu tai "lattiahinta" (Carbon Price Support CPS), joka on maksimissaan 18 puntaa/CO₂tonni (noin 21 euroa/CO₂t). Lisäksi valikoimassa ovat uusien investointien edistämiseksi syöttötariffit, uusiutuvan energian jakeluveto (Renewables Obligation) ja huutokaupattava tuki (Contracts for Difference CfDs), jossa tuottaja saa tukea tietyn rajahinnan alla ja yläpuolella maksaa tukea takaisin (Department for Business, Energy and Industrial Strategy, 2015).

Uusien hiilivoimainvestointien estämiseksi on asetettu voimaloille vuosittainen päästövähennysrajoitus (Emission Performance Standard EPS), jonka mukaan perusvoimaa tuottavien voimaloiden keskimääräiset päästöt eivät saa ylittää vuodessa tasoa 450 gCO₂/KWh. Tämän lisäksi uusilta voimaloilta edellytetään hiilen sidonnan ja varastoinnin demonstroimista vähintään 300 MW:n osuudelta. (Department for Business, Energy and Industrial Strategy, 2016)

Hallitus harkitsee parhaillaan vuoden 2016 lopulla lisätoimia hiilen käytön lopettamiseksi. Niitä ovat kapasiteettimarkkinan voimistaminen sekä voimaloiden päästörajan 450 gCO₂/KWh muuttaminen ympärivuotiseksi, jolloin hiilivoiman tuottaminen ei olisi enää mahdollista ilman erityistoimia. Tätä toimenpidettä harkitaan myös vanhoille voimaloille, mutta varauksellisesti, koska huolena on että päästörajoitus saattaisi pitää voimalat toiminnassa alle 40 %:n teholla jarruttaen uusia voimalainvestointeja. Toisena vaihtoehtona harkitaan hiilivoimaloiden toiminnalle takarajan säätämistä vuoteen 2025.

Hallituksen ohjauskeinoehdotusten tavoitteena on lisätä markkinatoimijoille varmuutta investoida uuteen kapasiteettiin ennen kuin hiilivoimalat sulkeutuvat. Osana toimenpidepakettia harkitaan hiilivoimaloiden toiminnan rajoittamista jo ennen vuotta 2025 joko päästö- tai käyttöaika rajoituksilla siirtymän pehmentämiseksi ja sulkemisten porrastamiseksi. (Department for Business, Energy and Industrial Strategy, 2016)

Korvausinvestointien mahdollisuudet ja rajoitteet kunnissa

Kunnissa maalämmön, pelletti- ja aurinkosähköpaneelien kannattavuutta tarkasteltiin suhteessa öljylämmitykseen sekä hiilellä tuotetun kaukolämmön käyttöön. Seuraavassa taulukossa on yhteenveto energiamuotojen tuotantohinnoista.

Taulukko 6.6. Kunnan vaihtoehtoiset energiakustannukset

	Polttoaineen hinta tai käyttökulut, eur/MWh	Tuotantohinta eur/MWh, sis. laiteinvestointi ja mahd. tuet
Kivihiilellä tuotettu kaukolämpö	53,2	
Öljylämmitys	76,6	
Ostosähkö	100	
Maalämpöjärjestelmä, 300 kW, energiatuki 0-15%	33,3	54,8
Pellettijärjestelmä, 160 kW, energiatuki 13%	44	52,1
Aurinkosähköjärjestelmä, 118 kW, energiatuki 25%	5	43,3

Uudisrakennuskohteissa uusiutuva energia on öljylämmitykseen verrattuna kilpailukykyinen vaihtoehto. Muiden energiamuotojen kohdalla valinnan ratkaisee todennäköisesti muut tekijät kuin hinta, koska hiilikaukolämmön, maalämmön ja pellettilämmön hinnoissa ei ole merkittäviä eroja.

Alla on esimerkki kannattavuuslaskelmasta, jossa öljylämmitys korvataan pellettivoimalalla. Muut laskelmat löytyvät energiainvestointien kannattavuuslaskurista:

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1rnA7uHyA74x6yIPNIh7Bo1sim1bExpNBQ5HIUZCx fWQ/edit?usp=sharing> (ks. välilehdet).

Taulukko 6.7. Kannattavuuslaskelma, kun kunta korvaa öljylämmityksen pellettilämmitysjärjestelmällä

Korvattava lämmönkulutus vuodessa <i>Esim. iso virastotalo, koulu tms.</i>	300	MWh/v
Korvattavan öljylämmityksen lähtötiedot:		
Öljyn ostohinta <i>Öljyn hinta 84 eur/MWh vähennettynä alv 24%, vanhan kattilan hyötysuhde 80%. Hinta ei sisällä laitekustannuksia.</i>	77	eur/MWh
Pelletin käytön hinta <i>Pelletin ostohinta keskiuurissa kohteissa noin 40 eur/MWh (alv 0%) ja uuden kattilan hyötysuhde 90%</i>	44	eur/MWh
Järjestelmän pitoaika	20	vuotta
Investointituen osuus alkuinvestoinnista <i>Energiatuki, lämpökeskushankkeet (puupolttoaineet) 10–15 %</i>	13 %	
Alkuinvestoinnin arvo ilman tukea <i>Pellettijärjestelmän hankintahinta 300-400 euroa/kW keskiuurissa kohteissa, teho 300 MWh:n kulutuskohteissa noin 160 kW</i>	56 000	euroa
Investointituen arvo, eur	7 280	euroa
Pellettilämmön tuotantohinta tuen ja laiteinvestointien kanssa	52	eur/MWh
Investoinnin tekijän tiedot:		
Investoinnin laskentakorko (rahoituskulut, %)	2 %	
Investoinnin laskenta-aika ja takaisinmaksuajan odote	8	vuotta

Tulokset:

Kannattavuus kunnan investointikriteerien (laskenta-aika/ takaisinmaksuajan odote 8 vuotta, rahoituskorko 2%) mukaan:		
Investoinnin sisäinen korkokanta (IRR)	11.9	%
Investoinnin nettonykyarvo (NPV) 2 %:n laskentakorolla:	22 500	euroa
Takaisinmaksuaika	5	vuotta

Johtopäätös: Investointi on hyvin kannattava.

Seuraavassa taulukossa on yhteenveto investointien kannattavuuslaskelmien tuloksista.

Taulukko 6.8. Korvausinvestointien kannattavuus kunnan näkökulmasta, kun laskenta-aika / takaisinmaksuajan odote 8 vuotta ja laskentakorko 2%

	Hiili- kaukolämmön korvaaminen maalämpöjärjes- telmällä	Lämpöpumpun ostosähkön kor- vaaminen aurin- kosähköljärjestel- mällä	Öljylämmityksen korvaaminen pel- letijärjestelmällä
Energiajärjestelmän pitoaika/elinkaari	20 vuotta	30 vuotta	20 vuotta
Sisäinen korkokanta 8 v. laskenta-ajalla	-18,0%	-8,3%	11,9%
Sisäinen korkokanta järjestelmän elinkaa- ren aikana	-0,7%	7,3%	19,5%
Takaisinmaksuaika 2 % laskentakorolla	yli 20 vuotta	13 vuotta	5 vuotta
Nettonykyarvo 8 v. laskenta-ajalla	-€194 242	-€44 272	€22 491
Nettonykyarvo NPV (eur) järjestelmän elinkaaren aikana	-€71 182	€96 094	€109 055
Investoinnin kannat- tavuus	Kivihiilellä tuote- tun kaukolämmön korvaaminen ei ole maalämpöjär- jestelmällä kan- nattavaa, mutta öljylämmityksen korvaaminen on.	Aurinkosähköllä os- tosähkön korvaami- nen ei ole kannatta- vaa kunnan inves- tointikriteereillä, mut- ta voimalan pitoajan mukaan tarkasteltu- na kyllä.	Öljylämmityksen korvaaminen pellet- tijärjestelmällä on kannattavaa, mutta kivihiilellä tuotetun kaukolämmön ei.

Keskiarvolaskelmien perusteella öljylämmityksen korvaaminen pelletti- tai maalämpöjärjestelmillä on nykyisin kannattavaa kunnille. Toisaalta kivihiilellä tuotetun kaukolämmön korvaaminen kiinteistökohtaisilla uusiutuvan energian järjestelmillä ei ole kannattavaa. Aurinkosähköinvestoinnit ovat kunnille kannattavia vain, mikäli kannattavuutta arvioidaan takaisinmaksuajan sijaan aurinkosähköljärjestelmän elinkaaren ajalta nettonykyarvon ja sisäisen korkokannan laskentamenetelmillä. Haasteena on, että hyvin harvat kunnat arvioivat investointien kannattavuutta elinkaarikustannusten pohjalta.

Vertailusta voidaan nähdä, että aurinkoenergia on taloudellisesti kannattavaa Suomessa nykyisin lähinnä pitkäjänteisille ja kärsivällisille taloudellisille toimijoille TEM:n energiatuella. Kärsivällisten sijoittajien tuottovaatimus on pitkän tähtäimen ja matalan riskin investoinneille tasoa 4-8 %. Tältä pohjalta potentiaalisia aurinkoenergiajärjestelmien hankkijoita ovat Suomessa lähinnä asukkaat, kunnat sekä pitkäjänteisesti toimivat kiinteistönomistajat. Kannattavuus- ja lainsäädäntötarkastelujen perusteella nykyinen toimintaympäristö Suomessa johtaa

lähinnä kiinteistökohtaiseen omakäyttöön mitoitettujen aurinkosähköjärjestelmien yleistymiseen. Ilman energiatukea investointeja ei koeta taloudellisesti houkutteleviksi.

Taulukko 6.9. Tukien, laskenta-ajan ja tuottovaatimusten vaikutukset investoinnin kannattavuuteen - case Tampereen Vuorestalon aurinkosähköinvestointi (Auvinen, 2015)

	CASE Vuorestalon toteutunut kannattavuus v. 2014 TEM:n 30% tuella ja 25 vuoden laskenta-ajalla:	VERTAA Investoinnin kannattavuus ilman tukea	VERTAA: Investoinnin kannattavuus 30 %:n tuella, 10%:n tuotto-odotuksella ja 10 vuoden laskenta-ajalla
Nettonykyarvo	+ 44 200 euroa	+4 643 euroa	-21 700 euroa
Sisäinen korkokanta	6,9%	2,6%	-3,3%
Takaisinmaksuaika	12 vuotta	23 vuotta	yli 30 vuotta
Aurinkosähkön omakustannushinta	6 snt/kWh	8 snt/kWh	13 snt/kWh

Korvausinvestointien mahdollisuudet ja rajoitteet omakotitaloissa

Omakotitaloissa maalämpö- ja pellettijärjestelmien kannattavuutta tarkasteltiin suhteessa öljylämmitykseen. Laskelmat löytyvät energiainvestointien kannattavuuslaskurista: <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1rnA7uHyA74x6yIPNIh7Bo1sim1bExpNBQ5HIUZCx fWQ/edit?usp=sharing> (ks. välilehdet).

Taulukko 6.10. Kotitalouksien vaihtoehtoiset energiakustannukset

	Polttoaineen käyttökulut, eur/MWh	Tuotantohinta eur/MWh, sis. laiteinvestointi ja mahd. tuet
Öljylämmitys	100,8	
Kaukolämmön keskimääräisiä ostohintoja hiilivoimaloiden alueella	60-81	
Pellettijärjestelmä, omakotitalo, hankinta 12 000 euroa, sis. kotitalousvähennys	63,8	85,9
Maalämpöjärjestelmä, omakotitalo, hankintahinta 17 500 euroa, sis. kotitalousvähennys	40,0	65,6

Hintavertailun mukaan maalämpö on uudisrakennuksissa kilpailukykyisin lämmitysjärjestelmä. Seuraavassa taulukossa on yhteenveto korvausinvestointien kannattavuuslaskelmien tuloksista.

Taulukko 6.11. Korvausinvestointien kannattavuus kotitalouden näkökulmasta, kun takaisinmaksuajan odote 10 vuotta ja laskentakorko 2%.

	Öljylämmityksen korvaaminen pellettijärjestelmällä	Öljylämmityksen korvaaminen maalämpöjärjestelmällä
Energiajärjestelmän pitoaika/elinkaari	20	20
Sisäinen korkokanta 10 v. laskenta-ajalla	-3,1%	3,3%
Sisäinen korkokanta järjestelmän elinkaaren aikana	5,5%	10,2%
Takaisinmaksuaika	13 vuotta	9 vuotta
Nettonykyarvo 10 v. laskenta-ajalla	-€2 678	€861
Nettonykyarvo järjestelmän elinkaaren aikana	€4 005	€11 842
Investoinnin kannattavuus	Öljylämmityksen korvaaminen pellettijärjestelmällä ei ole kannattavaa kotitalouden investointikriteereillä, mutta elinkaaritarkastelulla investointi on kannattava.	Öljylämmityksen korvaaminen maalämpöjärjestelmällä on kannattavaa.

Suuntaa-antavien laskelmien perusteella omakotitaloissa asuvien kotitalouksien näkökulmasta öljylämmityksen korvaaminen maalämpöjärjestelmällä on nykyisin kannattavaa ja pellettijärjestelmän tapauksessa kannattavaa lähinnä elinkaarikustannusten perusteella.

HP4NZEB-hankkeessa vertailtiin kaukolämmön, lämpöpumppujen sekä lämpöpumppu- ja aurinkoenergiahybridiratkaisujen elinkaarikustannuksia omakotitaloissa ja kerrostaloissa uudisrakentamisen ja saneerauksen yhteydessä. Lämpöpumppujen kustannusvaikutuksia tutkittiin kolmessa tarkastelukohteessa: tyypillisessä uudispientalossa, uudiskerrostalossa sekä 1960-luvulla rakennetussa kerrostalossa. Tulosten mukaan rakennusten lähes nollaenergiataso oli saavutettavissa kustannustehokkaammin lämpöpumppuihin perustuvilla ratkaisuilla kuin kaukolämmöllä. Lisäksi lämpöpumppujen eduksi todettiin, että rakennusten kasvava viilennystarve hoituu samalla, jolloin erillistä investointia viilentämiseen ei tarvitse tehdä. Elinkaarikustannustarkastelussa 25 vuoden tarkastelujaksolla maalämpöpumpun kustannukset asettuivat uudiskerrostalossa tasolle 173 €/ m² ja kaukolämmön tasolle 225 €/ m². (Green Net Finland, 2015)

6.6 Yhteenveto

Kannattavuuslaskelmista voidaan suunta-antavasti nähdä, että uusiutuva energia on jo usein taloudellisesti kilpailukykyinen vaihtoehto uudisrakennuskohteissa tai uusvoimalainvestoinneissa. Uudisrakentamisen volyyymi on kuitenkin hyvin pieni verrattuna olemassa oleviin rakennuksiin tai voimaloihin.

Öljyn korvaaminen uusiutuvalla energialla on Suomessa pääsääntöisesti taloudellisesti kannattavaa nykyisillä hintatasoilla ja ohjauskeinoilla keskiarvolaskelmien mukaan. Öljylämmityksen korvaaminen kunnille on kannattavaa investointituen avulla. Aurinkosähköinvestoinnit ovat kunnille kannattavia vain, mikäli kannattavuutta arvioidaan takaisinmaksuajan sijaan aurinkosähköjärjestelmän elinkaaren ajalta nettonykyarvon ja sisäisen korkokannan perusteella.

Omakotitaloissa öljylämmityksen korvaaminen maalämpöjärjestelmillä on maltillisesti kannattavaa. Pellettijärjestelmällä öljyn korvaaminen on kannattavaa ainoastaan niin, että investointin taloudellisuutta arvioidaan elinkaarikustannusten perusteella eikä pelkän takaisinmaksuajan pohjalta.

Korvausinvestoinnit voivat olla taloudellisesti houkuttelevia toimijoille, jotka ovat kärsivällisiä sijoittajia ja joiden tuottovaatimus on pitkän tähtäimen investoinneissa maltillinen. Tällaisia tahoja ovat muun muassa asukkaat, ilmastotavoitteisiin ja energiatehokkuuden parantamiseen sitoutuneet kunnat sekä pitkäjänteisesti toimivat kiinteistönomistajat.

Ilman energiatukea korvausinvestointeja ei koeta kunnissa eikä yrityksissä taloudellisesti houkutteleviksi. Lisäksi investointien toteutumisen edellytys on yleensä edullinen rahoitus, koska rahoituksen kustannukset vaikuttavat erittäin merkittävästi investointien kannattavuuteen.

Case-laskelmien tulosten pohjalta haasteena on erityisesti kivihiilen korvaaminen uusiutuvalla energialla. Suhteessa hiilen käyttöön uusiutuvan energian investoinnit eivät ole kannattavia. Keskiarvolaskelmien mukaan korvausinvestoinnit eivät ole kannattavia kaukolämpöyhtiöille itselleen eikä kuntien kiinteistöille, joissa kivihieillä tuotettua kaukolämpöä voitaisiin korvata kiinteistökohtaisilla uusiutuvan energian järjestelmillä.

Nykyisillä hintatasoilla, toimijoiden investointikriteereillä ja käytössä olevilla ohjauskeinoilla ei ole odotettavissa uusiutuvan energian investoinneissa merkittävää markkinakasvua. Uusiutuvan energian kannattavuutta heikentävät erityisesti alhaiset sähkön, kivihiilen ja öljyn hinnat. Fossiilisten polttoaineiden käytön ja uusiutuvan energian suhteelliset hintaerot ovat liian pieniä, jotta uusiutuvan energian investoinnit olisivat kannattavia. Energian hintojen tulisi sisältää niiden ympäristö- ja terveyshaitoista aiheuttavat kustannukset. Uusiutuvan energian korvausinvestoinnit kannattavuutta edesauttaisi, jos kilpailevien fossiilisten polttoaineiden hinnoissa olisi muun muassa arvioidut ilmastomuutoksen kustannukset mukana.

Uusiutuvan energian hintakilpailukyky tuleekin varmistaa taloudellisilla ohjauskeinoilla. Poliittiset päätökset vaikuttavat merkittävästi uusiutuvan energian kannattavuuteen ja toimijoiden investointihalukkuuteen. Merkittävä osuus energiainvestointien kannattavuudesta perustuu lainsäädäntöön ja hallintoon, koska poliitikot määrittävät muun muassa energia-, hiilidioksidi-

ja valmisteverojen, lupamaksujen, siirtomaksujen ja tukien määräytymisperusteet sekä tasot. Uusiutuvan energian ohjauskeinojen vaikuttavuutta arvioitaessa ja niitä suunniteltaessa tulee ottaa huomioon, että toimijoilla on erilaiset investointikriteerit, taloudelliset ehdot, energiankäyttöprofiilit, laitteistokoot ja paikalliset olosuhteet. Tästä johtuen hajautetun energian edistämiseksi tarvittavia toimia on tarkasteltava käyttäjälähtöisesti. Energia- ja ilmastopolitiikan tulisi luoda uusiutuvalla energialle ennustettava ja vakaa investointiympäristö. Lisäksi on tärkeää vähentää käyttöönoton esteitä ja byrokratiasta aiheutuvia kustannuksia.

Yksinkertaisten kannattavuusmittarien, kuten takaisinmaksuaikamenetelmän, ja puhtaiden energiateknologioiden pitoaika (20-30 vuotta) selvästi lyhyempien laskenta-aikojen käyttö johtaa siihen, että kannattavia investointeja jää toteutumatta. Uusiutuvan energian taloudellista hyötyä ja tuottoja tulee tarkastella koko elinkaaren yli. Investointien kannattavuutta tulisi arvioida nettonykyarvon tai sisäisen korkokannan perusteella. Jos yritykset, kunnat ja asukkaat arvottaisivat investointeja takaisinmaksuaikaa soveliaammilla taloudellisilla menetelmillä, hyvin monet investoinnit näyttäytyisivät kannattavilta, kun huomioidaan järjestelmän pitoaika. Jotta toteutuskelpoisia investointeja ei jäisi toteutumatta, tulisi informaatio-ohjausta ja koulutusta investointipäätöksen tekemiseen lisätä kunnille ja kotitalouksille.

Hajautetun energiantuotannon käyttöönotossa pullonkauloja ovat yleensä yksikön perustamiseen liittyvät kustannukset. Uuden tekniikan elinkaaren alkuvaiheessa myös tuotteiden hinta, tuotekehityskustannuksista johtuen on korkeampi kuin jo käytössä olevien tekniikoiden.

6.7 Toimenpidesuosituksukset

Investointien kannattavuutta voidaan parantaa sellaisilla ohjauskeinoilla, jotka jyrkentävät fossiilisen energian ja uusiutuvien energialähteiden välistä hintaeroa tai rajoittavat fossiilisten polttoaineiden käyttöä energiantuotannossa.

Energiapolitiikan tulisi olla pitkällä aikajänteellä vakaata. Päättäjien tulisi minimoida sijoitusten riskit ja luoda ennustettava investointiympäristö. Lisäksi on tärkeää vähentää käyttöönoton esteitä ja byrokratiasta aiheutuvia kustannuksia. (IEA, 2014)

Poliitikkojen tulisi varmistaa uusiutuvien energiainvestointien kannattavuus yksityiselle ja julkiselle sektorille sekä kuluttajille. Taloudellisilla ohjauskeinoilla tulisi varmistaa uusiutuvan energian hintakilpailukyky vaihtoehtoisin, ympäristölle vahingollisiin energiamuotoihin verrattuna. (Alireza A., 2014)

Taloudelliset ohjauskeinot ja päästörajoitukset

Selvityksen hintavertailut eivät ole keskenään suoraan verrannollisia, mutta silti niistä voidaan nähdä, että uusiutuvan energian hinnoissa ei ole merkittäviä eroja verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin. Uusiutuva energia ei ole enää kallista. Ongelma on, että fossiilisen polttoaineen ja uusiutuvan energian hintojen suhteelliset erot ovat liian pieniä, jotta korvausinvestoinnit olisivat kannattavia.

Tällaisessa tilanteessa markkinat kehittyvät Suomessa hitaasti ja investointeja tekevät lähinnä ns. kärsivälliset sijoittajat tai ympäristöarvoja painottavat toimijat. Mikäli fossiilisten poltto-

aineiden käyttöä halutaan vähentää merkittävästi ja nopeammin, tulisi taloudellisilla ohjauskeinoilla (verotus, tuet, maksut) muodostaa energiamarkkinoille tilanne, jossa uusiutuvan energian investointien tuotto on energiantuotantoyhtiöille ja kiinteistönomistajille vähintään 6 % 10-15 vuoden laskenta-ajalla. Nopeat investointien ja uusiutuvan energian markkinoiden kasvu toteutuisi tilanteessa, jossa investointien tuotot olisivat yli 10 % alle 10 vuoden laskenta-ajalla. Investointien hyvä kannattavuus myös mahdollistaa palveluiden kehittämisen. Lisäksi hyvä kannattavuus johtaa volyymin kasvuun, mikä omalta osaltaan mahdollistaa rahoittajien ja institutionaalisten sijoittajien mukaantulon markkinoille sekä teolliset skaalaedut, jotka omalta osaltaan johtavat kustannustason pienenemiseen.

Mikäli päästökauppaa ei ole mahdollista korjata niin, että päästöoikeuden hinta nousisi vähintään tasolle 25 eur/tCO₂, pitäisi jollakin muulla keinolla tehdä kivihielestä kalliimpaa. Esimerkiksi Tanskassa on korkea hiilidioksidivero (Confédération Fiscale Européenne, 2016) ja Iso-Britanniassa päästökauppaa täydentää hiilen käytön lisämaksu (Carbon Price Support, CPS). Lisäksi hielestä luopumista edistetään molemmissa maissa uusiutuvan energian tuilla. Iso-Britanniassa harkitaan lisäksi päästörajoitusten tiukentamista niin, että hiilivoimalat sulkeutuvat viimeistään vuonna 2025. (Department for Business, Energy and Industrial Strategy, 2016)

Omistajaohjaus

Valtaosa Tanskan kaukolämpöyhtiöistä on kunnan omistamia yhtiöitä tai osuuskuntia. Kuntien omistamien energiaosuuskuntien tärkein tavoite on energian saatavuuden varmistaminen ja asiakkaiden energialaskujen alentaminen pitkällä tähtäimellä. Tämän tavoitteen saavuttamiseksi kunnallisilla energiayhtiöillä on valmius tehdä isoja ja kauaskantoisia investointeja. Tanskan päästövähennystavoitteiden ja taloudellisten ohjauskeinojen lisäksi maassa yleinen osuuskuntamalli on keskeinen syy investointien etenemiseen (Varjotie, 2016).

Tanskan esimerkki osoittaa, että uusiutuvan energian kannattavuus on riippuvaista ohjauskeinojen lisäksi toimijoiden liiketoiminta- ja ansaintamalleista. Suomessa valtio ja kunnat odottavat yleensä omistamiltaan energiayhtiöiltä tuloja ja osinkoja, mikä johtaa yhtiön investoinneissa korkeisiin tuottovaatimuksiin. Tanskassa osuuskunnat eivät tavoittele voittoa lyhyellä tähtäimellä, vaan mahdollisimman alhaisia lämmön hintoja pitkällä tähtäimellä.

Valtio ja kunnat voisivat Suomessa edistää omistamiensa energiayhtiöiden uusiutuvan energian investointeja madaltamalla itse yhtiöiden voittoihin kohdistuvia tuottovaatimuksia sekä edellyttämällä yhtiöitä luopumaan fossiilisista polttoaineista. Investointien mahdollistamiseksi tulisi sallia energiayhtiöille asiakashintojen korotukset ja/tai vähentää itse energiayhtiön hyödyntämisestä tulonlähteenä.

Demonstrointi- & kehityspanostusten kasvattaminen kaksisuuntaisten lämpöverkkomarkkinoiden kehittämiseksi

Kaukolämmön ja hajautetun uusiutuvan energian hyödyntämisen vastakkainasettelusta tulisi päästä eroon. Kustannustehokkaasti toimivasta lämpöverkosta on etua keskitetyn ja hajautetun uusiutuvan energian hyödyntämisessä, koska kaukolämpöverkkoa voidaan hyödyntää lämmöntuotannon ja -kysynnän tasaamiseen sekä lämmön lyhytaikaiseen varastointiin. Kak-

sisuuntaisesti toimivan, keskitettyä ja hajautettua uusiutuvaa energiaa hyödyntävän lämpöverkon toimiminen edellyttää laaja-alaista liiketoiminta- ja tuotantomallien kehittämistä. (Koikkalainen A., 2015)

Suomessa olisi hyvä edistää hankkeita, joissa pilotoidaan lämmön kausivarastointia sekä hajautetun lämmöntuotannon integrointia kauko- ja aluelämpöverkkoihin sekä teollisessa että pienessä mittakaavassa. Samalla lämpöverkkojen hallinta- ja markkinamalleja olisi tärkeää uudistaa.

Informaatio-ohjaus: Takaisinmaksuajasta kohti elinkaarihyötyjen tarkastelua

Kunta- ja asukassektorilla taloudellisen kannattavuuden arviointimenetelmänä käytetty takaisinmaksuaika on ongelmallinen, koska se ei anna oikeaa kuvaa investoinnin kannattavuudesta. Takaisinmaksuaika ei ota huomioon investoinnin pitoaikaa eikä jäännösarvoa (Vierros T., 2009), kun energiateknologioiden käyttöiät ovat yleensä 15-30 vuotta.

On suositeltavaa, että ministeriöt kuten TEM, MMM ja YM sekä muut julkisen sektorin energiainformaatiota ja -neuvontaa tarjoavat organisaatiot luopuvat takaisinmaksuaikamittarin käytöstä tukilomakkeissa ja neuvontamateriaaleissa energiainvestointien kannattavuuden arviointi- ja informointimenetelmänä. Takaisinmaksuaika pitäisi korvata tai sen rinnalle tuoda mittareiksi investointien nettonykyarvo NPV (eur) ja sisäinen korkokanta IRR (%) teknologioiden elinkaaren ajalta laskettuna.

Jos kunnat ja asukkaat arvottaisivat investointeja soveliaammilla taloudellisilla menetelmillä, hyvin monet investoinnit näyttäytyisivät jo nyt kannattavina päinvastoin kuin pelkällä takaisinmaksuajalla tarkasteltuna. Kunnille, asukkaille ja laitetoimittajille on tarjolla ilmaisia laskentatyökaluja investointien sisäisen korkokannan ja nettonykyarvon laskemiseksi. Julkiset organisaatiot voisivat suositella laskentamenetelmien käyttöä ja levittää informaatiota laskentatyökaluista menetelmien käyttöönoton helpottamiseksi.

YHTEENVETO

Uusiutuvaan energiaan perustuva valtakunnallinen omavaraisuus on selvästi mahdollista saatavilla olevien energianlähteiden puolesta, ja se on toteutettavissa nykyisin käytettävissä olevilla teknisillä ratkaisuilla. Selvitys tukee useita aikaisempia tutkimuksia. Kokonaan eri asia on pohtia sitä, kuinka energiaomavarainen Suomi käytännössä toteutetaan. Tätä on toistaiseksi vain spekuloitu, ja hyvinkin selvää on, että kyseessä on pitkäkestoinen prosessi. Uusiutuvan energian mobilisointi voi todennäköisesti edetä nopeimmin maaseudulla, jossa kunkin alueen omavaraisuus olisi helpoiten saavutettavissa. Hajautettu strategia toimisi suomalaisen maaseudun elinvoiman kohentajana: maaseutu voisi palvella myös muuta Suomea tuottamalla energiaa ja energian raaka-aineita.

Bioenergian potentiaali Suomessa on noin 130 TWh vuodessa (2014 tilastot). Se sisältää metsäteollisuuden lietteitä 38 TWh/a, ja muuta bioenergiaa on 90 TWh/a. Se puolestaan sisältää jo käytössä olevaa bioenergiaa 36 TWh/a. Käyttämätöntä bioenergiaa on runsaat 50 TWh/a olettaen, että oljesta puolet voidaan käyttää energian tuotannossa. Puun merkitys on suurin, kokonaispotentiaalista noin 80 prosenttia. Kaikesta muusta potentiaalista oljen osuus on noin 40 prosenttia. Bioenergian kokonaispotentiaali (mukaan lukien metsäteollisuuden lietteet) vastaisi noin 35 prosenttia Suomen energian kokonaiskulutuksesta. Tällä hetkellä jo käytössä oleva bioenergia on noin 20 % tuotetun energian kokonaismäärästä.

Suomen energian tuotanto vuonna 2014 oli 374 TWh/a, josta uusiutuvalla energialla ja ydinvoimalla tuotetaan 193 TWh/a. Jäljelle jäävä 181 TWh/a tuotetaan fossiililla raaka-aineilla. Lukujen vertaaminen suoraan on hankalaa, koska osa ilmoitetuista arvoista edustaa primäärienergiaa (energiamäärä, joka käytetään energian tuotantoon). Näitä ovat esimerkiksi öljytuotteet ”korvattavassa energiassa” ja puun pienkäyttö ja metsäteollisuuden jäteliemet uusiutuvassa energiassa. Varovaisen arvion mukaan korvattavaksi jäävä fossiilinen energia olisi noin 100 TWh/a. Tästä voitaisiin tuottaa noin 30 TWh/a aurinkoenergialla ja noin 70 TWh/a tuulivoimalla. Uusia tuulivoimala-projekteja tarvittaisiin siis runsaat 4000 lisää eli nykyisin valmiina tai vireillä oleviin verrattuna noin kaksinkertainen määrä.

CHP:n ja biokaasun tuotantoa on mahdollista kasvattaa kaikilla suuralueilla, myös Helsinki-Uudellamaalla ja Etelä-Suomessa. CHP:n kasvupotentiaalin hyödyntämisen työllisyys- ja talousvaikutukset olisivat suurimmat Pohjois- ja Itä-Suomessa. CHP:n ja biokaasun vielä käyttämättömän potentiaalin hyödyntäminen on aluetaloudellisin perustein suositeltavaa. Raaka-aineiden kotimaan kauppaa kannattaa edistää ja etsiä logistisia ratkaisuja, jotka minimoivat kuljetuskustannukset. Raaka-aineiden saatavuutta rajoittaa omistajien myyntihalukkuus. Vastaavasti ostajat pohtivat taloudellista hyödyntämisen tasoa.

Fossiilisten polttoaineiden käytön poistuminen tietäisi kuitenkin negatiivisia vaikutuksia työllisyyteen ja talouteen, ja kokonaisvaikutus jäisi negatiiviseksi ilman investointivaiheen vaikutuksia. Täysin uusiutuvaan energiaan siirtyminen tietäisi jonkin verran kustannuksia yhteiskunnalle. Todellisuudessa kustannukset olisivat kuitenkin tässä tutkimuksessa saatuja tuloksia pienempiä, koska myös investointivaihe luo työpaikkoja ja taloudellista kasvua. Tuloksia tulkittaessa on hyvä tiedostaa, että ne on laskettu yksinkertaistetussa tutkimusasetelmassa. Investointivaiheen vaikutusten puuttuminen johtaa puutteelliseen kuvaan esimerkiksi tuuli- ja

aurinkoenergian aluetaloudellisista vaikutuksista, sillä niissä suuri osa työllisyysvaikutuksista tulee juuri investointivaiheesta.

Hajautetun energiantuotannon tekniikat kehittyvät edelleen ja käytössä olevin ratkaisujen suorituskyky, hinnat ja käyttökustannukset tulevat edullisimmiksi. Erityisesti geoenergiaratkaisuissa on löydettävissä uusia innovaatioita ja kausivarastoinnin kehittyminen mahdollistaa hyvin suurien lämpömäärien käyttöönoton. Suuresta joukosta erilaisia menetelmiä tässä on tarkasteltu sellaisia, jotka alkavat jo olla sovellettavia tai joiden odotetaan olevan sovellettaessa lähivuosien aikana,

Suomessa aurinko- ja tuulivoiman laitteiden hintakehitys seuraa globaalia hintakehitystä. Pöyryn (2016) mukaan "Aurinkosähkön osalta kustannusten lasku voi kuitenkin olla nopeaa ja myös verkkoon syötöstä voi tulla kannattavaa ilman tukea". IEA:n ennusteen mukaan aurinkosähkön hinta laskee 25 % ja maatuulivoiman hinta 15 % vuoteen 2021 mennessä vuoden 2015 tasoon verrattuna. Uusiutuviin energialähteisiin perustuva kasvu liikennepolttoaineissa nähdään hitaammaksi kuin muussa energiantuotannossa.

Elinkaarikustannuslaskelmien mukaan hybridilämpöpumppu, jolla hyödynnetään useita lämmönlähteitä, voi olla kannattava investointi suuressa osassa nykyistä asuinrakennusten rakennuskantaa. Uudisrakennuksissa jäädytystarve tulee hyvin todennäköisesti lisääntymään. Uudisrakennusten lämmöntarve on selvästi pienempi, eikä lämpöpumppujärjestelmillä saavutetut energiasäästöt lämmityksessä jokaisessa tapauksessa kata kallista investointia.

Kiinteistöjen omistajat painottavat lämmitysjärjestelmähankinnoissaan taloudellisia seikkoja ja tästä syystä vaihtoehtojen elinkaarikustannukset tulee määrittää. Järjestelmien muutostarpeen aiheutuessa kasvihuonekaasujen vähentämistarpeesta, myös saavutettavissa oleva päästövähennys tulee laskea. On myös tärkeää määrittää eri teknologioilla saavutettava päästövähennysten ominaiskustannus, jotta isossa kuvassa kasvihuonekaasujen vähentämisestä aiheutuva kustannus saadaan pidettyä kohtuullisena. Sen perusteella ei kuitenkaan tule teknologioita laittaa paremmuusjärjestykseen.

Tällä hetkellä suurimman päästövähennyspotentiaalini energiantuotantojärjestelmä saattaa olla kustannuksiltaan kallein. Se tekee päästövähennemän erittäin kalliiksi, eikä kannusta päästövähennyksiin järjestelmiä uusimalla. Toisaalta, on tarkasteltava aluetta ja sen energiajärjestelmiä kokonaissysteeminä ja huomioitava alueella sekä energian tarjonta että kysyntä. Voimme saada edullisia päästövähennyksiä esimerkiksi pelkästään aurinkoenergiaan perustuen, mutta on huomioitava suomalaisten olosuhteiden reunaehdot ja usein hybridiratkaisut tarjoavat joustavimman kokonaisratkaisun.

Työssä on myös tarkasteltu fossiilisten energioiden korvaamista uusiutuvilla energioilla, tehty taloudellisia kannattavuustarkasteluja ja etsitty pullonkauloja. Fossiilisten polttoaineiden ja uusiutuvien energialähteiden hintaeroa olisi jyrkennettävä taloudellisilla ohjaukeinoilla investointien kannattavuuden parantamiseksi.

Uusiutuvan energian kannattavuutta heikentävät erityisesti alhaiset sähkön, kivihiiilen ja öljyn hinnat. Nyt fossiilisten polttoaineiden käytön ja uusiutuvan energian suhteelliset hintaerot ovat liian pieniä, jotta uusiutuvan energian investoinnit olisivat kannattavia. Erityisesti kivihiiilen korvaaminen on nykyisellä kivihiiilen ja päästöoikeuden hinnalla kannattamatonta. Energian

käyttäjähintojen tulisi sisältää niiden ympäristö- ja terveyshaitoista aiheuttavat kustannukset. Uusiutuvan energian korvausinvestoinnit kannattavuutta edesauttaisi, jos kilpailevien fossiilisten polttoaineiden hinnoissa olisi muun muassa arvioidut ilmastomuutoksen kustannukset mukana.

Uusiutuvan energian hintakilpailukyky tuleekin varmistaa taloudellisilla ohjauskeinoilla. Uusiutuvan energian ohjauskeinojen vaikuttavuutta arvioitaessa ja niitä suunniteltaessa tulee ottaa huomioon, että toimijoilla on erilaiset investointikriteerit, taloudelliset ehdot, energiankäyttöprofiilit, laitteistokoot ja paikalliset olosuhteet. Tästä johtuen hajautetun energian edistämiseksi tarvittavia toimia on tarkasteltava käyttäjälähtöisesti. Energia- ja ilmastopolitiikan tulisi luoda uusiutuvalla energialle ennustettava ja vakaa investointiympäristö. Lisäksi on tärkeää vähentää käyttöönoton esteitä ja byrokraatiasta aiheutuvia kustannuksia.

Nykyisillä hintatasoilla, toimijoiden investointikriteereillä ja käytössä olevilla ohjauskeinoilla ei ole odotettavissa uusiutuvan energian investoinneissa merkittävää markkinakasvua. Nykyisin potentiaalisia uusiutuvaan energiaan investoivia tahoja ovat Suomessa nykyisin lähinnä pitkäjänteisesti toimivat asukkaat, kunnat, osuuskunnat sekä kiinteistönomistajat, joiden tuotto-odotus on pitkän tähtäimen investoinneissa 2-8 %.

Puutteellisten kannattavuusmittarien, kuten takaisinmaksuaikamenetelmän, ja puhtaiden energiateknologioiden pitoaika (20-30 vuotta) selvästi lyhyempien laskenta-aikojen käyttö johtaa siihen, että kannattavia investointeja jää toteutumatta. Uusiutuvan energian taloudellista hyötyä ja tuottoja tulee tarkastella koko elinkaaren yli. Investointien kannattavuutta tulisi arvioida nettonykyarvon tai sisäisen korkokannan perusteella. Jos yritykset, kunnat ja asukkaat arvottaisivat investointeja takaisinmaksuaikaa soveliaammilla taloudellisilla menetelmillä, hyvin monet investoinnit näyttäytyisivät ihan kannattavina, kun huomioidaan järjestelmän pitoaika. Jotta toteutuskelpoisia investointeja ei jäisi toteutumatta, tulisi informaatio-ohjausta ja koulutusta investointipäätöksen tekemiseen lisätä kunnille ja kotitalouksille. Lisäksi olisi tärkeää, että julkinen hallinto korvaisi tukilomakkeissa ja neuvontamateriaaleissa takaisinmaksuaikamittarin sisäisellä korkokannalla ja/tai nettonykyarvolla.

Hajautetun energiantuotannon käyttöönotossa pullonkauloja ovat yleensä yksikön perustamiseen liittyvät kustannukset. Uuden tekniikan elinkaaren alkuvaiheessa myös tuotteiden hinta, tuotekehityskustannuksista johtuen on korkeampi kuin jo käytössä olevien tekniikoiden. Energia- ja ilmastopolitiikan tulisi luoda uusiutuvalla energialle ennustettava ja vakaa investointiympäristö. Uusiutuvan energian hintakilpailukykyä voidaan vahvistaa taloudellisilla ohjauskeinoilla.

LÄHTEITÄ JA TAUSTA-AINEISTOJA

Aaltonen Juhani. 25.1.2016. Uusiutuvan energian tavoitteet saavutettu Sakarinmäessä. Helen Oy:n blogi. Saatavissa: <http://blogi.helen.fi/uusiutuvan-energian-tavoitteet-saavutettu-sakarinmaessa/>

Alireza Aslani. 2014. Evaluation of Renewable Energy Development in Power Generation – System Dynamics Approach for the Nordic Countries. Saatavissa: http://www.uva.fi/materiaali/pdf/isbn_978-952-476-534-3.pdf

Allen, Alistair, Dejan, Milenic & Paul Sikora (2003). Shallow gravel aquifers and the urban 'heat island' effect: a source of low enthalpy geothermal energy. *Geothermics* 32: 569–578.

Alm Markku (2015). Uusiutuva energia. Toimialaraportti ennakoi liiketoimintaympäristön muutoksia. Näkemyksestä menestystä. TEM:n ja ELY-keskusten julkaisu.

Auvinen Karoliina. 2015. Aurinkolämpöjärjestelmien hintatasot ja kannattavuus Suomessa. Aalto-yliopisto. Lisätietoja: <http://www.finsolar.net/kannattavuus/aurinkolampojarjestelmien-hintatasot-ja-kannattavuus-suomessa/> sekä muistiot yritysten edustajien haastatteluista ja FinSolar-hankkeen taloyhtiö- ja kuntatyöryhmien kokouksista koskien asiakasryhmien investointikriteereitä ja rahoitusmalleja.

Auvinen Karoliina. 2016. Energian hinta- ja kannattavuusvertailu sekä kannattavuuslaskelmat. Aalto-yliopiston kauppakorkeakoulu. Saatavissa: <http://wp.me/p6NTys-kN>

Auvinen Karoliina & Jalas Mikko. 2015. Aurinkosähköjärjestelmien hintatasot ja kannattavuus. Aalto-yliopiston kauppakorkeakoulu. Saatavissa: http://www.finsolar.net/?page_id=1363&lang=fi

Betz' Law." 2013. *Wikipedia, the Free Encyclopedia*.
http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Betz%27_law&oldid=540753452.

Borg, M., and M. Collu. 2015. "A Comparison between the Dynamics of Horizontal and Vertical Axis Offshore Floating Wind Turbines." *Phil. Trans. R. Soc. A* 373 (2035): 20140076. doi:10.1098/rsta.2014.0076.

Cohen, Ariel E., Steven M. Cavallo, Michael C. Coniglio, and Harold E. Brooks. 2015. "A Review of Planetary Boundary Layer Parameterization Schemes and Their Sensitivity in Simulating Southeastern U.S. Cold Season Severe Weather Environments." *Weather and Forecasting* 30 (3): 591–612. doi:10.1175/WAF-D-14-00105.1.

Confédération Fiscale Européenne. 2016. Environmental Taxes in Denmark [viitattu 30.9.2016]. Saatavissa: <http://www.cfe-eutax.org/taxation/environmental-taxes/denmark>

Daroch, M., Geng, Shu and Wang, Guangyi. 2013. Recent advances in liquid biofuel production from algal feedstocks. *Applied Energy* 102 (2013) 1371-1381

Department for Business, Energy and Industrial Strategy. 2016. COAL GENERATION IN GREAT BRITAIN - The pathway to a low-carbon future: Consultation document. Saatavissa: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/567056/With_SIG_Unabated_coal_closure_consultation_FINAL_v6.0_.pdf

Department for Business, Energy and Industrial Strategy. 2015. Electricity Market Reform: Contracts for Difference. Saatavissa: <https://www.gov.uk/government/collections/electricity-market-reform-contracts-for-difference>

Djairam, D., A. N. Hubacz, P. H. F. Morshuis, J. C. M. Marijnisen, and J. J. Smit. 2005. "The Development of an Electrostatic Wind Energy Converter (EWICON)." In 2005 International Conference on Future Power Systems, 4 pp.-pp.4. doi:10.1109/FPS.2005.204208.

Ecofys. 2014. Subsidies and cost of EU energy. EU-raportti. Saatavissa: [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/ECOFYS 2014 Subsidies and costs of EU energy_11_Nov.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/ECOFYS_2014_Subsidies_and_costs_of_EU_energy_11_Nov.pdf)

Ekogen Oy:n www-sivut 2014. <http://ekogen.fi/>

Energiateollisuus ry. 2015. Kaukolämpötilastot.

Energiateollisuus ry. 2016. Kaukolämpö 2015 graafeina [viitattu 17.11.2016]. Saatavissa: http://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/kaukolampo_2015_graafina.html#material-view

Energiateollisuus ry. 2016. Diaesitys kaukolämmön hinnan kehityksestä (pptx), 01.03.2016. Saatavissa: <http://energia.fi/tilastot/kaukolammon-hinnat-tyyppitaloissa-eri-paikkakunnilla>

Energy Vaasa: <http://energyvaasa.vaasanseutu.fi/caset/energiaomavarainen-asuinalue/> (lainattu 09/2016)

2010/31/EU. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi annettu 19 päivänä toukokuuta 2010 Rakennusten energia-tehokkuudesta (uudelleenlaadittu). EUVL N:o 153, 18.6.2010.

Daroc, M., Shu Geng, Guangyi Wang. 2013. Recent advances in liquid biofuel production from algal feedstocks. Applied Energy 102 (2013) 1371-1381.

Euroheat and power. 3/2015. District Energy in Denmark. Saatavissa: <https://www.euroheat.org/knowledge-centre/district-energy-denmark/>

Finlex. 2016. Laki sähkön ja eräiden polttoaineiden valmisteverosta 1260/1996. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1996/19961260>

FinSolar 2016. Aurinkoenergiainvestointien tuet. <http://www.finsolar.net/investointiymparisto/lait-ja-saadokset/haettavat-tuet-aurinkoenergialle/>

Galkin-Aalto Marina. 2014. Aurinkolampoa Östersundomiin. Helen Oy blogi [viitattu 22.7.2016]. Saatavissa: <https://www.helen.fi/uutiset/2014/aurinkolampoa-ostersundomiin/>

Geologian tutkimuskeskus GTK (2015).

Goldstein, Leo. 2013. "Theoretical Analysis of an Airborne Wind Energy Conversion System with a Ground Generator and Fast Motion Transfer." Energy 55 (June): 987–95. doi:10.1016/j.energy.2013.03.087.

Green Net Finland. 2015. Verkkosivu: HP4NZEB – Lämpöpumpukonseptit lähes nollaenergiarakentamisessa [viitattu 24.7.2016]. Saatavissa: <http://gnf.fi/fi/gnf/hp4nzeb-lampopumpukonseptit-lahes-nollaenergiarakentamisessa/>

GSTEC Global Solar Thermal Energy Council. 2015. Demonstration project: Finnish Collector Field Operating in Denmark [viitattu 30.9.2016]. Saatavissa:

<http://www.solarthermalworld.org/content/demonstration-project-finnish-collector-field-operating-denmark>

GTK Geologian tutkimuskeskus. <http://www.gtk.fi/geologia/luonnonvarat/geoenergia/>

Helen Oy. 2016. Case Sakarinmäen koulu. Verkkosivu [viitattu 22.7.2016]. Saatavissa: <https://www.helen.fi/helen-oy/ajankohtaista/sakaranmaki/>

Helin T. 2010: Suuret odotukset leväenergiaa kohtaan – realismia vai ei. Ilmastotieto 15.03.2010

Hiilitieto ry. 2016. Hiilivoimalat Suomessa [viitattu 18.8.2016]. Saatavissa: <http://hiilitieto.fi/hiilitietoa/hiili-suomessa/hiilivoimalaitokset-suomessa/>

Hiltunen Erkki, Stenvall Kurt, 2016. Jepuan Biokaasulaitoksen toimitusjohtajan haastattelu Teollisen symbioosin taustatiedoista.

Hintikka, J. 2004. Biomassapohjaiset mikro-chp-tekniikat. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Bioenergiakeskuksen julkaisusarja (BDC Publications) 8.

Hiltunen, E., Martinkauppi, B., Zhu, L., Mäkiranta, A., Lieskoski, M. and Rinta-Luoma, J. (2015) Renewable, carbon-free heat production from urban and rural water areas. Journal of Cleaner Production, in press, available online 27 October 2015.

Hiltunen, E. ja Stenvall, K., 2016: Jepuan biokaasulaitoksen toimitusjohtaja Kurt Stenvallin haastattelu 21.12.2016.

Hirvonen J., Sulpu ry. Puhelinhaastattelu ja sähköpostivaihto 9/2016.

Hirvonen, M. 2010. Uudisrakennusalueen lämmitysratkaisujen valinta – tulevaisuuden haasteet ja niihin vastaaminen. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Huttunen, M.J. ja Kuittinen, V. 2015: Suomen biokaasulaitosrekisteri n:o 18, Tiedot vuodelta 2014, Publications of the University of Eastern Finland, Reports and studies in Forestry and Natural Sciences No 21, Joensuu 2015

IAE 2007 Bioenergia 2007. Potential Contribution of Bioenergy to the World's Future Energy Demand: <http://www.ieabioenergy.com/MediaItem.aspx?id=5586>.

IEA 2016 World energy outlook 2016. Executive Summary. <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WorldEnergyOutlook2016ExecutiveSummaryEnglish.pdf>

IEA. 2014. Technology Roadmap – Solar Photovoltaic Energy. Saatavissa: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy_2014edition.pdf

IRENA. 2015. Renewable Power Generation Costs in 2014. Saatavissa: http://www.irena.org/documentdownloads/publications/irena_re_power_costs_2014_report.pdf

Jaaranen M. 2014. Asuinkerrostalon lämmöntuottojärjestelmän optimointi elinkaarikustannusten perusteella hyödynnettäessä lämpöpumpulla useita lämmönlähteitä. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Jepuan biokaasu 2016: <http://www.jepubiogas.fi/tuotteet-and-palvelut/liikennebiokaasu/> (luettu 14.09.2016)

- Jepuan biokaasu 2016: <http://www.jeppobiogas.fi/tuotteet-and-palvelut/lannoitetoiminta/>
- Kettunen, P. 2016. Opistorakennuksen energiatehokkuuden parantaminen. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- Kitinoja A. 2016. CHP perusteinen sähkön tuotanto –esiselvitys; Tikka projekti, Tampereen yliopisto, Vaasan yliopisto, Levón-instituutti 12.1.2016
- Koikkalainen Anniina. 2015. Diplomityö: Lämpöverkko hajautettuun lämmöntuotantoon perustuvassa järjestelmässä. Aalto-yliopisto. Saatavissa: https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/16334/master_Koikkalainen_Anniina_2015.pdf?sequence=1
- Korpi Joonas 2016. Mikrolevien kasvatus biopolttoaineiden tuotannossa. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu, Bio- ja elintarviketekniikka 2016.
- Känkänen, J. ja Jääskeläinen, J. Energiamarkkinaskenaariot vuosille 2020-2050. Suomen Tuulivoimayhdistys ry, lokakuu, 2016.
- Lampinen Ari (2016). Yleistiedot Suomen verkosta. CBG100 Suomi. <http://www.cbg100.net/suomen-biokaasutankkausverkosto/yleistiedot/>
- Lampinen, A. 2015: Suomen biokaasulaitosrekisteri n:o 18, Tiedot vuodelta 2014, Publications of the University of Eastern Finland, Reports and studies in Forestry and Natural Sciences No 21, Joensuu 2015.
- Laukkanen, J. ja Korhonen, T. 2012. Kuivaniemen bioselvitys. Loppuraportti 11.6.2012. Pöyry Finland Oy. <http://www.greenpolis.fi/wp-content/uploads/Kuivaniemen-bioselvitys-P%C3%B6yry-Oyj.pdf>
- Leppäharju, Nina (2008). Kalliolämmön hyödyntämiseen vaikuttavat geofysikaaliset ja geologiset tekijät. Diplomityö. Oulun yliopisto.
- Liandong Zhu väitöskirja "Sustainable Biodiesel Production from Microalgae Cultivated with Piggery Wastewater". Vaasan yliopisto, 2015.
- Marmutova, Svetlana. 2016. *Performance of a Savonius Wind Turbine in Urban Sites Using CFD Analysis*. Acta Wasaensia 0355–2667. Vaasa: University of Vaasa.
- Martinkauppi, J.B., Mäkiranta, A., Kiijärvi, J. and Hiltunen, E. (2015) Thermal Behavior of an Asphalt Pavement in the Laboratory and in the Parking Lot. The Scientific World Journal Volume 2015, Article ID 540934, 7 pages
- Martinkauppi, B ja Hiltunen E. (2015). Vesilämpöakku-esiselvitys. EAKR-hanke. Loppuraportti.
- Martinkauppi K. (toim.) ERA17 Energiaviisaan rakennetun ympäristön aika 2017. Julkaisijat: Ympäristöministeriö, Sitra ja Tekes. 978-952-11-3791-4 (PDF). Saatavilla: www.era17.fi
- Ministry of Foreign Affairs of Denmark / Invest in Denmark. 2016. Solar Thermal Energy Integrated in District Heating [viitattu 29.9.2016]. Saatavissa: <http://www.investindk.com/Clusters/Cleantech/Smart-grid-and-electrical-vehicles/Solar-Thermal-Energy>
- Mirka 2016: <http://www.mirka.com/fi/fi/-Top-Menu-/uutiset/#/mirka-on-saavuttanut-tarkean-virstanpylvaan>

- Motiva. 2011. Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto. [Verkkosivu]. [Viitattu 30.3.2011]. Saatavana: http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/lampo-_ja_voimalaitokset/yhdistetty_sahkon-_ja_lammontuotanto
- Motiva Oy. 2015. Kaukolämmön tuotanto uudistuu. Verkkosivu [viitattu 22.7.2016]. Saatavissa: http://www.motiva.fi/rakentaminen/lammitysjarjestelman_valinta/lammitysmuodot/kaukolampo/kaukolammon_tuotanto_uudistuu
- Motiva. 2016. Lämmitysjärjestelmien elinkaari [viitattu 21.8.2016]. Saatavissa: http://www.energiatehokaskoti.fi/suunnittelu/talotekniikan_suunnittelu/lammitys/lammitysjarjestelmien_elinkaari
- Mäkiranta, A., Martinkauppi, B. and Hiltunen E. (2016) *Seasonal temperature variations under lawn and asphalt fields*. Conference proceedings, SDEWES2016, Portugal.
- Nissilä Heli. 2015. Aurinkoenergian arvoketjut Suomessa. Aalto-yliopisto, FinSolar-hanke. Saatavissa: <http://www.slideshare.net/FinSolar/arvoketjuanalyysi>
- Nissilä Heli. 2016. Investointien kotimaisuusaste. Saatavissa: <http://www.finsolar.net/investointiymparisto/investointien-kotimaisuusaste/>
- Nordic Energy Research. 2016. Indicators, Country: Denmark [viitattu 2.10.2016] . Saatavissa: <http://www.nordicenergy.org/indicators/country/denmark/>
- Oilon Oy. 2015. Esite: Hybridijärjestelmä [viitattu 23.7.2016]. Saatavissa: http://oilon.com/uploadedFiles/Scancool/Products_and_Services/Brochures/oilon_hybrid_solutions_FI.pdf
- Oilon Oy. 2016. Verkkosivu: Oilon ChillHeat P 150 – P 450 [viitattu 23.7.2016]. Saatavissa: <http://oilon.com/scancool/oilon-chillheat-p-150-p-450/>
- Oulun Energia Farmivirta 2016, <https://www.ouluenergia.fi/energia-ja-ymparisto/energiayrittajyyks/farmivirran-tuottajat> (luettu 14.09.2016)
- Parviainen J. 2015. Kuntien ja maakuntien ilmastotyön tilanne 2015. Strategioista käytäntöön. Helsinki: Suomen kuntaliitto. ISBN 978-952-293-335-5 (pdf). Saatavilla www.kunnat.net
- Patronen, J. EU:n Valtiontuen Suuntaviivat Täyttävät Uusiutuvan Sähköntuotannon Tukivaihtoehdot Suomessa. Suomen Tuulivoimayhdistys ry, helmikuu, 2016.
- Pesola, A., Vanhanen, J., Hagström, M., Karttunen, V., Larvus, L., Hakala, L. ja Vehviläinen, I. 2014. Sähkön pientuotannon kilpailukyvyyn ja kokonaistaloudellisten hyötyjen analyysi. Lopuraportti 3.10.2014. Gaia Consulting Oy. <http://docplayer.fi/671154-Sahkon-pientuotannon-kilpailukyvyyn-ja-kokonaistaloudellisten-hyotyjen-analyysi.html>
- Peura P. toim. 2007, Maaseudun voima, Liiketoiminta hajautetussa energiantuotannossa, Levón instituutti, Vaasan yliopisto, Julkaisu 124, 2007. ISSN 1457-8913, ISBN 978-952-476-184-0
- Rajamäki T. 2015, HS:n Berliinin kirjeenvaihtaja, 23.11.2015
- Reini K., Törmä H., Männistö T., Peura P., Kannonlahti J., Hyttinen T. ja Haapanen A. (2014). Uusiutuvat energian lähteet ja hajautetun energian tuotannon aluetaloudellinen vaikuttavuus Pietarsaaren ja Kaustisen seutukunnissa. Helsingin yliopisto Ruralia-instituutti, Raportteja 115. <http://www.helsinki.fi/ruralia/julkaisut/pdf/Raportteja115.pdf>

RIL 265–2014. 2014. Uusiutuvien lähienergioiden käyttö rakennuksissa. Suomen Rakennusinsinööriliitto RIL ry. ISBN 978-951-758-584-2.

Saha, U. K., S. Thotla, and D. Maity. 2008. "Optimum Design Configuration of Savonius Rotor through Wind Tunnel Experiments." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96 (8–9): 1359–75. doi:10.1016/j.jweia.2008.03.005.

Saha, U.K., and M. Jaya Rajkumar. 2006. "On the Performance Analysis of Savonius Rotor with Twisted Blades." *Renewable Energy* 31 (11): 1776–88. doi:10.1016/j.renene.2005.08.030.

Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R. and D. Buddhi. 2009. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 13, Issue 2, pp. 318-345.

Sipilä Kari et al. 2015. Distributed Energy Systems – DESY. VTT Technology 224. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2015/T224.pdf>

Snellman 2014: <http://www.snellman.fi/fi/blogi/snellman-korvasi-oljyn-biokaasulla>

Solar District Heating. 9/2016. 1 Million Square Meters Solar Thermal Collectors in Danish District Heating Plants [viitattu 1.10.2016]. Saatavissa: <http://solar-district-heating.eu/Default.aspx?tabid=68&ArticleId=477>

Solar District Heating. 6/2010. Marstal Solar District Heating – EU supports the extension to a 100% renewable energy system [viitattu 1.10.2016]. Saatavissa: <http://solar-district-heating.eu/NewsEvents/News/tabid/68/ArticleId/49/Marstal-Solar-District-Heating-EU-supports-the-extension-to-a-100-renewable-energy-system.aspx>

State of Green. 2016. Arcon-Sunmark builds world's largest solar heating plant [viitattu 30.9.2016]. Saatavissa: <https://stateofgreen.com/en/news/arcon-sunmark-builds-denmark-s-largest-solar-plant>

Suomen virallinen tilasto (SVT): Energian hankinta ja kulutus [verkkójulkaisu]. ISSN=1799-795X. 4. Vuosineljännes 2015, Liitekuvio 14. Energian loppukäyttö sektoreittain 2015* . Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 30.8.2016]. Saatavilla: http://www.stat.fi/til/ehk/2015/04/ehk_2015_04_2016-03-23_kuv_014_fi.html

Suomen virallinen tilasto (SVT): Kasvihuonekaasut [verkkójulkaisu]. ISSN=1797-6049. 2012, Liitekuvio 2. Suomen kasvihuonekaasupäästöt sektoreittain vuonna 2012 . Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 30.8.2016]. Saatavilla: http://www.stat.fi/til/khki/2012/khki_2012_2014-04-15_kuv_002_fi.html

Suomi, J (2014). Characteristics of urban heat island (UHI) in a high-latitude coastal city – A case study of Turku, SW, Finland. Väitöskirja. Turun yliopisto

Tahkokorpi, M. 2014. Case KOy Aurinkopajan aurinkosähköinvestointi, Pori. Saatavissa: <http://www.finsolar.net/porissa-sijaitsevan-koy-aurinkopajan-energiainvestointi/>

TEKES, TEM: Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. Liite 1: Energiateknologian kehitysnäkymät ja mahdollisuudet 2030-2050. <http://tem.fi/documents/1410877/2148188/kansallinen+energia-+ja+ilmastostrategia+vuoteen+2030+24+11+2016+lopull.pdf/a07ba219-f4ef-47f7-ba39-70c9261d2a63>

TEM. 2016. Tuen enimmäismäärät [viitattu 23.8.2016]. Saatavissa: <http://tem.fi/tuen-enimmaismaarat>

Tilastokeskus 2015. Energiatilastot 2015.

Tilastokeskus 2016. Tilastokeskuksen PX-Web-tietokannat. Kaukolämmön tuotanto ja kulu-
tus. [Viitattu 20.7.2016]. Saatavissa:

http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_ene_ehk/?tablelist=true

Tong, Wei. 2010. Wind Power Generation and Wind Turbine Design. WIT Press.

Tulli, 20.5.2016.

http://www.tulli.fi/fi/Suomen_tulli/ulkomaankauppatilastot/katsaukset/toimialat/index.jsp

Vaasa ETT. 2013. Household energy price index. Saatavissa:

<http://www.vaasaett.com/2013/05/european-residential-energy-pricing-report-2013-is-now-available-to-download/>

Valtioneuvosto 2016. Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. <http://tem.fi/documents/1410877/2148188/Kansallinen+energia-+ja+ilmastostrategia+vuoteen+2030+24+11+2016+lopull.pdf/a07ba219-f4ef-47f7-ba39-70c9261d2a63>

Varjotie J.: Haastattelu ja sähköpostit 9/2016.

Vatajankoski. 12.5.2016. Säästötarina: Aurinkosähköä myös isompiin kohteisiin. Saatavissa:

<https://www.vatajankoski.fi/sahakka-blogi/aurinkosahkoa-myos-isompiin-kohteisiin/>

Vehviläinen livo et al. 2010. Rakennetun ympäristön energiankäyttö ja kasvihuonekaasupäästöt. Sitran selvityksiä 39. Saatavissa: http://era17.fi/wp-content/uploads/2010/10/sitran_selvityksia_39.pdf

“Vertical Wind Turbine ANEW-S1.” 2016. Accessed October 24. <http://www.anew-institute.com/vertical-wind-turbine.html>.

Vierros Tuomo, 2009. Investointilaskelmat [verkko-oppimateriaali]. TU-22.1101 Tuotantotalouden peruskurssi [viitattu 20.7.2016]. Saatavissa:

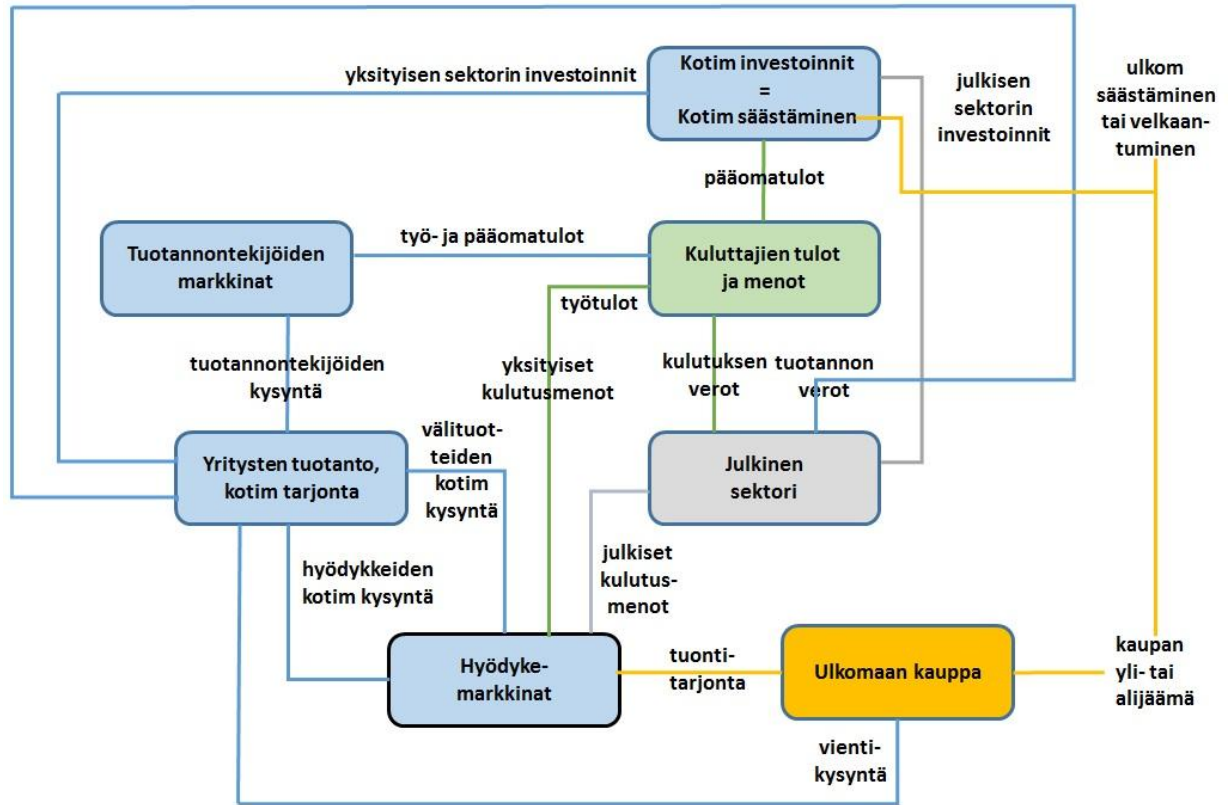
<https://wiki.aalto.fi/display/TU22/8.+Investointilaskelmat>

Watzlaf, G. and Ackman, T. E.: Underground Mine Water for Heating and Cooling using Geothermal Heat Pump Systems. (2006) Mine Water and the Environment. 25:1-14.

LIITTEET

Liite 1. CGE RegFin-laskentamenetelmä

Simulointimallin rakenne on esitetty kuvassa.



Simulointimalli ottaa tuotannon ja tulojen lisäksi huomioon suhteellisten hintojen, talouden päätöksentekijöiden (kotitaloudet, yritykset ja julkinen sektori) epälineaarisen käyttäytymisen ja talouden resurssirajoitteiden kuten työvoiman riittävyyden vaikutukset. Mallissa oletetaan, että taloudessa "kaikki vaikuttaa kaikkeen". Oleellista on talouden sopeutuminen suhteellisten hintojen sopeutumisen kautta uuteen tasapainoon taloudellisissa olosuhteissa tapahtuvien muutosten jälkeen.

Malli on toimialapohjainen, joten sillä voidaan analysoida kaikkia taloudessa tapahtuvia muutoksia, jotka ovat ilmaistavissa toimialatasolla. Erilaisten hankkeiden ja ilmiöiden arvoketjujen määrällinen arviointi on siten mahdollista.

Simulaatiotulokset osoittavat miten suuria taloudellisissa olosuhteissa tapahtuvien muutosten vaikutukset ovat mm. seuraaviin talouden indikaattoreihin: BKT, työllisyys, yksityinen kulutus, verotulot, julkinen kulutus, investoinnit, kotimaan ja ulkomaan kauppa. Simulaatiotulokset ovat luonteeltaan nettomääräisiä esimerkiksi BKT:n laskennassa vähennetään tuonnin (menoerä) arvo, mutta kotimaisessa kysynnässä on mukana viennin arvo (tuloerä).

Mallissa kuvataan sekä tuotannontekijä- että hyödykemarkkinoita. Kukin toimiala tuottaa hyödykkeitä (tavaroita ja palveluita) käyttäen kahta tuotannontekijää: pääomaa (mm. rakennuksia, koneita ja kuljetusvälineitä) ja työvoimaa. Alkutuotannossa ja tutkimustarpeen mukaan

muillakin toimialoilla pääomapanoksesta erotellaan maa-alapanos. Tuotannontekijät, väli- ja lopputuotteet ovat osin korvattavissa keskenään. Keskeistä on tuotannontekijöiden, väli- ja lopputuotteiden sekä kotimaisen ja ulkomaisen kysynnän ja tarjonnan välinen kilpailu.

Yksityinen kulutus perustuu työtuloihin ja julkinen kulutus verotuloihin. Tuotanto myydään hyödykemarkkinoilla oman alueen kuluttajille (yritykset, kotitaloudet ja julkinen sektori), kotimaisen kaupan kautta Suomen muille alueille ja ulkomaankaupan kautta ulkomaille. Alueellinen tuotanto vaatii myös tuontipanoksia, kuten väli- ja lopputuotteita. Näitä alue ostaa kotimaan kaupan avulla Suomen muilta alueilta ja ulkomaankaupan avulla ulkomailta. Investoinnit suuntautuvat toimialoille joilla pääoman tuotto on suurin. Yrittäjien pääomatulot samoin kuin mahdollinen ulkomaankaupan ylijäämä rahoittavat investointeja.

Simulointimallin perusaineisto kattaa Suomen kaikki viisi suuraluetta ja 19 maakuntaa. Maakunta voidaan tarvittaessa jakaa useaan seutukuntaan. Toimialojen lukumäärä on seutukunta- ja maakuntatasolla 30 ja seutukuntatasolla 18. Alatoimialoja voidaan erottaa päätoimialoista tai luoda uusia toimialoja, mikäli tarkentavaa tietoa alatoimialojen kustannus- ja kysyntärakenteista on olemassa. Mallin lisäaineisto kerätään tutkimusongelman tarpeita vastaavaksi, jotta skenaarioiden parametrisointi on tarkka. Aineiston laatu varmistetaan automaattisilla tarkastusrutiineilla jotka varmistavat, että kansan- ja aluetilinpäidon asettamat ja mikro- ja makrotaloustieteen mukaiset reunaehdot täyttyvät.

Simulointimallilla on tehty jo yli 50 määrällistä arviointitutkimusta. Lisää tietoa metodista ja aiemmista raporteista on saatavilla osoitteesta:

www.helsinki.fi/ruralia/asiantuntijapalvelut/regfin.htm

Liite 2. Laskelmien lisätietoja

Laskelmien lähtöarvot. Lähtötiedot, lähteet ja kannattavuuslaskelmat ovat ladattavissa:
<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1rnA7uHyA74x6yIPNIh7Bo1sim1bExpNBQ5HIUZCxfWQ/edit?usp=sharing>

ENERGIALÄHTEET	Arvo	Yksikkö
Kivihiihi (sis. valmistevero, ALV 0%, hinta rannikolla) 6/2016	32,2	eur/MWh
CHP-voimalan hyötysuhde	85	%
Kivihiihen hinta CHP-energiantuotannossa	37,03	eur/MWh
Kivihiihen ja päästöoikeuksien hinta yhteensä	39,38	eur/MWh
Kaukolämmön keskimääräisiä ostohintoja kuluttajille hiilivoimaloiden alueella. Sis. tehomaksu, energiamaksu ja verot, ALV 24%	60-81	eur/MWh
Kaukolämmön ostohinta kunnille ja yrityksille, kun ALV 0%	53	eur/MWh
Kivihiihen hinta sisältäen ilmastomuutoksen ulkoiskustannukset	80-140	eur/MWh
Maakaasun hinta (sis. valmistevero, ALV 0%)	39	eur/MWh
Jyrsinturve	15,38	eur/MWh
Metsähakkeen/-murskeen hinta käyttöpaikalla, ALV 0%	21	eur/MWh
Öljyn ostohinta kuluttajalle, polttoöljy, sis. ALV 24%	84	eur/MWh
Öljyn ostohinta kunnalle ja yritykselle, kun ALV 0%	64	eur/MWh
Vanhan öljykattilan hyötysuhde	80	%
Öljyn hinta kuluttajalle lämmityskäytössä	101	eur/MWh
Öljyn hinta kunnalle ja yritykselle lämmityskäytössä	77	eur/MWh
Pellettijärjestelmän pitoaika	20	vuotta
Uuden pellettikattilan hyötysuhde	90	%
Teollisen kokoluokan pellettijärjestelmän (kattila, kuljettimet ja varastointi) hankintahinta noin	350 000	eur/MW
Pellettijärjestelmän hankintahinta keskiuurissa kohteissa, teho 300 MWh:n kulutuskohteissa noin 160 kW, ALV 0%	300-400	eur/kW
Pellettijärjestelmän avaimet käteen -hankintahinta omakotitaloon, ALV 24%	10000 - 14000	eur
Pelletin ostohinta suurissa voimaloissa	30 - 35	eur/MWh
Pelletin hyötysuhde keskimäärin isoissa voimaloissa (noin 10% hiiltä alhaisempi)	77	%
Pelletin ostohinta keskiuurissa kuntien ja yritysten kohteissa, ALV 0%	40	eur/MWh
Pelletin ostohinta kuluttajille, ALV 24%. Ei sisällä kattilainvestointia eikä sen huoltokustannuksia.	58	eur/MWh
90 MW:n (Katri Vala) lämpöpumpulaitoksen vuosituotanto	420 000	MWh/v
Lämpöpumppujen lämmöntuotannon hyötysuhde COP kaukolämpöverkossa noin (jos huomioidaan jäähdytys niin COP 4)	2,7	
Lämpöpumppujen lämmöntuotannon hyötysuhde COP rakennuksen lämmitysmuotona	3	
Maalämpöpumpun pitoaika, jonka jälkeen uudisinvestointi kolmasosan alkuinvestoinnin arvosta)	20	vuotta
Maalämpöjärjestelmän hankintahinta teollisessa kokoluokassa keskimäärin, alv 0%	750	eur/kW
Keskiuuren maalämpöjärjestelmän (kuntien ja yritysten kiinteistöt) keskimääräinen hankintahinta. Alv 0%. Hinta ei sisällä esim. mahdollisesti tarvittavaa lämminvesivaraajaa.	900 - 1000	eur/kW
Maalämpöjärjestelmän avaimet käteen -hinnat omakotitaloissa (noin 15 000- 20 000 eur), sis. ALV 24%	2000	eur/kW
Sähkön ostohinta, isot yritykset, kulutus yli 2 000 MWh/v. Sis. siirto-	64-83	eur/MWh

maksut, verot ja ALV 0%.		
Sähkön ostohinta pk-yritykset ja yhteisöt. Sis. siirtomaksut, verot ja ALV 0%.	86-111	eur/MWh
Sähkön ostohinta pientaloissa. Sis. siirtomaksut, verot ja ALV 24%. Ei sisällä sähkölämmityslaitteiden investointikustannusta.	115-127	eur/MWh
Sähkön ostohinta taloyhtiöiden asukkaille (2 MWh/v). Sis. siirtomaksut, verot ja ALV 24%. Ei sisällä taloyhtiön sähkönhankinta- ja laitekustannuksia.	180	eur/MWh
Sähkön keskimääräinen siirtohintaa T1-luokassa (esim. kunnat)	3,5	snt/kWh
Isojen aurinkolämpökeräinkenttien LCOE-tuotantohinta Tanskassa ja Itävallassa (laskenta-aika 20 v)	30 - 50	eur/MWh
Aurinkolämpö, 15 000 neliön aurinkokeräinkentän keskimääräinen hankintahinta. Alv 0%. Hinta ei sisällä lämpövarastoa.	280 - 340	€/keräin-neliö
Aurinkolämpöjärjestelmän pitoaika	30	vuotta
Aurinkolämpökeräinkentän huolto- ja ylläpitokustannus	2	eur/MWh
Aurinkolämpökeräinten tuotto kaukolämmön tuotannossa Suomessa	0,5	MWh/keräin-neliö
Aurinkosähköjärjestelmän vuosituotto, Etelä-Suomi	850	kWh/kWp
Aurinkosähköjärjestelmän avaimet käteen -hankintahinta omakotitaloihin ja taloyhtiöihin, sis ALV 24%	1600-2400	eur/kW
Aurinkosähköjärjestelmän avaimet käteen -hankintahinta kuntien ja yritysten kiinteistöihin, ALV 0%	1000-1600	eur/kW
Aurinkosähköjärjestelmien pitoaika	30	vuotta
Aurinkosähkön LCOE-tuotantohinta omakotitaloissa ja taloyhtiöissä, sis. kotitalousvähennys ja ALV 24%	73 – 116	eur/MWh
Aurinkosähkön huolto- ja ylläpitokustannus keskiuurissa kuntien ja yritysten voimaloissa	5	eur/MWh
Tuulivoimalan pitoaika	25	vuotta
Tuulivoiman LCOE-tuotantohinta Suomessa sis. rahoituskustannukset (WACC 5-12%)	49-90	eur/MWh
Tuulivoiman rahoituskustannukset Suomessa noin	6-7	%
Tuulivoiman huolto- ja ylläpitokustannus keskimäärin elinkaaren (25 v) aikana	25	eur/MWh
Sähköpörssin myyntihinta keskimäärin vuonna 2015	29,7	eur/MWh
Sähköpörssin keskimääräisten vuosihintojen vaihteluväli v. 2001-2015	22,8 - 56,6	eur/MWh
OHJAUSKEINOT		
Päästöoikeuksien hinta keskimäärin v. 2015-8/2016	6	eur/tCO ₂
Kivihiilen ominaispäästö 341 gCO ₂ /kWh	0,341	tCO ₂ /MWh
Päästökaupan hinta kivihiilelle	2,35	eur/tCO ₂
Kotitalousvähennyksen osuus pellettijärjestelmän alkuinvestoinnista kotitalouksissa	8	%
Kotitalousvähennys maalämpöjärjestelmän hankkivalle kotitaloudelle (riippuen onko taloudessa 1 vai 2 työikäistä)	2400 - 4800	eur
Energiatuki lämpökeskuksille, joiden lämpöteho on yli 10 MW	0	%
Energiatuki, lämpökeskushankkeet (puupolttoaineet)	10-15	%
Energiatuki lämpöpumppuhankkeet (ei hukkalämpö)	15	%
Energiatuki aurinkolämpöhankkeet	20	%
Energiatuki aurinkosähköhankkeet	25	%

VALTIONEUVOSTON
SELVITYS- JA TUTKIMUSTOIMINTA

tietokayttoon.fi

ISSN 2342-6799 (pdf)
ISBN 978-952-287-382-8 (pdf)

