

Ilmastopaneeli

**ENERGIAJÄRJESTELMÄ JA PÄÄSTÖNVÄHENNYSTOIMET
- YHTEENVETORAPORTTI**

**Suomen ilmastopaneeli
Raportti 5/2013**

ILKKA SAVOLAINEN, MIIMU AIRAKSINEN, HANNELE CANTELL, MARKKU
KANNINEN, SARI LUOSTARINEN, PIRJO PELTONEN-SAINIO, KIM
PINGOUD, KRISTIINA REGINA, SAMULI RINNE, JYRI SEPPÄLÄ, SANNA
SYRI

ENERGIAJÄRJESTELMÄ JA PÄÄSTÖNVÄHENNYSOIMET - YHTEENVETORAPORTTI

ILKKA SAVOLAINEN¹, MIIMU AIRAKSINEN¹, HANNELE CANTELL², MARKKU KANNINEN³, SARI
LUOSTARINEN⁴, PIRJO PELTONEN-SAINIO⁴, KIM PINGOUD¹, KRISTIINA REGINA⁴, SAMULI RINNE⁵,
JYRI SEPPÄLÄ⁶, SANNA SYRI⁵

1 VTT Teknologian tutkimuskeskus

2 Helsingin yliopisto, opettajankoulutuslaitos

3 Helsingin yliopisto, metsätieteiden laitos

4 Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus

5 Aalto-yliopisto

6 Suomen ympäristökeskus

LYHENNELMÄ

Ilmasto- ja energiastrategiassa tulee vastata ilmaston muutoksen hillintä- ja sopeutumishaasteisiin samoin kuin talouden muuttumisesta tuleviin haasteisiin. Energian käyttö aiheuttaa noin 80 prosenttia Suomen kasvihuonekaasujen päästöistä, kun liikenteen energiankäyttö lasketaan mukaan. Energian kysyntä ja sen riippuvuus taloudesta vaikuttavat voimakkaasti kasvihuonekaasujen päästöihin. Strategian tavoitteena voidaan katsoa olevan mm. vähentää kasvihuonekaasujen päästöjä ja edistää talouden rakenteellista muutosta, jotta olisi mahdollista saada aikaan merkittäviä päästövähennyksiä jo seuraavalla vuosikymmenellä ja saavuttaa vähäpäästöinen yhteiskunta (Low Carbon Society) vuosisadan puoliväliin mennessä. Tämä merkitsee päästöttömän energiatuotannon rinnalle yhteiskunnan yleistä resurssien käytön tehostumista, jossa primäärienergian käytön vähentäminen on keskeisellä sijalla.

Energian tuotanto ja käyttö muodostavat järjestelmän, jossa on kytkentöjä eri osasektorien välillä ja toisaalta kytkentöjä energiavaroihin. Yhdellä osasektorilla tehdyt muutokset, kuten päästönrajoitustoimet, vaikuttavat usein muihin osasektoreihin ja jopa päästöihin muissa maissa. Edellä kuvatun tapaiset kytkennät voivat heikentää toimenpiteen päästönvähennysvaikutusta merkittävästi. Samalla toimenpiteen kustannustehokkuus voi alentua. Strategiassa tulisi kiinnittää huomiota saavutettaviin kokonaispäästöjen vähennyksiin ja toisaalta eri sektoreilla tehtävien toimien kustannustehokkuuteen ja rakenteita uudistavaan vaikutukseen.

Tärkeää olisi pyrkiä ohjauskeinojen tasapainoiseen kokonaisuuteen, jossa päästökauppa- ja LULUCF-sektoreilla olisivat käytössä kustannustehokkaat kansalliset ohjaustoimet. Energia- ja materiaalitehokkuutta edistävät toimet ovat myös merkittäviä pitkän aikavälin rakenteellisten uudistusten toteutumisessa.

Suomen tulisi vaikuttaa EU:n ilmasto- ja energiapolitiikkaan niin, että päästökauppaa ohjaa aktiivisesti ilmastotoimenpiteisiin. Päästökaupan riittävän korkea hinta toisi talouteen myös laajan signaalin, jonka perusteella voidaan eri aloilla suunnitella mm. uusiutuvan energian käytön lisäämistä ja energiatehokkuuden parantamista. Kotimaiset tukitoimet fossiilisten polttoaineiden vähentämiseksi tulisi kohdentaa päästökauppa-sektorin ulkopuolelle todellisten päästövähennysten aikaansaamiseksi.

Tämän selvityksen yhtenä tavoitteena on tunnistaa sellaisia toimenpiteitä, joilla on mutkikkaita vaikutusketjuja. Nämä voivat vaikuttaa toimenpiteiden tehokkuuteen kokonaispäästöjen vähentämisessä. Rajallisten voimavarojen takia työ on rajattu kolmeen keskeiseen aihepiiriin, joista kustakin on tämän yhteenvetoraportin lisäksi kirjoitettu oma raporttinsa:

Metsäenergian lisäämisen vaikutus kokonaispäästöihin. - Nykyisessä ilmastoneuvottelujen ja ilmastopolitiikan aihepiirissä on monia avoimia kysymyksiä, joista useat koskevat bioenergian ja ekosysteemin hiilivarastojen käyttöä. Aihepiirissä käydään myös tieteellistä keskustelua, jossa arvostellaan nykyisiä käsittelytapoja. Keskustelun valossa on mahdollista, että bioenergian ja biomassan käyttöä koskevia laskentasaäntöjä muutetaan kansainvälisissä sopimuksissa, EU:n direktiiveissä tai EU:n muussa sääntelyssä. Tämän vuoksi olisi Suomessa perusteltua varautua myös tällaisiin bioenergian ja biomassan käyttöä koskeviin laskentasaäntövaihtoehtoihin, etenkin kun metsien pitkäkiertoinen biomassa on keskeinen osa Suomen teollisuuden ja energiantuotannon resurssipohjaa.

Sähkön ja lämmön yhteistuotanto sekä lämpöpumpit osana rakennusten energiajärjestelmää - Sähkön ja lämmön yhteistuotanto (CHP, combined heat and power) on vähäpäästöinen tapa tuottaa yhdyskuntien lämmitys. CHP:n päästövaikutusten arvioinnissa tulee muistaa että vaihtoehto CHP:llä tuotetulle sähkölle on sekä pohjoismaisella markkinalla että tulevaisuuden yhdentyvällä Euroopan

sähkömarkkinalla yleensä hiililauhdesähkö, jossa lämpöä ei oteta talteen hyötykäyttöön. Tämä huomioiden CHP-lämmön järjestelmätason päästöt ovat tuntipohjaiseen markkinatarkasteluun perustuen pienemmät kuin yleisesti arvioidaan maa- ja ilmalämpöpumpulle, koska lämpöpumput pienentävät pienipäästöistä sähkön ja lämmön yhteistuotantoa, mutta lisäävät suuripäästöistä sähkön erillistuotantoa. Lämpöpumput ovat Suomessa CHP-kaukolämpöä vähäpäästöisempiä järjestelmätasolla vasta silloin, kun päästöoikeuden hinta nousee yli 50 - 100 euron/tonniCO₂ eli ilmastopolitiikka on hyvin kunnianhimoista. Sähkön ja lämmön yhteistuotannossa on kuitenkin järkevää siirtyä hallitusti kohti suurempaa uusiutuvan energian osuutta ottaen huomioon yhtenä reunaehtona kannattavuus päästökaupan oloissa. Energiajärjestelmän suunnittelussa on tehokkaan päästöjen vähentämisen lisäksi huomioitava riittävä oman, vähäpäästöisen sähköntuotantokapasiteetin turvaaminen erityisesti talviaikana. Lisäksi kysynnän hintajoustoon tulisi panostaa kaikilla sektoreilla, ja tuoda pörssin hintasignaalit suoraan tai jopa jyrkennettynä kuluttajille.

Rakennetun ympäristön hajautetut energiajärjestelmät – Rakennuskannassa energian käyttöön vaikuttavat muutokset ovat hitaita ja niiden seuraukset ovat pitkäaikaisia. Rakennuskannassa tehtävien muutoksien on ensisijaisesti pienennettävä primäärienergiankulutusta ja sitä kautta vähennettävä päästöjä. Tämä on tärkeää, sillä myös uusiutuva energia on luonnonvara, jota tulee käyttää säästeliäästi. Rakennuksia, hajautettua energiantuotantoa ja koko energiajärjestelmäämme on tarkasteltava kokonaisuutena. Lämpöpumpuilla ja biomassan perustuvilla tuotantotavoilla on edellytykset integroitua osaksi rakennetun ympäristön hajautettua energiajärjestelmää sopivimmin sähkön ja lämmön yhteistuotantoon perustuvien kaukolämpöverkkojen ulkopuolella. Lämpöpumppujen ilmastoystävällisyyden kehittäminen vaatii kuitenkin ratkaisuja, jolla talviaikainen sähkönkulutus voidaan minimoida. Aurinkoenergian käyttö jäädytetyissä rakennuksissa on suositeltavaa, sillä silloin tuotto ja kulutus on samanaikaista. Biopohjaisen hajautetun tuotannon etuna on sen riippumattomuus sääolosuhteista. Hajautettu energia muuttaa kustannusoptimaalista tuotantorakennetta – erityisesti joustavuudesta tulee entistä arvokkaampaa kun tuuli- ja aurinkosähkö lisääntyy. Käyttäjien ja rakennusten ohjauksen ja ylläpidon rooli on keskeinen kulutusjoustossa. Lisäksi järjestelmien toimivuuden optimointi vaatii uusia varastointiteknologioita ja eri tuotantotapojen hybridijärjestelmiä. Uusiutuvien energioiden käyttöön tulee kannustaa ja tehdä siihen liittyvä pientuotanto mahdolliseksi hajautettujen energiajärjestelmien yhteydessä samalla huomioiden koko energiajärjestelmämme toiminta ja kokonaisuuden päästöjen pienentäminen.

ALKUSANAT

Energian tuotanto ja käyttö aiheuttavat noin 80 prosenttia Suomen kasviuonekaasujen päästöistä. Ilmastopaneeli päätti loppukeväästä 2012 käynnistää energijärjestelmän päästönvähennystoimia koskevan selvityksen, johon osallistuvat ympäristöministeriön tekemillä rahoituspäätöksillä Teknologian tutkimuskeskus (VTT), Aalto-yliopisto, Suomen ympäristökeskus (SYKE), Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus (MTT) sekä Helsingin yliopiston (HY) opettajankoulutuslaitos ja metsätieteiden laitos. Työn tavoitteena on tarkastella aihepiirejä, jotka ovat haasteita ilmasto- ja energiastrategian laadinnassa ja joiden hallintaa tulisi kehittää.

Hankkeen koordinaattorina toimi tutkimusprofessori Ilkka Savolainen (VTT), lisäksi hanketyöryhmään osallistuivat ilmastopaneelin jäsenet Miimu Airaksinen (VTT), Hannele Cantell (HY), Markku Kanninen (HY), Pirjo Peltonen-Sainio (MTT), Jyri Seppälä (SYKE) ja Sanna Syri (Aalto). Lisäksi työhön osallistui useita muita henkilöitä edellä mainituista organisaatioista.

Hankkeesta laadittiin kolme osaraporttia keskeisiksi valituilta alueilta ja tämä yhteenvetoraportti. Työn alustavia tuloksia esiteltiin työ- ja elinkeinoministeriössä ilmasto- ja energiastrategian valmisteluun osallistuville virkamiehille 22.11.2012. Työn kuluessa koko ilmastopaneelille oli varattu mahdollisuus kommentoida raporttia ja tuloksia.

Espoossa 25.1.2013

Ilkka Savolainen
Tutkimusprofessori
Ilmastopaneelin energijärjestelmän päästönvähennyksiä koskevan
selvityksen koordinaattori

SISÄLLYSLUETTELO

	sivu
Johdanto	7
Tausta	
Tavoite ja rajauksia	
Yksityiskohtaisemmat osaselvitykset	
Yleisiä huomiota ilmasto- ja energiastrategiaan	10
Toimien vaikutus kokonaispäästöihin ja päästöjen vähenemisen kustannustehokkuuteen	
Metsäbioenergian ilmastovaikutus	
Energian kulutuksen ja tuotannon yhteensovittaminen	
Hajautetun uusiutuvan energian potentiaalin hyödyntäminen	
Kaupunkien kaukolämpö ja sähkömarkkina	
Päästökaupan ohjausvaikutuksen lisääminen	
Vähäpäästöisten resurssien tuki ei-päästökaupparektorille	
Ohjauskeinojen tasapainoinen kokonaisuus ja toimien suunnittelun läpinäkyvyys	
Metsäenergian lisääminen vaikutus kasvihuonekaasupäästöihin	15
Metsien ja niiden hyödyntämisen vaikutus ilmastomuutokseen	
Ilmastomuutoksen hillinnän tavoitteet	
Ilmastovaikutuksen arviointi	
Varautuminen muutokseen päästöjen laskennassa	
Lämpöpumput ja kaukolämpö energiaenergiajärjestelmässä	20
Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto CHP	
Lämpöpumput	
CHP:n ja lämpöpumppujen päästövaikutukset osana sähköjärjestelmää	
Johtopäätökset	
Rakennetun ympäristön hajautetut energijärjestelmät	24
Rakennuskanta ja sen energian tarve	
Hajautetut energiantuottotavat	
Hajautetut energijärjestelmät osana laajempaa energiaverkkoa	
Kansantaloudelliset vaikutukset	
Johtopäätökset	
Viitteet	30
Hankkeessa laadittiin seuraavat kolme osaraporttia, joihin tämä yhteenvetoraportti suurelta osalta perustuu:	
A. Metsien käytön ja metsäbioenergian ilmastovaikutukset (Pingoud ym. 2013)	
B. Lämpöpumput ja kaukolämpö energijärjestelmässä (Rinne & Syri 2013)	
C. Rakennetun ympäristön hajautetut energijärjestelmät (Airaksinen ym. 2013)	

JOHDANTO

Tausta

Energian käyttö aiheuttaa noin 80 prosenttia Suomen kasvihuonekaasujen päästöistä, kun liikenteen energiankäyttö lasketaan mukaan. Energian kysyntä, ja sen riippuvuus taloudesta, vaikuttaa erittäin paljon kasvihuonekaasujen päästöihin. Ilmasto- ja energiastrategiassa tulee vastata ilmaston muutoksen hillintä- ja sopeutumishaasteisiin samoin kuin talouden muuttumisesta tuleviin haasteisiin. Aiemmin, vielä kymmenkunta vuotta sitten, energiastrategian tavoite oli lähinnä tarjota kohtuuhintaista ja varmaa energiaa teollisuudelle ja muille toiminnoille. Nyt tavoitteena voidaan katsoa olevan mm. vähentää kasvihuonekaasujen päästöjä ja edistää talouden rakenteellista muutosta, jotta olisi mahdollista saada aikaan merkittäviä päästövähennyksiä jo seuraavalla vuosikymmenellä ja saavuttaa vähäpäästöinen yhteiskunta (Low Carbon Society) vuosisadan puoliväliin mennessä. Tätä voidaan pitää merkittävänä paradigman muutoksena.

Käytännössä muutos ei tapahdu nopeasti, vaan huomioon tulee ottaa niin vanhan kuin uudenkin toimintaympäristön vaatimukset. Poliitikassa pyritään siis ottamaan huomioon Suomen vanhan energiaintensiivisen teollisuuden tarpeet ja toisaalta pyritään edistämään päästöjen vähentämistä ja siihen tähtäviä keinoja kuten uusiutuvan energian lisäämistä ja energiatehokkuutta sekä uutta vihreän talouden liiketoimintaa. Sekä uudessa että vanhassa toimintaympäristössä painotetaan työllisyys- ja kansantalousnäkökulmaa. Uuden teknologian vaikutusten arviointi sisältää aina vähintään jossakin määrässä epävarmuutta.

Ilmasto- ja energiastrategia on tärkeä osa kestävään kehitykseen tähtäviä toimia, joihin kuuluvat mm. ympäristövaikutusten rajoittaminen, tässä lähinnä kasvihuonekaasujen päästöjen vähentäminen ja resurssien käytön tehostaminen, sekä vakaan taloudellisen ja sosiaalisen kehityksen edistäminen.

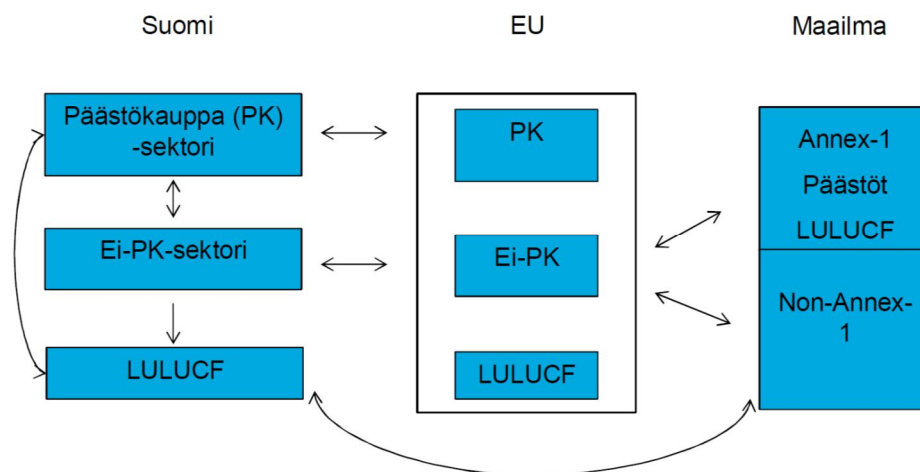
Energian tuotanto ja käyttö muodostavat järjestelmän, jossa on kytkentöjä eri osasektorien välillä ja toisaalta kytkentöjä energiavaroihin. Kasvihuonekaasujen päästöjä ohjataan EU:ssa jaoteltuna kolmeen sektoriin, joilla on erilaiset ohjauskeinot (kuva 1). Sektorit ovat:

- päästökaupparektori,
- ei-päästökaupparektori ja
- LULUCF-sektori (Land Use, Land Use Change and Forestry), josta usein käytetään Suomessa nimitystä nielusektori, koska tällä sektorilla hiilen sitominen ylittää päästöt monissa maissa.

Yhdellä osasektorilla tehdyt muutokset, kuten päästörajoitustoimet, vaikuttavat usein muihin osasektoreihin. Päästökaupparektori käsittää pääosin energian tuotannon ja päästöintensiivisen teollisuuden. Tämän sektorin tärkeimmäksi ohjauskeinoksi on kaavailtu EU:n laajuista päästökauppaa. Ei-päästökaupparektoriin kuuluvat muut päästökaupparektorin ja LULUCF-sektorin ulkopuoliset toiminnot, kuten liikenne, rakennusten erillislämmitys ja maatalous. Tällä sektorilla päästöjen rajoittaminen perustuu mm. jäsenmaiden kansallisiin toimiin, ja samoin tapahtuu myös LULUCF-sektorin ohjaus. Lisäksi energiatehokkuutta edistetään esimerkiksi teollisuudessa ja rakennuksissa, jolloin ohjausvaikutus kohdistuu sekä päästökaupparektoriin että ei-päästökaupparektoriin. Tutkimuksen ja kehityksen tukeminen vaikuttaa samoin kaikkiin sektoreihin.

Päästökaupan lisäksi Suomi on kytköksissä energiahyödykkeiden kaupan kautta muihin EU-maihin ja muuhun maailmaan. Tällaisia kytkentöjä ovat esimerkiksi sähkön ja biopolttoaineiden kauppa tavanomaisen fossiilisten polttoaineiden tuonnin lisäksi. Myös tavanomaiseen kauppaan voidaan katsoa liittyvän sitoutuneita päästöjä (embedded emissions) erityisesti energia- ja päästöintensiivisissä tuotteissa kuten raudassa, alumiinissa ja sementissä sekä paperissa.

Kansainväliset sopimukset vaativat, että maat käyttävät päästöjen raportoinnissa YK:n ilmastosopimukselle Hallitustenvälisen ilmastomuutospaneelin (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) laatimia laskentaohjeita. Samoin Kioton pöytäkirjan velvoitteiden seurannassa päästöt lasketaan käyttäen IPCC:n laskentaohjeita. Suuri osa teollisuusmaista on sitoutunut Kioton pöytäkirjan päästörajoitustavoitteisiin. Parhaillaan ilmastosopimuksen puitteissa neuvotellaan laajasta päästörajoituspöytäkirjasta, joka koskisi myös merkittävimpiä kehitysmaita. Tällainen pöytäkirja voisi tulla voimaan mahdollisesti vuonna 2020.



Kuva 1 Toimintojen aiheuttamat päästöt ja niiden ohjaus voidaan nähdä järjestelmänä, joka kattaa Suomen, muun EU:n ja koko maailman. Yhdellä sektorilla tehdyt päästörajoitustoimet vaikuttavat usein päästöihin muilla sektoreilla, muissa EU-maissa ja muualla maailmassa. Esimerkiksi Suomessa vähennetään liikenteen päästöjä ei-päästökauppasektorilla ostamalla biopolttoaineita tai niiden raaka-aineita Brasiliasta ja Indonesiasta, joissa aiheutuu päästöjä raaka-aineiden tuotannosta. Annex-1 tarkoittaa ilmastosopimukseen liittyneitä kehittyneitä maita ja Non-Annex-1 kehitysmaita. Useimmat Annex-1 maat kuten Suomi ovat sitoutuneet päästörajoitussopimuksiin, Non-Annex-1 maat eivät.

Päästöjä aiheuttavien toimintojen ja niiden muodostamien osasektorien välillä on usein vahva kytkentä. Esimerkiksi jos rakennuskohtaista lämmitystä korvataan kaukolämmöllä, päästöt vähenevät ei-päästökauppasektorilla, mutta lisääntyvät päästökauppasektorilla, jos korvaava energia tuotetaan fossiilisella polttoaineella tai turpeella (Airaksinen ja Vainio 2012). Toisaalta EU:n päästökauppasektorin päästöt eivät tällöin kokonaisuutena kasvaisi, vaan teoriassa vain hinta muuttuisi hiukan. (Lindroos ym., 2011; 2012; Soimakallio ym., 2012)

Myös esimerkiksi lämpöpumppujen käyttö lämmityksessä aiheuttaa päästöjä sähköntuotannossa. Tavallista on myös mitoittaa lämpöpumppu vain osakuormalle, jolloin kovimpien pakkasten aikaan tarvitaan etenkin ilmalämpöpumppujen tapauksessa paljon ulkopuolista lämmitysenergiaa, joka voi olla hyvin suuripäästöistä (Holopainen ym. 2010, Saari ym. 2010). Maalämpöpumppujen tapauksessa muutos on pienempi. Liikenteen sähköistymisessä siirtyy päästöjä myös liikennesektorilta sähköntuotantoon. Toisaalta sähköntuotannon päästöt tulevat useiden skenaarioiden mukaan vähenemään voimakkaasti pitkällä aikavälillä.

Myös bioenergiapotentialit ovat rajallisia. Lisäksi jos käyttöä lisätään yhdellä sektorilla enemmän kuin voidaan lisätä potentiaalin hyödyntämistä, tämä johtaa bioraaka-aineen tuontiin tai muun bioenergian käytön vähenemiseen ja korvautumiseen esimerkiksi fossiilisella polttoaineella. Toisaalta myös metsäbiomassan käytön lisäys vaikuttaa metsäekosysteemin hiilivaraston kehitykseen ja siis ilmakehästä metsään erottuneen hiilen määrään.

Edellä kuvatun tapaiset kytkennät voivat heikentää toimenpiteen päästönvähennysvaikutusta merkittävästi. Samalla toimenpiteen kustannustehokkuus voi alentua. Sektorikohtainen tapa suunnitella ja panna toimeen päästönrajoitustoimia voi johtaa myös toimien vaihtelevaan kustannustehokkuuteen ja kokonaiskustannusten nousuun pyrittäessä tiettyyn päästötasoon.

Aiempi ilmasto- ja energiastrategia sisälsi suurelta osalta varsin perusteltuja suunnitelmia. Nyt tässä raportissa tarkastellaan aihepiirejä, joiden avulla strategiaa ja suomalaisen yhteiskunnan sopeutumista mahdollisimman vähäpäästöiseen järjestelmään voitaisiin kehittää edelleen. Yleisesti voidaan ajatella, että yhteiskunnan rakenteita tulisi kehittää siten että varaudutaan suuruusluokkaa 90 prosentin päästönvähennykseen pitkällä aikavälillä. Tämä merkitsee päästöttömän energiatuotannon rinnalle yhteiskunnan yleistä resurssien käytön tehostumista, jossa primäärienergiankäytön vähentäminen on keskeisellä sijalla. Samalla kun energiajärjestelmää kehitetään päästöjä vähentävään suuntaan, on hyvä kiinnittää huomiota myös muihin haasteisiin kuten esimerkiksi sopeutumiseen muuttuviin ilmastolosuhteisiin.

Kun rakennetaan vähähiilisen yhteiskunnan energiajärjestelmien askelmerkkejä, on tärkeää selvittää seuraavia kysymyksiä:

- Mitkä ovat yhdyskuntien ja energiajärjestelmien rakenteita, jotka mahdollistavat vähäpäästöisyyden resurssitehokkaasti?
- Mitkä tämänhetkiset toimet lukitsevat Suomen energiajärjestelmiä suuntaan, jossa suuri muutos ei ole mahdollinen?
- Miten hajautettu energiantuotanto ja keskitetyt verkot (sähkö ja lämpö) toimivat yhdessä mahdollisimman hyvin, ilman toimien tehokkuutta heikentäviä kerrannaisvaikutuksia?

Tavoite ja rajauksia

Työn tavoitteena on tarkastella aihepiirejä, jotka mutkistavat ilmasto- ja energiastrategian suunnittelua ja joiden hallintaa tulisi mahdollisesti kehittää. Lisäksi tavoitteena on tunnistaa sellaisia toimenpiteitä, joilla on mutkikkaita vaikutusketjuja, jotka voivat vaikuttaa toimenpiteiden tehokkuuteen kokonaispäästöjen vähentämisessä. Samalla kiinnitetään huomiota myös toimenpiteiden muihin vaikutuksiin, kuten uusiutuvan energian käytön lisäämiseen. Työssä arvioidaan myös lyhyesti, mihin tähän mennessä ilmastostrategiassa niukasti käsiteltyihin asioihin olisi hyvä kiinnittää enemmän huomiota.

Yksityiskohtaisemmat osaselvitykset

On olemassa monia energiajärjestelmän osia ja ominaisuuksia, jotka mutkistavat tai edistävät päästöjen rajoittamista. Rajoitettujen voimavarojen takia tässä selvityksessä tarkastellaan yksityiskohtaisemmin vain kuitenkin kolmea aihepiiriä, jotka ovat:

- Metsäenergian lisäämisen vaikutus kokonaispäästöihin

Tämä aihepiiri kytkeytyy metsäekosysteemin hyödyntämiseen, joka on hyvin merkittävää sekä Suomen teollisuustuotannon että energiantuotannon näkökulmasta. Metsäenergian käytön lisäys on merkittävimpiä toimia Suomen ilmasto- ja energiastrategiassa. Metsäenergian hyödyntämisen kasvihuonevaikutuksista on paljon uutta tieteellistä tutkimusta ja tieteellisiä artikkeleita, joista laaditaan yhteenveto erillisessä osaraportissa.

- Sähkön ja lämmön yhteistuotanto sekä lämpöpumput osana rakennusten energiajärjestelmää

Suomessa laaja sähkön ja lämmön yhteistuotanto on parantanut polttoaineiden käytön hyötysuhdetta merkittävästi. Markkinatilanteen vuoksi lämpöpumpuista on tullut suhteellisen edullisia ratkaisuja kotitalouksille, mutta ne kuluttavat yhdistetyn sähkön ja lämmöntuotannon potentiaalia. Aihepiirissä esitetään kvantitatiivinen analyysi eri vaihtoehdoista kasvihuonekaasujen päästöjen rajoittamisen kannalta.

- Rakennetun ympäristön hajautetut energiajärjestelmät

Suomessa energiantuotanto on ollut suhteellisen keskitettyä mm. suurten kaukolämpövoimalaitosten takia. Uusiutuvien energialähteiden potentiaali on usein varsin hajautunutta maantieteellisesti. Pyrittäessä lisäämään uusiutuvan energian käyttöä hajautettu energiantuotanto pystyy hyödyntämään tätä potentiaalia keskitettyä edullisemmin. Työssä esitetään katsaus hajautetun energiantuotannon mahdollisuuksista.

YLEISIÄ HUOMIOITA ILMASTO- JA ENERGIASTRATEGIAAN

Toimien vaikutus kokonaispäästöihin ja päästöjen vähenemien kustannustehokkuuteen

Strategiassa tulisi ottaa huomioon toimien vaikutus kokonaispäästöihin. Usein toimet vähentävät päästöjä kohdesektorilla mutta voivat lisätä päästöjä muilla sektoreilla tai muissa maissa. Esimerkkejä on olemassa lukuisia, mm. liikenteen biopolttoaineiden käyttö vähentää päästöjä liikennesektorilla, mutta lisää päästöjä polttoaineen tuottamisessa esimerkiksi maatalous- ja LULUCF-sektoreilla (Land Use, Land Use Change and Forestry), usein jopa kehitysmaissa. Jos nämä lisääntyvät päästöt otetaan huomioon, kokonaispäästöjen väheneminen voi olla huomattavasti vähemmän kuin jos pelkästään tarkastellaan liikennesektoria. Lisääntyvien päästöjen huomioonotto heikentää myös toimien kustannustehokkuutta merkittävästi.

Toisaalta, jos toimet siirtävät päästöjä päästökaupparektorille, jolla on tiukka päästökatto, ei siirto aiheuta päästöjen kasvua päästökaupparektorilla (vaan ainoastaan päästökaupan hinta hiukan nousee, jolloin hiukan aiempaa useampi päästövähennystoimi tulee päästökaupparektorilla kannattavaksi toteuttaa).

Koska päästörajoitustoimenpiteitä tehdään eri sektoreilla, on olemassa vaara, että toimenpiteet ovat kovin erilaisia kustannustehokkuudeltaan. Tämä seikka nostaa toimien kokonaiskustannuksia ja kuluttaa yhteiskunnan rajallisia voimavaroja. Nykyisellään esimerkiksi päästökaupparektorilla päästöjen rajoittamisen marginaalikustannus (päästökaupan hinta) on noin 4 - 8 euroa / tCO₂, kun taas ei-päästökaupparektorilla marginaalikustannus on jopa lähes kymmenkertainen.

Metsäbioenergian ilmastovaikutus

Nykyisessä ilmastoneuvottelujen ja ilmastopolitiikan aihepiirissä on monia bioenergian ja ekosysteemin hiilivarastojen käyttöä koskevia avoimia kysymyksiä. Aihepiirissä käydään myös tieteellistä keskustelua, jossa arvostellaan nykyisiä käsittelytapoja. Keskustelun valossa on mahdollista, että bioenergian ja biomassan käyttöä koskevia laskentasääntöjä muutetaan kansainvälisissä sopimuksissa, EU:n direktiiveissä tai EU:n muussa sääntelyssä. Esimerkiksi EU:ssa on käsiteltävänä ehdotus, jossa metsäbiomassa laskettaisiin päästökaupassa päästöttömäksi vain, jos se täyttää tietyt kestävyyskriteerit. Tämän vuoksi olisi Suomessa perusteltua varautua myös uusiin bioenergian ja biomassan käyttöä koskeviin päästöjenlaskennan vaihtoehtoihin, etenkin kun metsien biomassassa on tärkeä osa Suomen teollisuuden ja energiahuollon resurssipohjaa.

Puun poltto pienetulisijoissa heikentää paikallista ilmanlaatua sekä aiheuttaa myös merkittäviä mustan hiilen (black carbon) päästöjä, joilla on suhteellisen merkittävä lämmittävä vaikutus erityisesti arktisilla alueilla. Päästöjä voidaan pienentää kehittämällä tulisijoja ja niiden käyttötapoja, siirtymällä pellettien käyttöön sekä tuottamalla bioenergia esimerkiksi aluelämpökeskuksissa tai mikro-CHP-laitoksissa (CHP combined heat and power, lämmön ja sähkön yhteistuotanto), joissa palamisolosuhteet ovat paremmin hallinnassa kuin perinteisissä tulisijoissa. Kiinteistömittakaavan polttoa olisi järkevää ohjata mahdollisimman tehokkaaseen energian talteenottoon ja palamisprosessiin. Tämä edellyttää teknologian kehittämistä ja laajaa käyttöönottoa. Se toisi myös vientimahdollisuuksia kotimaiselle alan teknologialle.

Energian kulutuksen ja tuotannon yhteensovittaminen

Suomen olosuhteissa sähkön ja lämmön kulutus vaihtelee sekä vuorokauden että vuodenajan suhteen. Lisäksi esimerkiksi aurinkoenergian ja tuulienergian saatavuus vaihtelee olosuhteista riippuen. Kovimmilla pakkasilla lämmityksen tarve on suurin, mutta silloin erityisesti aurinkoenergian ja ilmalämpöpumpulla saatavan energian saatavuus on heikointa. Maalämpöpumppuja ei kustannussyistä juuri lainkaan mitoiteta suurimman lämmöntarpeen mukaan, jolloin sähköenergian kulutus kasvaa huomattavasti kovilla pakkasilla.

Näihin haasteisiin voidaan vastata pyrkimällä eri keinoilla vähentämään huipputehon tarvetta sekä sovittamaan tuotannon ja kulutuksen vaihteluita yhteen (ns. smart grid). Keinoja voivat olla esimerkiksi lämmön varastointi (ja periaatteessa myös sähkön varastointi, toistaiseksi ainoastaan vesivoimavarastointi on kustannustehokasta), energian käytön jousto sekä rakennusten lämmitys- ja jäähdystystarpeen minimointi hyvällä suunnittelulla. Tärkeä ohjaava tekijä voisi olla hintasignaali, joka viedään loppukäyttäjälle sellaisenaan tai jopa jyrkennettynä. Lämpöpumput olisi hyvä mitoittaa maksimitehon tarpeen mukaan, ja tämä tulisi huomioida esimerkiksi julkisissa tuissa. Biopolttaineiden avulla on mahdollista kattaa kulutushuippuja ja tuotantotilanteita, joissa muiden uusiutuvien energialähteiden tuotanto on vähäistä.

Hajautetun uusiutuvan energian potentiaalın hyödyntäminen

Suomen asutusrakenne koostuu karkeasti luokitellen muutamista suurista kaupungeista, pienehköistä maaseudun keskustaajamista sekä haja-asutusalueista. Myös näihin sopivimmat energiajärjestelmät ovat erilaiset: suurissa kaupungeissa on jo laajasti käytössä sähkön ja lämmön yhteistuotanto, ja

tulevaisuudessa sen edelleen kehittäminen kohti vähäpäästöisyyttä on luonnollinen kehityssuunta. Pienehköissä keskustaajamissa on viime vuosina laajasti siirrytty öljypohjaisista keskuslämmitysjärjestelmistä puubiomassan käyttöön (hake, pelletit). Harvaan asutuilla haja-asutusalueilla luonnolliset järjestelmäratkaisut ovat kiinteistökohtaisia. Myös pienen mittakaavan maaseutumaisen yhteisöjen kehittäminen voisi olla järkevää niin, että asutuksen tiheys sallisi kustannustehokkaasti muutakin kuin kiinteistökohtaisia järjestelmiä (erityisesti pienet lämpöverkot ovat kustannustehokkaita vain lyhyillä etäisyyksillä).

Uusi teknologia tekee aiempaa helpommaksi ja halvemaksi hyödyntää paikallisia energiavaroja kuten biomassaa, maan tai ilman lämpöä tai auringon säteilyä. Integroituna rakennuksiin voidaan saavuttaa huomattava vähenemä ulkopuolelta hankittavasta energiasta ja myös merkittävä vähenemä päästöissä.

Esimerkiksi pienen mittakaavan biomassapolttoaineiden kaasutusteknologia on lupaava vaihtoehto pienten taajamien ja kyläyhteisöjen kokoluokkaan. Tämä mahdollistaisi nykyisiä lämmitysjärjestelmiä tehokkaamman biomassan käytön siinä mielessä, että lämmön lisäksi saataisiin myös sähköä, joka on jalostusarvoltaan arvokkaampaa kuin lämpö. Teknologian kotimaisen käyttöönoton tukeminen olisi järkevää sekä päästöjen vähentämismielessä että tukemaan alan yritysten viennin kehitystä.

Maatiloilla voitaisiin tuottaa pieniä määriä energiaa lannan ja lisämateriaalien biokaasutuksella. Biokaasutuotannon tuomat päästövähennykset olisivat vähäiset energiasektorilla, mutta huomattavat maatalous- ja LULUCF –sektoreilla. Suomessa maatalouspolitiikan seurauksena raivataan lisää suopeltoja, joilta vapautuu suuria määriä hiilidioksidia ja dityppioksidia. Uusia peltoja raivataan, jotta kotieläinten lantaa voitaisiin sijoittaa aiempaa enemmän peltoon ravinnekuormituksen rajojen ylittymättä. Pelloilta tulevien kasvihuonekaasujen päästöjen lisääntyminen saataisiin käännettyä laskuun, jos lannankäsittelyn tuottamalla energialla voitaisiin erottaa lannasta fosforipitoinen kuivajae. Kuivajaetta voitaisiin kannattavasti kuljettaa kauemmaksi tilakeskuksesta ja vältettäisiin uuden pellon raivaaminen vain lannanlevitystä varten. Lannan vastaanottaminen olisi hyödyksi kivennäismaiden hiilitaseelle ja vähentäisi väkilannoitteiden tarvetta.

Aurinkolämmityksen lisääminen olisi järkevintä sähkön ja kaukolämmön yhteistuotannon alueiden ulkopuolelle. Tätä ei kuitenkaan pitäisi nähdä riittävänä lisänä sallimaan suora sähkölämmitys, jossa sähköä saatetaan käyttää melko tuhlaavasti. Suorasta sähkölämmityksestä olisi resurssitehokkuuden vuoksi järkevää siirtyä lämpöpumppuihin tai pellettilämmitykseen. Kulutushuippujen leikkaamiseen tarvittaisiin kuitenkin lisätoimia.

Aurinkolämmön yhteensopivuutta kaupunkien sähkön ja lämmön yhteistuotannon järjestelmiin tulisi tutkia lisää, jotta löydettäisiin tavat hyödyntää aurinkolämpöä ilman toimien tehokkuutta heikentäviä kerrannaisvaikutuksia. (Lämmön ja sähkön yhteistuotannon vähentäminen ei ole järkevää, jos korvaavana sähköntuotantona on hiililauhde muualla sähköjärjestelmässä).

Aurinkosähkön lisääminen on järkevää kohteisiin, joissa on kesäaikana sähkönkulutusta, esimerkiksi toimistorakennuksiin. Tällöin rakennuksen oma tuotanto korreloi kysynnän kanssa.

Yhteiskunnan tukipolitiikalla kannattaa vaikuttaa kotimaassa etenkin sellaisen uuden teknologian kehittämiseen ja käyttöönottoon, jonka kustannustehokkuus markkinoilla ei ole kilpailukykyinen, mutta edistämisen katsotaan pitkällä tähtäyksellä olevan kansantaloudellisesti mielekästä. Tällaiset teknologia-alueet liittyvät etenkin vähäpäästöiseen ja resurssitehokkaaseen energiatuotantoon sekä energiajärjestelmien kulutushuippujen tasaamiseen ja käyttäjien energiakulutustottumusten ohjaukseen.

Tällaisissa tarkasteluissa on erittäin tärkeää kokonaisuuden ymmärtäminen, niin että resurssitehokkuus ja vähäpäästöisyys tulevat kokonaisuuden kannalta optimoiduiksi. Kotimarkkinoiden vähäpäästöisen energian kysyntään voidaan vaikuttaa suorien rahallisten tukien, avustusten ja verotuksellisten keinojen lisäksi luomalla olosuhteet helpoksi asioiden toteutukselle. Energiatuotantoon ja -tehokkuuteen liittyvän teknologia- ja suunnitteluosaamisen vientitoiminnan laajamittainen kasvattaminen edellyttää toimivia kotimarkkinoita.

Kotimaisen energian lisäämisellä on myös merkittäviä positiivisia vaikutuksia kauppataseeseen ja kansantalouteen. Öljyn tuonti on merkittävä kustannus Suomelle ja siksi öljyn korvaaminen erityisesti kotimaisella uusiutuvalla energialla olisi perusteltua. Öljyn lämmityskäyttö on suurelta osin päästökaupparektorin ulkopuolella (kiinteistölämmitys, maa- ja metsätalous), joten kotimaiset tukitoimet kohdistuisivat ”oikein”. Kaupunkien suuren mittakaavan yhteistuotantjärjestelmissä öljy on pakkaskauden lisäpolttoaine, joka yleensä kuuluu päästökauppaan.

Kaupunkien kaukolämpö ja sähkömarkkina

Kaupunkien suuren mittakaavan sähkön ja lämmön yhteistuotannossa käytetään tällä hetkellä pääosin fossiilisia polttoaineita, turvetta sekä jonkin verran biomassaa, usein turpeen kanssa. Yleisesti ottaen sähkön ja lämmön yhteistuotannon vähentäminen ei ole järkevää kerrannaisvaikutusten vuoksi. Yhteistuotantolaitokset käyttävät polttoaineen erittäin resurssitehokkaasti, kaasua käyttävillä laitoksilla myös sähköntuotannon hyötysuhde on erittäin hyvä. Jos siirrytään vaihtoehtoihin lämmitysmuotoihin, lisätään muuta kulutusta ja lisätään fossiilisen lauhdetuotannon käyttöä samalla sähkömarkkinalla.

Päästöjen vähentämisessä keskeiset keinot ovat:

- Hallittu siirtyminen kohti suurempaa uusiutuvan energian osuutta tuotannossa huomioon ottaen yhtenä reunaehtona kannattavuus päästökaupan oloissa. Teknologisia mahdollisuuksia on useita (esim. hake, pelletit, torrefioidut pelletit, kierrätyspolttoaine kivihiilen korvaajina, biokaasu tai SNG maakaasun korvaajana). Erilaisen polttoaineen tuominen olemassa olevaan laitokseen voi olla järkevintä vaiheittaisena oppimisprosessina. Lisäksi uusien voimalaitosten rakentamisen myötä sähkön ja lämmön yhteistuotantjärjestelmissä ollaan siirtymässä kohti monipolttoainevaihtoehtoja. Kaikissa rakennettavissa uusissa voimaloissa tulisi olla tekninen valmius siirtyä suurempaan uusiutuvan ja mahdollisesti kierrätyspolttoaineen osuuteen.
- Kaukolämpöverkkojen avaaminen muille tuottajille. Tämä edellyttää kaikille osapuolille järkevää hinnoittelua. Mikäli paikallinen asemakaava edellyttää kaukolämpöön liittymistä, tulevaisuudessa edellytyksenä voisi ehkä olla myös verkon avaaminen muille tuottajille.
- Lämmön varastointi (lyhytaikaisena rakennuksiin, pitkäaikaisena lämpövarastoihin) ja sitä kautta koko sähkömarkkinalle saatava lisäjouston mahdollisuus. Uudet ratkaisut parantaisivat myös prosessien ja muun hukkalämmön nykyistä paremman hyödyntämisen kaukolämpöverkon energialähteenä. Tämä on lähitulevaisuudessa yhä tärkeämmäksi nouseva teema koko pohjoiseurooppalaisen sähkömarkkinan näkökulmasta.
- Päästöttömät vaihtoehdot huippukattiloihin, kysynnän hintajousto ja hintasignaalit sellaisenaan tai jopa jyrkennettynä loppukuluttajille.
- Matalalämpötilakaukolämpö uusilla asuinalueilla (saavutetaan parempi sähköntuotannon hyötysuhde, verkon ”häntien” riittäminen uusille matalaenergiataloille, mahdollisesti helpompi aurinkolämmön hyödyntäminen, mutta kerrannaisvaikutusten selvittäminen tärkeää).

Päästökaupan ohjausvaikutuksen lisääminen

Päästökauppasektorilla tehdään päällekkäistä ohjausta eri instrumenteilla. Uusiutuvan energian määrätavoitteet ja tuki kohdistetaan suureksi osaksi tälle sektorille, jolloin nämä toimet alentavat päästökaupan hintaa ja syövät päästökaupan ohjausvaikutusta. Päällekkäistä ohjausta ei voitane täysin välttää, mutta tässä tapauksessa päällekkäisyys on hyvin ilmeistä ja haitallista.

Käytännössä päästökauppa on jäänyt toissijaiseksi ohjauskeinoksi, vaikka se olisi hyvin kustannustehokas ja kohdistaisi kustannukset saastuttajalle (saastuttaja maksaa -periaate). Se asettaisi myös kaikki teknologiat päästöjen vähentämisen kustannustehokkuuden suhteen samaan asemaan. Näintalouden toimijat, joilla on julkista valtaa tarkempi tieto eri teknologioiden tehokkuudesta, valitsisivat käyttöön otettavat ratkaisut. Julkisen vallan ei tarvitsisi kehittää mutkikasta tukitoimien verkkoa eikä kohdistaa niukoista yhteiskunnan varoista rahoitusta konkreettisille päästöjä vähentäville toimille. Päästökaupan hinta toisi talouteen myös laajan signaalin, jonka perusteella voidaan eri aloilla suunnitella mm. energiatehokkuuden parantamista.

Päästökauppaan perustuva päästöjen vähentämisen järjestelmä rajoittaisi vähiten talouden kehitystä ja olisi siten sopiva Suomelle ja muulle Euroopan Unionille, joita tulee rasittamaan talouden hidas kasvu lähivuosina. On olemassa runsaasti teknisiä ratkaisuja, jotka kohtuuhintaisen päästökaupan oloissa tulisivat käyttöön ja synnyttäisivät uutta taloudellista toimintaa. Suomen energia- ja ympäristötekniikan alalla toimiva teollisuus ja palveluyritykset voisivat hyötyä huomattavasti uusista markkinoista.

Suomen kannattaisi harkita vaikuttamista EU:n ilmasto- ja energiapolitiikkaan niin, että päästökauppaa painotetaan selvästi lisää suhteessa muihin ohjauskeinoihin ja päästökaupan hinta nousee kohtuulliselle tasolle. Päästökaupan hallintajärjestelmää voitaisiin myös mahdollisesti kehittää vastaamaan mm. liian alhaisiin tai korkeisiin päästökaupan hintoihin esimerkiksi niin, että päästökaupan keskushallinto voisi ostaa markkinoilta päästöoikeuksia tai myydä niitä lisää.

Vähäpäästöisten resurssien tuki pääosin ei-päästökauppasektoriin

EU:n päästöjen vähentämisyjärjestelmä muuttuu merkittävästi v. 2013 alusta lähtien. Kansalliset vähentämisvelvoitteet kohdentuvat enää päästökaupan ulkopuolisiin aloihin. Päästökauppaan kuuluvien toimien ohjauksen tulee muodostua riittävän korkeaksi kehittyvästä CO₂-päästöjen hinnasta. Tämä tulisi ottaa huomioon kansallisten tukitoimien suunnittelussa siten, että kansallinen tuki vähäpäästöisille resursseille, kuten biomassalle, ohjattaisiin valtaosin päästökauppasektorin ulkopuolelle, kun päästöoikeuden hinta on riittävän korkea.

Tukea suunniteltaessa tulisi ottaa huomioon vaatimus voimavarojen tehokkaasta käytöstä myös vähäpäästöisen resurssin tapauksessa. Päästökauppasektorilla puolestaan toteutuu saastuttaja maksaa -periaate, joka puolestaan ohjaa tehokkuuteen. Biomassan kohdalla tehokkuus on tärkeää, jotta varmistettaisiin biomassan riittävyys yhteiskunnan eri tarpeisiin tulevaisuudessa.

Ohjauskeinojen tasapainoinen kokonaisuus ja toimien suunnittelun läpinäkyvyys

On tietenkin selvää, että muitakin keinoja kuin päästökauppaa tarvitaan mm. liikennesektorilla ja rakennusten energiatehokkuudessa sekä maataloudessa ja LULUCF-sektorilla. Rakennusten energiatehokkuutta on tarkoituksenmukaista säädellä primäärienergiankulutusta pienentämällä, sillä päästöperusteinen ohjaus ei välttämättä johda resurssitehokkuuteen. Liikennesektorilla päästökaupan vaikutus polttoaineen hintaan olisi suhteellisen pieni ja, siksi tarvitaan lisätoimia. Maataloudessa ja LULUCF-sektorilla on energiasektoriin verrattuna hyvin erilainen ohjausjärjestelmä.

Tärkeää olisi saavuttaa tasapainoinen ja vakaa ohjauskeinojen kokonaisuus, joka ohjaisi toimintoja pienillä talouden kokonaiskustannuksilla ja samalla päästöjä vähentäviä innovaatioita edistäen kohti vähäpäästöistä yhteiskuntaa.

Päästörajoitustoimien suunnittelun läpinäkyvyys ja eri osapuolien osallistumismahdollisuus edistäisivät myös kokonaisuuden kannalta optimaalisten ratkaisujen syntymistä. Ilmastolaki voisi mahdollisesti tarjota puitteet tällaiselle toimien suunnittelulle.

METSÄENERGIAN LISÄÄMISEN VAIKUTUS KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖIHIN

Metsien ja niiden hyödyntämisen vaikutus ilmastonmuutokseen

Bioenergia on maailman mitassa merkittävin uusiutuvan energian lähde. Uusiutuvan energian osuus maailman primaarienergiasta oli vuonna 2008 noin 13 %, josta bioenergiaa oli valtaosa, noin 10 % eli 50 EJ (eksajoulea = 10^{18} joulea). Bioenergiasta noin 87 % on puuperäistä, 10 % maatalousperäistä ja 3 % jätteistä (IPCC 2011, s. 217).

Uusiutuvan energian käyttöä pyritään lisäämään maailmassa mm. osana ilmastonmuutoksen hillitsemistoimia ja energiaomavaraisuuden parantamista. Näissä suunnitelmissa bioenergia säilyisi maailmassa yhtenä merkittävimmistä uusiutuvan energian lähteistä.

Suomen kotimainen bioenergian tuotanto perustuu pääosin metsäbiomassaan, jota saadaan suoraan metsätaloudesta ja toisaalta metsäteollisuuden sivuvirroista. Myös Suomessa ollaan lisäämässä voimakkaasti bioenergian hyödyntämistä, ja lisäksi metsäteollisuus, joka on Suomen merkittävimpiä teollisuudenaloja, perustuu metsäraaka-aineen hyödyntämiseen.

Bioenergia kytkeytyy hiilen kiertoon maaekosysteemien ja ilmakehän välillä. Myös meret kytkeytyvät tällaisessa kierrossa ilmakehään.

Metsäekosysteemin biomassaa voidaan käyttää periaatteessa kahdella tavalla ilmastonmuutoksen hillintään. Biomassaa voidaan käyttää korvaamaan fossiilisia polttoaineita, jolloin vältetään fossiilisten polttoaineiden suhteellisen suuria kasvihuonekaasujen päästöjä. Toinen tapa on kasvattaa biomassan varastoja metsäekosysteemissä tai metsätuotteissa, jolloin ilmakehästä poistettua hiiltä varastoituu näihin. Näitä keinoja voidaan käyttää rinnakkain, mutta useissa tapauksissa ne syövät toistensa potentiaalia.

Hiilidioksidin ilmakehästä tapahtuvan hitaan poistumisen takia ilmastonmuutoksen hillintää tarkastellaan yleensä ajasta riippuvasti. Kun pyritään rajoittamaan lämpötilan nousu 2-3 °C tasolle, tarkastellaan tavallisesti sadan vuoden aikajännettä. Metsän kasvukierron pituus pohjoisissa olosuhteissa on samaa luokkaa. Kun siis arvioidaan metsäenergiaa ja hiilen varastoimista metsäekosysteemiin, ollaan aidosti dynaamisissa, ajasta riippuvissa tarkasteluissa, ei tasapainotilassa.

Biomassan hyödyntämiseen liittyy hiilidioksidin sitoutumisen ja vapautumisen lisäksi myös muita maapallon lämpenemiseen vaikuttavia tekijöitä, jotka tunnetaan kuitenkin suhteellisen epävarmasti. Poltosta vapautuu tekniikasta ja käyttötavoista riippuen hyvin pieniä määriä metaania ja dityppioksidia, joilla on lämmittävä vaikutus. Lisäksi aiheutuu hiukkaspäästöjä, joilla on viilentävä vaikutus. Tästä poiketen kuitenkin mustalla hiilellä on lämmittävä vaikutus. Lisäksi hakkuut vaikuttavat paikalliseen heijastuskertoimeen (albedoon) ja ilman kosteusoloihin, jotka voi vaikuttaa lämpenemiseen. Metsästä sinänsä vapautuu myös aerosoleja, joilla on varsin epätarkasti tunnettu viilentävä vaikutus. Tavallisesti

biomassan hyödyntämisen ilmastovaikutusta tarkastellaan vain hiilidioksidin päästöjen ja sitoutumisen pohjalta, mutta etenkin metsänhoidon vaikutus heijastuskertoimeen ja mustan hiilen päästöt voivat olla merkittäviä ja vaativat lisää tutkimusta.

Metsien käyttöä pidetään usein ilmaston kannalta neutraalina silloin, kun huolehditaan metsien uudistumisesta ja niiden kestävästä hoidosta. Viime vuosina on kuitenkin julkaistu lukuisia tieteellisiä artikkeleita, joissa eritoten metsäbioenergian hyödyntämisen ilmastoneutraalisuus on kyseenalaistettu.

Päästönrajoituspöytäkirjojen biomassaa, nieluja ja hiilivarastoja koskeva osuus on muuttunut Kioton pöytäkirjasta sopimisen jälkeen. Myös EU on pohtimassa biomassan käytön päästöjen huomioonottamistapoja päästökaupassa ja toisaalta nestemäisten biopolttoaineiden kestävyyskriteereissä.

Seuraavaksi esitetään yhteenveto tehdystä tarkastelusta (Pingoud ym. 2013), jossa arvioidaan tieteellisen kirjallisuuden valossa metsäbiomassan hyödyntämisen ilmastovaikutuksia, ilmastonmuutoksen hillinnän aikajäniteitä ja metsäbioenergian hyödyntämistä Suomen näkökulmasta.

Ilmastonmuutoksen hillinnän tavoitteet

YK:n ilmastosopimuksen tavoitteet on kirjoitettu sopimuksen artiklassa 2:

1. tavoitteena on vakauttaa ilmakehän kasvihuonekaasujen pitoisuuksien nousu vaarattomalle tasolle, joksi esimerkiksi Kööpenhaminan sitoumuksen perusteella voidaan tulkita kahden asteen lämpötilan nousua vastaava taso, ja
2. toisaalta tavoitteena on rajoittaa ilmaston muutosnopeus sellaiseksi että ekosysteemien sopeutuminen, ravinnontuotanto ja taloudellinen toiminta eivät vaarannu.

Näistä kahdesta jonkin verran erilaisesta tavoitteesta tulee haasteita politiikkatoimien valintaan. Tavoitteeseen 1 pyritään lähinnä rajoittamalla niiden kasvihuonekaasujen päästöjä, jotka pysyvät ilmakehässä kauan, kuten hiilidioksidi ja dityppioksidi. Sekä hiilidioksidin että dityppioksidin elinaika ilmakehässä on noin sadan vuoden luokkaa. Sen sijaan tavoitteeseen 2 on järkevää pyrkiä rajoittamalla sellaisia lämmittäviä päästöjä, joiden elinaika ilmakehässä on lyhyt, jolloin päästöjen pieneneminen alentaa melko nopeasti näiden aineiden pitoisuutta ilmakehässä ja hidastaa säteilypakotteen kasvua sekä ilmaston muutosnopeutta. Tällaisia lyhytikäisiä päästöjä ovat mm. metaani ja musta hiili. Metaanin elinaika ilmakehässä on noin kymmenen vuotta ja mustan hiilen luokkaa viikko.

Viime vuosina tavoite 1 on ollut keskeisimmin esillä ilmastopolitiikassa. Ilmakehän pitoisuuksien kasvun pysäyttäminen kahden asteen lämpötilaa vastaavalle tasolle (esimerkiksi ns. RCP2.6-skenaario, van Vuuren ym. 2011) merkitsisi maailman päästöjen alenemista 90 % sadan vuoden aikana ja kehittyneissä maissa jopa 50 vuodessa. Päästönrajoituspolitiikan aikahorisontti, jota tarkastellaan, on siis luokkaa 50 – 100 vuotta.

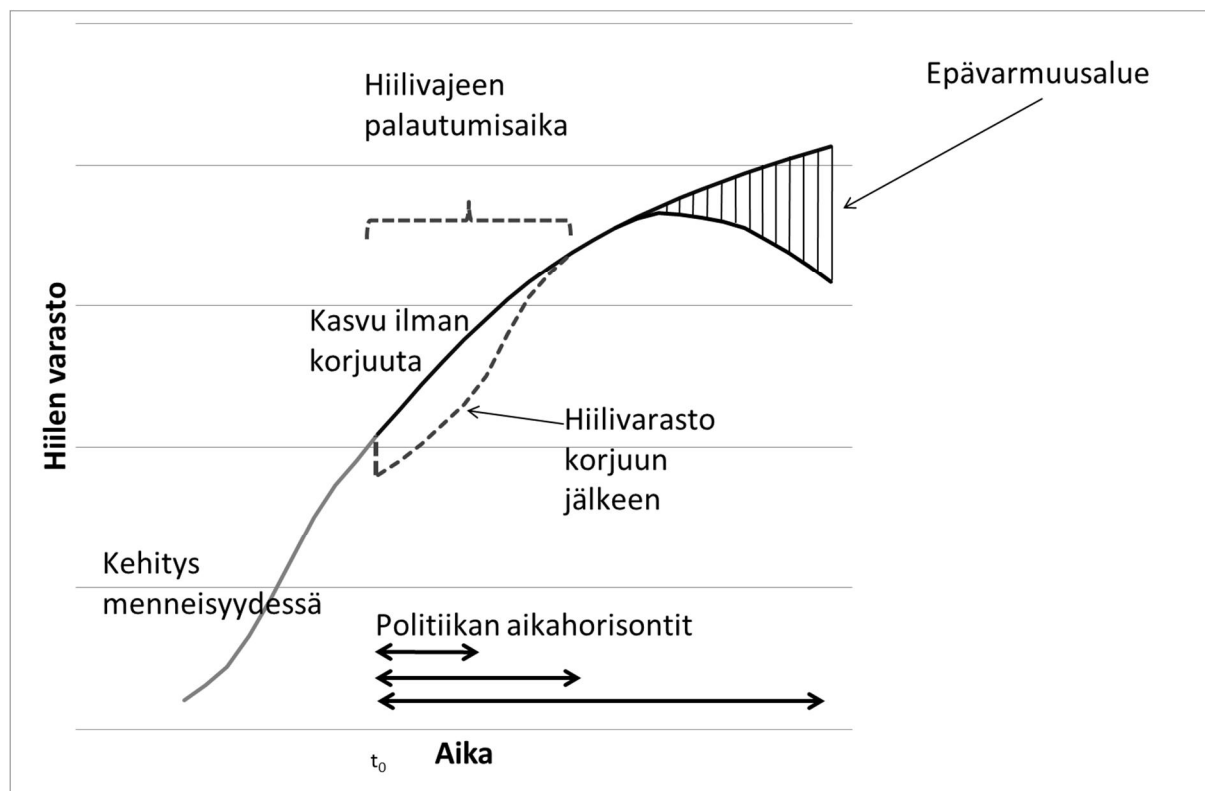
Päästöjä koskevia toimia voidaan arvioida eri näkökulmista siltä kannalta, miten toimet vaikuttavat tavoitteiden 1 ja 2 saavuttamiseen.

Ilmastovaikutuksen arviointi

Maiden päästöjen raportointi tapahtuu noudattaen IPCC:n laatimia ohjeita. Ilmastosopimukselle tapahtuva raportointi on periaatteessa kattavaa. Ohjeet koskevat tapahtuneita päästöjä, ja raporttien avulla voidaan arvioida, ovatko maat täyttäneet esimerkiksi Kioton pöytäkirjan velvoitteet. Kioton pöytäkirja tosin rajoittaa voimakkaasti hiilinielujen käyttöä velvoitteiden täyttämässä. Myös Kioton

toinen velvoitekausi rajoittaa nielujen käyttöä, mutta samalla se velvoittaa maat tiettyyn miniminieluun (ns. referenssitaso). Suomen nielun vähimmäistaso on 20,5 TgCO₂ /a, ja kun tähän lisätään suurin hyödynnettävä määrä, 2,5 TgCO₂ /a, niin näiden summan 23 TgCO₂ /a ylittävällä nielulla ei ole enää merkitystä Suomen päästovelvoitteen täyttämiseksi. Toisaalta Suomen metsien pinta-alan vähenemisestä aiheutuu pieni lisäpäästö, koska metsäkadon päästöä ei enää toisella velvoitekaudella saa kompensoida metsänielulla. Tämän seurauksena metsäsektori muodostaa toisella velvoitekaudella päästölähteen, mutta metsien kohtuullinen lisäkäyttö ei kuitenkaan lisää laskennallisia päästöjä.

Todellisuudessa bioenergian käytön lisääminen kuitenkin heikentää metsien nieluja ja kasvattaa ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta lyhyellä aikavälillä biomassavarastojen dynaamisten muutosten sekä metsäkadon seurauksena, mikä olisi otettava huomioon esimerkiksi globaaleissa päästönvähennysskenaarioissa: tämä merkitsee, että tiettyjen vähennysskenaarioiden toteuttamiseksi fossiilisia hiilidioksidipäästöjä pitää vähentää aiemmin oletettua enemmän, jos bioenergian rooli uusiutuvan energian kokonaisuudessa on keskeinen.



Kuva 2 Periaatteellinen kuva hiilen määrästä metsäekosysteemissä, kun biomassaa ei korjata tai korjataan. Hiilen määrä palautuu alkuperäiselle uralle kasvukierron mittaan. Korjuun vaikutus on luonnontilaista kehitystä vastaavan ja korjuun huomioon ottavan käyrän erotus (tai erotuksen integraalin vaikutus ilmakehän pitoisuuteen ja säteilypakotteeseen). Poliitiikan aikahorisontit voivat olla erilaisia suhteessa hiilen määrän palautumisaikaan (Helin ym. 2012)

Useiden viime vuosina julkaistujen tieteellisten artikkeleiden mukaan yleisesti käytetty oletus biomassan käytön päästöttömyydestä on approksimaatio (likiarvo) silloinkin kun se ei aiheuta suoranaista muutosta maankäytössä, esimerkiksi metsäkatoa. Oletus pätee melko hyvin lyhytkiertoisien biomassan tapauksessa (kun lannoitteiden päästöjä ei huomioida), mutta pitkäkiertoisien biomassan tapauksessa

tilanne on monimutkaisempi ja riippuu tarkastelujaksosta. Mitä pitempi tarkastelujakso (politiikan aikahorisontti), sitä pienempi on biomassan korjuun aiheuttaman hiilivelan vaikutus suhteessa fossiilisiin energialähteisiin (kuva 2); päästövähennysten kiireellisyys takia myös lyhyemmän aikavälin vaikutukset on otettava huomioon.

Toisaalta asiaa voidaan tarkastella myös resurssien kannalta: biomassassa on keskeinen uusiutuva resurssi. Olemassa olevien talousmetsien jättäminen vaille käyttöä tekisi huomattavan vajeen uusiutuvien materiaalien ja energian resurssipohjaan, vaikka samalla ilmakehästä siirtyisi hiiltä pois varastoon ekosysteemiin. Tässä on lisäksi varauduttava metsätuhoon kasvamiseen vanhoissa metsissä ja erityisesti vielä ilmaston muuttumisen seurauksena.

Keskeinen kysymys on, miten päästönlaskentasäännöt kannustaisivat metsien käyttöä ”oikeaan” suuntaan. Oikea suunta riippuu kuitenkin myös siitä, miten painotetaan toisaalta pitkän ajan ilmastonmuutoksen hillinnän tavoitteita (2 °C -tavoite) ja toisaalta lyhyen ajan tavoitteita (lämpötilan nousunopeuden hillintä).

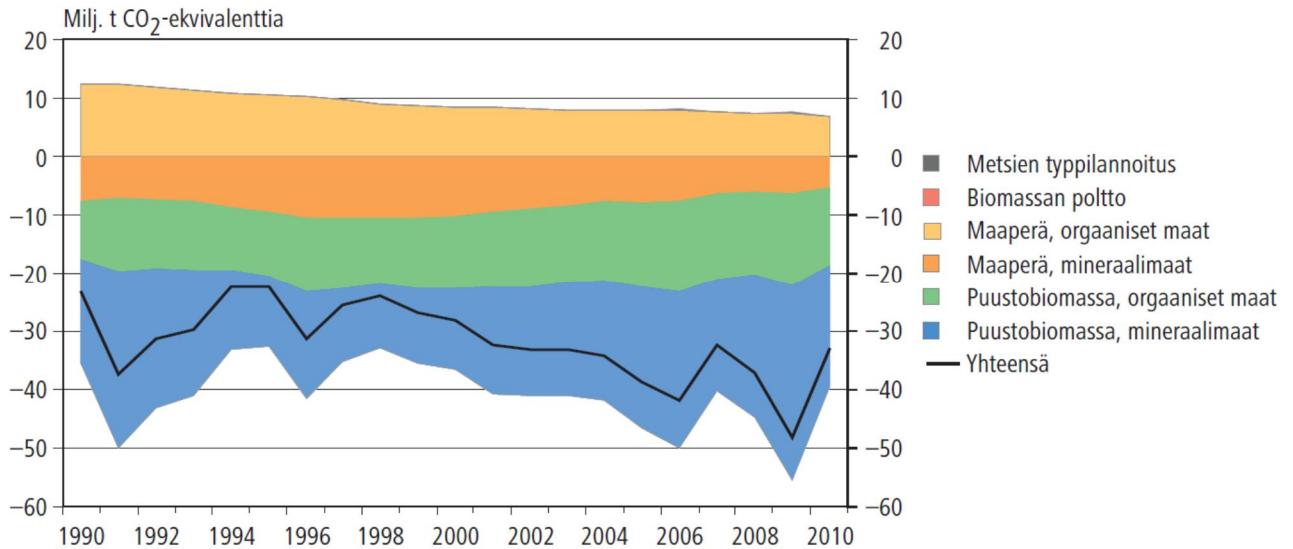
Metsäbioenergian todellisiin ilmastovaikutuslaskelmiin päästään tarkastelemalla metsien kehitystä siten, että toisessa vaihtoehdossa korjataan metsäbioenergiaa ja toisessa ei (kuva 2). Ilmastovaikutus on siis energiakäytön ja hakkuutähteiden metsässä lahoamisen välinen erotus (Kilpeläinen ym. 2012). Nykyisen Kioton pöytäkirjan mukaisen ilmastopolitiikan mukaista on taas arvioida metsäbioenergiaa siltä kannalta, ettei Suomen metsien hyötykäyttö vaaranna sovittua miniminelutasoa.

Koko Suomen metsäalaa koskevan tarkastelun voidaan katsoa koostuvan lukuisista toimista, joista osa sisältää päätöksiä puun korjuusta ja osa päätöksiä korjaamatta jättämisestä, eli hiilivarastona säilyttämisestä, mikä voi johtua taloudellisista syistä (esimerkkeinä metsäteollisuuden tuotantokapasiteetin pieneneminen ja kotimaisen puunkysynnän aleneminen).

Toimenpiteen tasolla metsikkötarkastelujen tulosten perusteella saadaan käsitys metsien hiilenkierron dynamiikkaan vaikuttavista tekijöistä. Tulosten perusteella voidaan sanoa, että kaikki puun käytön lisäys nykykäyttötasoon tavalla, jossa puun hiili vapautuu nopeasti ilmakehään, lisää todellisuudessa ilmakehän hiilidioksidipäästöjä ja vaikuttaa ilmastoon lämmittävästi muutamasta vuodesta sataan vuoteen puun kiertoajasta riippuen. Lyhyellä tähtäyksellä puun käytön ja erityisesti sen polton vähentämisellä saavutetaan ilmastohyötyjä, mutta ei laskennallisia hyötyjä nykyisten sopimusveloitteiden täyttämiseksi. Pitkällä tähtäyksellä puun käytön lopettaminen heikentää metsäalueen hiilitaseen kehittymistä kun kasvu loppuu ja kuolleen, lahoavan biomassan osuus kasvaa. Metsien käytön vähentämisen ilmastohyötyjä vähentää myös se, että vähentynyt käyttö merkitsee vähentyneitä mahdollisuuksia korvata suurempia päästöjä aiheuttavia polttoaineita ja materiaaleja.

Johtopäätöksenä on metsien hyötykäytön edistäminen, mutta tiedostaen sen, että nykyisen nieluvaikutuksen heikentäminen tai sen käyttämättä jättäminen edellyttää vastaavasti fossiilisten hiilipäästöjen entistäkin nopeampaa hillitsemistä.

Kehitysmaissa metsäkadon pysäyttäminen on keskeinen keino vaikuttaa nopeasti ilmakehän pitoisuuksiin ja lämpenemiseen. Tämä on tavoitteena REDD+ -ohjelmassa (Lyhenne tulee sanoista ”Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation”).



Kuva 3 Metsien kasvihuonekaasupäästöt (positiiviset arvot) ja nielut (negatiiviset arvot) Suomessa vuosina 1990-2010. Puuston biomassa (vihreä ja sininen), kuollut orgaaninen aine (lahopuu ja karike) ja maan orgaaninen aine mineraalimailla (ruskea) ovat hiilinieluja eli poistavat ilmakehästä hiilidioksidia, kun taas ojitettujen turvemaiden maaperä on hiilidioksidin lähde (keltainen). Puuston biomassan kasvusta on vähennetty puustobiomassan poistuma, joka sisältää käytetyn (hakatun) puun, hakkuutähteen ja luonnonpoistuman. Yhteensä metsien netto-nielu oli noin 32,8 miljoonaa tonnia CO₂ ekv. vuonna 2010 (Tilastokeskus 2012, sivu 35). Kioton jatkokaudella miniminielutaso olisi 20,5 Tg CO₂ /a sisältäen puutuotteet. Kuvassa metsien typpilannoituksen ja biomassan metsissä tapahtuvan polton päästöt ovat hyvin pienet

Energiajärjestelmän päästöjen rajoittamiseksi pelkkä bioenergian ja muun uusiutuvan energian edistäminen eivät riitä, vaan tarvitaan kokonaispolitiikkaa, jossa ohjataan puun käyttöä sinne, missä sillä saavutetaan paras hyöty runsaasti päästöjä aiheuttavien materiaalien ja polttoaineiden korvaajana. Kokonaispolitiikkaan kuuluu myös, että edistetään energian säästöä ja rajoitetaan fossiilisten polttoaineiden käyttöä esimerkiksi päästökaupalla. Muuten osa bioenergian lisäämisen vaikutuksesta "vuotaa" esimerkiksi energian käytön kasvuun. Eteenpäin suuntautuvilla toimenpiteiden dynaamisilla tarkasteluilla voidaan arvioida, miten metsäbiomassan käyttöä tulisi kohdistaa huomioon ottaen sekä ilmastovaikutukset että taloudellinen hyöty.

Varautuminen muutokseen päästöjen laskennassa

Kun sovelletaan nykyisiä Kioton ja Kioton jatkokauden biomassaa koskevia päästöjen raportointisääntöjä, Suomi voi käyttää metsäbiomassaa laajasti raaka-aineena ja energian lähteenä ilman laskennallista päästövaikutusta. Tulevalla velvoitekaudella (2013-) tämä edellyttää että vuosittainen nielu on yli 23 Tg CO₂ puutuotteet mukaan lukien, jolloin nielusta saadaan laskennallinen maksimihyvitys 2,5 Tg CO₂ vuodessa. Koska tämä voitaneen nyky näkymien valossa helposti saavuttaa, tilanne on edullinen Suomen metsäteollisuuden ja lisäksi muiden biomassan hyödyntämistoimien kannalta eikä nieluvelvoitteesta seuraa lisärasitteita Suomelle. Toisaalta Suomi joutuu tyytymään siihen, että metsäkadosta aiheutuu pieni laskennallinen lisäpäästö, jota ei enää saa kompensoida metsänhoidollisista toimista syntyneellä nielulla.

Kuitenkin nykyisessä ilmastoneuvottelujen ja ilmastopolitiikan aihepiirissä on monia avoimia kysymyksiä, joista useat koskevat bioenergian ja ekosysteemin hiilivarastojen käyttöä. Aihepiirissä käydään myös tieteellistä keskustelua, jossa arvostellaan nykyisiä käsittelytapoja. Keskustelun valossa on mahdollista, että bioenergian ja biomassan käyttöä koskevia laskentasääntöjä muutetaan kansainvälisissä

sopimuksissa, EU:n direktiiveissä tai EU:n muussa sääntelyssä nykyisistä kansallisista hiilitaseista kohti toimenpiteiden päästövaikutuksen huomioonottamista.

Mahdollisten muutosten vuoksi Suomessa olisi perusteltua varautua myös tällaisiin bioenergian ja biomassan käyttöä koskeviin laskentasääntövaihtoehtoihin, etenkin kun metsien pitkäkiertoinen biomassa on keskeinen osa Suomen teollisuuden ja energiantuotannon resurssipohjaa. Muuten on vaarana, että monet pitkäikäiset investoinnit jäävät vajaalle käytölle. Tutkimusta tulisi suunnata myös tähän aihepiiriin asioiden ymmärryksen lisäämiseksi ja voimavarojen optimaaliseksi kohdentamiseksi.

LÄMPÖPUMPUT JA KAUKOLÄMPÖ ENERGIAJÄRJESTELMÄSSÄ

Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto

Yhdistetyssä sähkön ja lämmöntuotannossa (CHP) voimalaitoksen muuten hukkaan menevää lämpöä käytetään rakennusten lämmittämiseen tai teollisuusprosesseihin. Yhteistuotannossa menetetään hiukan tuotettua sähkötehoa verrattuna pelkkään sähköntuotantoon lauhdevoimaloissa, mikä korvautuu monin verroin lämpönä. Suomessa kaukolämpövoimalat tuottivat vuonna 2010 sähköä 18 TWh (20 % Suomen sähkön kokonaiskulutuksesta) ja lämpöä 29 TWh (35 % Suomen lämmitysenergian loppukulutuksesta). Tuotannon keskimääräinen kokonaishyötysuhde oli 85 % ja rakennusaste eli sähkön- ja lämmöntuotannon suhde 0,61. Tässä esitetään yhteenveto raportista Rinne & Syri (2013).

CHP-kaukolämmön lisäyspotentiaali on yleensä arvioitu Suomessa melko vähäiseksi, koska suurimmat (=kannattavimmat) kaukolämpövoimalaitokset on jo rakennettu. Pienvoimalaitoksissa saattaa kuitenkin olla huomattava potentiaali. Polttoaineita suoraan lämmöksi polttamalla tuotetaan Suomessa lämmitysenergiaa noin 18 TWh/a ja sähköllä 14 TWh/a. Tekniikasta riippuen tätä lämpökuormaa vastaan saataisiin sähköä 10-30 TWh/a, joskin on epärealistista olettaa CHP-tuotannon olevan kannattavaa tai käytännössä toteutuvaa kaikessa lämmityksessä.

Toinen tapa lisätä CHP-sähköntuotantoa on parantaa CHP-laitosten rakennusastetta. Se nousseekin kiinteitä polttoaineita käyttävissä suurissa laitoksissa laitospinnan uudistumisen myötä tasolle 0,6...0,7, kun se nyt kaikissa kiinteän polttoaineen laitoksissa on keskimäärin noin 0,45. Sähköntuotannon lisäyspotentiaalia tässä on teoriassa noin 5 TWh, käytännössä vähemmän, koska pieniä laitoksia ei ainakaan tähän asti ole kannattanut varustaa korkeaa rakennusastetta tavoitellen. Kaasutustekniikalla olisi mahdollista päästä rakennusasteessa 1:n suuruusluokkaan (jossa tuotettu sähköteho on yhtä suuri kuin tuotettu lämpöteho), mutta tekniikan kehitys on vielä kesken. Kaasukombilaitosten rakennusaste on jo nyt noin 1 ja niiden rakentaminen olisikin todennäköisissä tulevaisuuden skenaariossa tehokas keino pienentää päästöjä. Maakaasun viimeaikainen hinnannousu ja riippuvuus yhdestä toimittajasta saattavat kuitenkin olla esteitä maakaasun nykyistä laajemmalle käytölle CHP-tuotannossa.

Lämpöpumput

Lämpöpumppu ottaa lämpöä matalalämpötilaisesta, edullisesta lämmönlähteestä ja luovuttaa sitä korkeammassa lämpötilassa käyttökohteeseen. Tämä on mahdollista käyttämällä "arvokkaampaa" energiaa, kuten sähköä tai esim. 50 astetta lämmönluovutustilaa kuumempaa vettä. Pumpun voi tavallaan ajatella hyödyntävän arvokkaammassa energianlähteessä olevan potentiaalinen kyky tehdä työtä (=exergian). Mitä pienempi lämpötilannostotarve on, sitä vähemmän "arvokasta" energiaa tarvitaan eli sitä parempi on lämpökerroin, COP (coefficient of performance). COP on maalämpöpumpuilla yleensä välillä 4,5...2,5, kun lämmityskierto on menevä vesi on 30...60-asteista. Tällöin lämmönlähteen eli

maaputkistossa kiertävän nesteen lämpötila on noin 0 C. Ilmalämpöpumpuilla COP on huonompi, vuositasolla luokkaa 2,5. Kovilla pakkasilla ilmalämpöpumput lopettavat toimintansa kokonaan tai ainakin teho heikkenee ja COP pienenee lähelle yhtä (=suora sähkölämmitys), koska lämpötilaero kasvaa liian suureksi.

Investointikustannusten pienentämiseksi lämpöpumput mitoitetaan usein noin 60 %:lle tarvittavasta maksimilämmitystehosta. Loppu tuotetaan yleensä sähkövastuksilla tai öljyllä. Sähkövastusten käyttö ei ole hyvä asia verkon tai voimalaitosten taloudellisen käytön kannalta, koska se ajoittuu yleensä aikaan, jolloin kulutus on muutenkin suurimmillaan. Koska toistaiseksi sähkön kuluttajahinnoittelu on vain harvoin sähkön pörssihintaan (joka voi huippujen aikaan nousta hyvinkin korkealle) perustuvaa, täystehopumppu ei välttämättä ole kuluttajalle rahallisesti houkutteleva. Se olisi kuitenkin kokonaisuutta ajatellen todennäköisesti järkevämpi ratkaisu kuin osatehopumppu.

Lämpöpumppuja voidaan käyttää myös jäähdytykseen kuten kylmäkoneissa. Joitakin lämpöpumppuja, kuten ilmasta ilmaan lämpöä siirtäviä (yleensä vain ilmalämpöpumpuiksi kutsuttuja) voidaan käyttää sekä lämmitykseen että jäähdytykseen kääntämällä lämmönluovutuksen suunta.

Lämpöpumpuilla tuotetaan Suomessa nykyään lämpöä noin 4 TWh/a, johon kuluu sähköä noin 1,4 TWh/a₁. Suurin osa lämpöpumpuista sekä lukumääräisesti että antamansa tehon perusteella on omakotitaloissa, ellei kauppojen kylmäkoneita lueta mukaan. EU-27-alueella lämpöpumppulämpöä tuotetaan nyt noin 50 TWh/a. Määrien arvioidaan kolminkertaistuvan vuoteen 2020 mennessä ⁴.

Muut kuin sähkökäyttöiset lämpöpumput ovat harvinaisia. Helsingin Energialla on suuri, kuumaa kaukolämpöä käyttävä absorptiolämpöpumppu kaukokylmän tuotannossa. Absorptio- ja hieman viileämmällä vedellä toimiva adsorptiolämpöpumppu ovat kuitenkin mahdollisia tulevaisuuden ratkaisuja esimerkiksi kaukolämpöverkoissa tai muualla, missä edullista lämpöä on saatavissa.

Maalämpöpumppuja on asennettu melko paljon öljylämmitystaloihin. Olemassa olevaan vesikiertoiseen lämmitysjärjestelmään pumpun liittäminen onkin helppoa. Potentiaalia on Suomessa teoriassa noin 8 TWh lämmitysenergian tuottona mitaten, olettaen, että kaikki öljyn lämmityskäyttö voitaisiin korvata lämpöpumpuilla₁. Tämä tuskin toteutuu, mutta varsin suuri osa potentiaalista lienee kannattavastikin toteutettavissa. Investoinnin takaisinmaksuaika on noin 10 vuotta, riippuen tosin suuresti öljyn hintakehityksestä.

Koko järjestelmän energiatehokkuuden kannalta olisi suotavaa korvata myös suoraa sähkölämmitystä (Suomessa 14 TWh/a₁) esimerkiksi lämpöpumpuilla. Tämä ei tasaisi kulutushuippuja talviaikaan, mutta säästäisi sähköä vuositasolla. Suorasähkötaloon olisi kuitenkin asennettava vesikiertoinen lämmitysjärjestelmä, jonka hinta tyypilliseen omakotitaloon jälkiasennuksena on luokkaa 2000-7000 euroa lämmönjaon tasaisuuden vaatimustasosta riippuen. Tämä pidentää takaisinmaksuaikaa muutamalla vuodella, mutta investointi on silti melko pieneen riskiinsä suhteutettuna kannattava, toisin kuin usein annetaan ymmärtää. Toisaalta sähköisen lattialämmityksen korvaaminen vesikiertoisella vastaavalla tuskin kannattaa, ellei lattiapinnoitetta ole uusittava joka tapauksessa.

CHP:n ja lämpöpumppujen päästövaikutukset osana sähköjärjestelmää

Tässä työssä arvioitiin tuntitason tarkastelua sekä CHP:n että lämpöpumppujen CO₂-päästövaikutukset osana sähköjärjestelmää koko vuoden aikana. Laskentamenetelmät on esitetty erillisessä osareportissa. CHP:n järjestelmävaikutuksia arvioitaessa (ns. CLCA-elinkaariarviointi) on huomioitava, mikä olisi vaihtoehtoinen sähköntuotantotapa CHP:lle. Suurimman osan vuoden tunneista vaihtoehtoinen tapa nykyisellä pohjoismaisella sähkömarkkinalla olisi fossiilinen lauhdetuotanto. Myös tulevaisuuden yhdentyvällä eurooppalaisella sähkömarkkinalla tilanne on vastaava.

Tällä hetkellä noin puolet EU-27-alueen sähköntuotannosta perustuu fossiilisiin polttoaineisiin. CHP:n osuus on 11 % eli vajaa 400 TWh₂. Lisäyspotentiaalia on arvioitu olevan siten, että CHP-sähköntuotanto voisi olla noin 1000 TWh₃. Vaikka uusiutuvaa energia lisättäen uusiutuvan energian kansallisten toimintasuunnitelmien (NREAP) mukaisesti⁴, uusiutuvat energialähteet kattavat sähkönkulutuksen referenssiskenaariossa vuoteen 2020 vain sähkönkulutuksen lisäyksen. "Energiatehokkuusskenaariossa" sähkönkulutus olisi noin 300 TWh pienempi vuonna 2020⁴, mutta CHP:llä tai uusiutuvilla energialähteillä korvattavaa hiili-, kaasu- ja öljylauhdevoimaa jäisi silti runsaasti, varsinkin huomioiden esimerkiksi Saksan suunnitelman luopua ydinvoimasta vuoteen 2022 mennessä.

Johtopäätökset

- Yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon (CHP, combined heat and power) kaukolämpö on vähäpäästöinen tapa tuottaa yhdyskuntien lämmitys. Sen ympäristöystävällisyyttä aliarvioidaan yleisesti.
- CHP:n päästövaikutusten arvioinnissa tulee muistaa että vaihtoehto CHP:llä tuotetulle sähkölle on sekä pohjoismaisella markkinalla että tulevaisuuden yhdentävällä Euroopan sähkömarkkinalla yleensä hiililauhdesähkö, jossa lämpöä ei oteta talteen hyötykäyttöön.
- Tämä huomioiden CHP-lämmön järjestelmätason päästöt ovat tuntipohjaiseen markkinatarkasteluun perustuen pienemmät kuin yleisesti laskenta-arvona käytetään, Suomen keskiarvona noin 40 gCO₂/kWh. Tämä metodiikka pätee, kun halutaan selvittää mahdollisen muutoksen vaikutus, esimerkiksi vastaus kysymykseen: "Mitä tapahtuu, jos rakennamme uudelle asuinalueelle CHP-laitoksen X?" tai "Mitä tapahtuu, jos nykyisessä järjestelmässä, jossa on CHP-laitos X, kaukolämmön kulutus muuttuu?" (Tässä laitos X edustaisi keskimääräistä CHP-polttoainejakaumaa Suomessa. Erillisessä osaraportissa on esitetty päästövaikutukset eri polttoaineita käyttäville laistyypeille).
- Vastaavasti maalämpöpumpuilla tuotetun lämmön päästökerroin on tuntipohjaiseen markkinatarkasteluun perustuen noin 200 gCO₂/kWh, ja ilmalämpöpumpuilla yleisesti enemmän johtuen sekä huonommasta lämpökertoimesta että enemmän talviajalle painottuvasta sähkönkulutuksesta. Suoran sähkölämmityksen päästökerroin vastaavalla metodiikalla laskettuna on n. 650-700 gCO₂/kWh. Tämä metodiikka pätee esimerkiksi vastauksena kysymykseen: "Mitä tapahtuu, jos lisäämme lämpöpumppulämmitystä / ilmalämpöpumppulämmitystä / suoraa sähkölämmitystä Suomessa?"
- Vastaavalla metodiikalla tulevaisuuden skenaarioissa CHP-kaukolämmön järjestelmätason päästöt ovat 0...300 gCO₂/kWh ja maalämmön 50...250 gCO₂/kWh, riippuen päästöoikeuksien hinnoista, polttoaineiden hintasuhteista ja ydinvoiman ja hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin tulevaisuuden määrästä energijärjestelmässä.
- Lämpöpumput ovat Suomessa CHP-kaukolämpöä vähäpäästöisempiä järjestelmätasolla vasta silloin, kun päästöoikeuden hinta nousee yli 50...100 euron/tonniCO₂ eli ilmastopolitiikka on hyvin kunnianhimoista.
- Yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa on järkevää siirtyä hallitusti kohti suurempaa uusiutuvan energian osuutta (yhtenä reunaehtona kannattavuus päästökaupan oloissa). Teknologisia mahdollisuuksia on useita (esim. hake, pelletit, torrefioidut pelletit, kierrätyspolttoaine kivihiilen korvaajina, biokaasu tai SNG maakaasun korvaajana). Erilaisen polttoaineen tuominen olemassa olevaan laitokseen voi olla järkevintä vaiheittaisena oppimisprosessina. Lisäksi uusien voimalaitosten rakentamisen myötä CHP-järjestelmissä ollaan siirtymässä kohti ko. monipolttoainevaihtoehtoja.
- Energijärjestelmän suunnittelussa on tehokkaan päästöjen vähentämisen lisäksi huomioitava riittävän oman sähköntuotantokapasiteetin turvaaminen erityisesti talviaikana, jolloin monet uusiutuvan energian muodot eivät ole luotettavasti käytettävissä. Suomen voimalaitoskapasiteetti vanhenee, ja sähkön nettotuonin jatkuminen Venäjältä on epävarmaa. Riittävän voimalaitoska-

pasiteetin lisäksi kysynnän hintajoustoon tulisi panostaa kaikilla sektoreilla, ja tuoda pörssin hintasignaalit suoraan tai jopa jyrkennettynä kuluttajille.

Tulevaisuuden vähäpäästöisen energijärjestelmän elementtejä Suomessa ovat:

- matalalämpötilainen lämmönjako (on hyötyä sekä CHP:n rakennusasteen, lämpöverkkojen mitoituksen, lämpöpumppujen että lämmön varastoinnin kannalta).
- lämmön varastointimahdollisuus lyhytaikaisesti rakenteisiin tai varastosäiliöihin ja pitkäaikaisesti kalliovarastoihin. Tällöin kulutus voidaan ajoittaa siten, että se tukee muuta energijärjestelmää.
- nykyisten lämpöverkkojen säilyttäminen (ei-maakaasu-CHP:n ja pitkäaikaisvarastoinnin kannalta lähes välttämättömiä).
- Suurella tuuli- ja aurinkoenergian osuudella CHP-laitokset voivat tulevaisuudessa olla tärkeä säätösähkön lähde. Siksi niiden säätöominaisuuksiin ja -nopeuteen tulisi panostaa lämpövarastojen ohella.
- Uusiutuvan energian tuominen ketjun eri vaiheisiin (biopolttoaineet keskitettyyn tuotantoon, aurinkolämpö, lämmön pientuotanto kulutuspäähän) ja mahdollisesti verkkojen avaaminen pientuotannolle.

Näillä keinoilla rakennusten lämmitys voidaan hoitaa sähköntuotannon "jätteillä" suurimman osan ajasta. "Jätettä" voi olla matalalämpötilainen energia (kuten CHP-kaukolämmössä nyt) tai tulevaisuudessa esim. muun kulutuksen kannalta väärään aikaan tuuli- tai ydinvoimalasta tuleva sähkö. Lämpöä on huomattavasti helpompi varastoida kuin sähköä, ja se voi tuoda järjestelmään lisää tärkeää säätömahdollisuutta.

Kulutuksen ja suunnittelun ohjaamiseksi sekä sähkö- että lämpöenergian hinnan tulisi vastata mahdollisimman hyvin ympäristövaikutuksia, pörssisähkön nykyisen hinnoitteluperiaatteen mukaan. Hintaviestin vain tulisi välittyä sellaisenaan tai jopa jyrkennettynä kuluttajalle saakka. Tämä kannustaisi vähentämään esim. pakkashuippujen aikaista lämmönkulutusta, joka hoidetaan öljykattiloilla. Kulutusjouston tulee tuoda hyötyä kuluttajalle. Hintavakautta haluavalle voisi olla tarjolla finansssituotteena takuuhintaisia tuotteita eli nykyhinnoittelun tapaista energiaa.

RAKENNETUN YMPÄRISTÖN HAJAUTETUT ENERGIANJÄRJESTELMÄT

Rakennuskanta ja sen energian tarve

Rakennukset kuluttavat Suomessa ja useimmissa länsimaissa noin 40 % energian loppukäytöstä (EU 2008 A). Tästä pelkästään 22 % menee rakennusten lämmittämiseen (EU 2008 A, EU 2008 B). Asuin, liike- ja palvelurakennusten osuus on Suomessa määräävä, kerrosalasta niitä on noin 65 prosenttia ja energiakulutuksesta 80 prosenttia. Suomen rakennuskannasta merkittävä osuus on asuinrakennuksia (pientalot, rivi ja kerrostalot), ja ne kuluttavat 52 % Suomen koko rakennuskannan energiasta. Asuinrakennuksissa erityisesti pientalojen osuus on suuri ja niiden osuus energiankulutuksesta on noin 30 %. Tuotantorakennusten osuus on 23 %, liike- ja toimistorakennusten 17 % ja julkisten palvelurakennusten osuus 8 %. Tässä esitetään yhteenveto raportista Airaksinen ym. (2013).

Uudisrakentaminen on tilojen lämmitysenergiankulutukseltaan jo kohtuullisen pientä, lisäksi EU:n 2020 tavoitteet ohjaavat uudisrakentamisen lähes nollaenergiatasoon. Lähes nollaenergiataso päätetään kansallisesti, mutta Suomessa ei ole vielä määritetty tasoa. Energiankulutuksen lisäksi olisi tärkeää säädellä myös rakennusten huipputehontarvetta. Energiankulutuksen pienentyessä puoleen tai jopa pienemmäksi pienenee huipputehontarve vain noin 30 % (esim. Airaksinen ja Vuolle 2012). Lisäksi huipputehon ja normaalin käyttötehon ero suurenee (Steinfeld et.al. 2011) ja aiheuttaa esimerkiksi sähköverkolle suurempia haasteita ja lisää päästöjä nykyisellä tuotantorakenteella (Thyholt ym. 2008, Steinfeld et.al. 2011).

Korjausrakentaminen on taloudellisesti järkevää tehdä silloin, kun rakenteet ja laitteet ovat käyttökänsä päässä tai ohittaneet sen. Lähtökohdana energiatehokkuuden parantamiselle onkin yleensä sen kytkeminen ulkovaipan ja taloteknisten järjestelmien normaaliin korjaustoimintaan. Normaalilla korjaustoiminnalla tarkoitetaan toimenpiteitä, jotka on päätetty tehdä joka tapauksessa.

Rakennuskannan poistuman ja korjaustoimenpiteiden avulla nykyisen asuin-, liike- ja palvelurakennuskannan energiankulutus vähenisi korjausrakentamisen määräysten vaikutuksesta arviolta 12 prosenttia vuodesta 2012 vuoteen 2020 mennessä. Jos rakennukset korjattaisiin energiatehokkuuden suhteen uudisrakentamisen tasoisiksi, vähenisi olemassa olevan kannan energiankulutus 15 prosenttia vuoteen 2020 mennessä.

Päästövähennys- ja kustannustehokkuusmielessä lisäeristykset ym. rakennusvaipan parannukset tulisi aloittaa voimakkaalla priorisoinnilla sähkö- ja öljylämmitteisistä rakennuksista sekä muuttamalla näiden rakennusten lämmitystapoja.

Energiantuotantopuolella CHP-verkoissa suurimmat hyödyt rakennusten lämpötalouden parantamisesta saadaan silloin, kun verkossa olevat CHP-laitokset ovat esimerkiksi verkon laajentumisen vuoksi jäämässä alimitoitetuiksi.

Suhteessa saavutettuun energiansäästöön kannattavampaa olisi tavoitella korjauksissa uudisrakentamisen energiatehokkuustasoa kun tarkastellaan koko rakennuskantaa. Yksittäisissä hankkeissa kustannukset vaihtelevat luonnollisesti tapauskohtaisesti.

Tulevaisuuden uudisrakentaminen korvaa poistumaa vanhasta rakennuskannasta ja kasvattaa rakennuskantaa. Vuonna 2050 rakennuksia arvioidaan olevan noin 30 prosenttia enemmän kuin 2012 alussa. Vuoden 2020 asuin-, liike- ja palvelurakennuskanta kuluttaisi energiaa 6 prosenttia vähemmän ja aiheuttaisi CO₂ päästöjä 10 prosenttia vähemmän, jos tullaan noudattamaan nyt lausunnolla olevia määräyksiä voimassa olevien määräysten oletuksilla.

Suomessa uuden asuinrakennuksen keskimääräinen energiankulutus on noin 130-150 kWh/m², josta rakennusten tilojen lämmittämiseen kuluu noin 70 kWh/m². Olemassa olevassa asuinrakennuskannassa keskimääräinen lämmitysenergiankulutus on noin 250 kWh/m², josta tilojen lämmittämisen osuus on 160 kWh/m². Asuinrakennusten lämmitysenergiankulutus vaihtelee kuitenkin merkittävästi käyttäjistä riippuen. Esimerkiksi samana vuonna rakennettujen, teknisiltä ominaisuuksiltaan samanlaisten asuintalojen erot voivat olla 4-5-kertaisia pelkästään lämmitysenergiankulutuksen kannalta.

Maatilojen käyttämän energian kasvihuonekaasupäästöt ovat n. 1,5 Tg CO₂-ekv., mikä on noin 2-3 % Suomen kokonaispäästöistä (Statistics Finland 2012). Tämä sisältää maatilojen lämmityksen (20 %), viljan kuivauksen (20 %) ja koneiden kuluttaman energian (60 %). Tilojen kulutuksesta on viidennes sähkönkulutusta ja loppuosa polttoaineiden kulutusta (Motiva 2011). Päästöjä voidaan vähentää joko vähentämällä kulutusta tai siirtymällä bioenergian käyttöön. Energiasektorin lisäksi bioenergian käytöllä on vaikutuksia päästökaupan ulkopuolella raportoitaviin maataloussektorin viljelyn päästöihin ja maankäytön hiilidioksidipäästöihin. Maatalouden rakennetun ympäristön energiansäästön toteuttamiseksi on valittu toimiksi Maatilojen energiaohjelma sekä investointituet lämpökeskuksiin, tuoreviljasiiloihin ja lämmittämättömiin karjasuojiiin. Lisäksi tilusjärjestelyillä on tuettu liikennepolttoaineiden kulutuksen vähentämistä.

Hajautetut energiantuottotavat

Aurinkolämmössä lämpimän käyttöveden tuotannon täydentäminen aurinkokeräimillä on monessa tapauksessa järkevää silloin kun joko asennetaan uutta lämmitysjärjestelmää tai peruskorjataan vanhaa.

Helsingin Kalasataman uudelle asuinalueelle tehdyn laskelman mukaan erittäin korkea energiatehokkuustaso ja paikallinen aurinkolämmön kerääminen on yhteen sovitettavissa taloudellisesti kannattavan kaukolämpöverkon kanssa. (Tuomaala ym. 2012)

Aurinkosähkön osalta Saksassa on osoitettu, että suhteellisen pohjoisillakin alueilla pystytään tuottamaan ainakin 5 % nykyaikaisen teollisuusmaan sähköstä. Tuotantovolyyminä tämä vastaa jo varsin suurta määrää tavanomaisia sähkövoimaloita, mutta kyseisen tason saavuttaminen syöttötariffeilla on tullut kalliiksi ja vaatii myös sähköverkon sopeuttamistoimia. Lisäksi korvaavien tuotantomuotojen problematiikka ei ole ongelmatonta päästöjen ja investointien/ylläpidon kannalta. Tällä hetkellä korvaava voima tuotetaan fossiililla polttoaineilla.

Ripeän teknisen kehityksen ansiosta aurinkosähkön hinta alenee tällä hetkellä nopeasti, noin 10-20 % vuosittain, joten vaikka se ei tällä hetkellä ole ilman tukia taloudellisesti kannattavaa, voi se jossain vaiheessa olla osana energiajärjestelmää. Ensimmäiset kohteet, joissa aurinkosähkön käyttöönottoa olisi järkevää kannustaa, ovat rakennukset, joita jäähdytetään sähköllä.

Puunpoltolla on Suomessa pitkät perinteet, vaikkakin nykyisissä rakennuksissa tulisijat ja puukattilat ovat enää harvoin pääasiallisia lämmöntuottolaitteita. Lisälämmönlähteenä polttopuu on kuitenkin säilyttänyt merkittävän asemansa, sillä vuonna 2008 tehdyn selvityksen mukaan Suomessa on (ilman puukiukaita) noin 2,9 miljoonaa tulisijaa (Alakangas ym. 2008). Arvion mukaan asuintiloja lämmitetään polttopuulla 11 TWh. (Metsäntutkimuslaitos 2008).

Polttopuun merkitys saattaa kasvaa hieman Suomen rakennusten lämmitysenergiälähteenä jo lähitulevaisuudessa. Yhdeksi merkittäväksi esteeksi polttopuun laajamittaiselle käytölle saattaa muodostua erityisesti tulisijojen panospoltosta aiheutuvat pienhiukkaspäästöt lähiympäristöön, jotka vaihtelevat huomattavan paljon eri palamisolosuhteissa (RIL 251-2010, Tissari 2008).

Tulisijojen käyttöön liittyy muutamia muista lämmitysratkaisuista poikkeavia erityispiirteitä. Ensiksikin tulisijoja voidaan käyttää myös sellaisissa poikkeusolosuhteissa, jolloin keskitetyt energianhuoltoratkaisut eivät ole käytettävissä (sähkö- tai kaukolämpöjärjestelmien käyttökätköt, etc). Toisaalta laajamittainen puunpoltto edellyttää sekä toimivaa polttopuuhuoltoa (toimitus ja varastointi) että riittävää aktiivisuutta tulijan käyttäjältä. Näiden lisäksi polttopuun käytöllä on kansantalouden tasolla suoria ja epäsuoria vaikutuksia myös työllisyyteen ja energian tuontiriippuvuuteen.

Yleisin maatalousrakennusten lämmitysmuoto nykyään on hakelämmitys (Motiva 2011). Sen rinnalla voitaisiin tuottaa yhä enemmän sähköä ja lämpöä biokaasusta tai biomassan poltosta. Biokaasutuotanto voidaan toteuttaa pienessä mittakaavassa yksittäisellä tilalla tai useamman tilan yhteislaitoksena. Biokaasun teknis-taloudellinen potentiaali korvata fossiilisen energian käyttöä on 5-16 TWh (Asplund ym. 2005), mikä vastaisi päästövähennyksenä 3,5-11 Tg CO₂-ekv. Suurin etu biokaasun tuotannon yleistymisessä olisi sen tuomat mahdollisuudet lannan prosessointiin.

Lämpöpumppujen käyttöönotto on nykyisin kannattavaa. Maalämmön investoinnille voidaan laskea noin 10-15% vuosituotto. Maalämmön kasvattamiselle on suuri potentiaali, sillä Suomen rakennuskannassa on noin 220 000 öljykattilaa, puoli miljoonaa suorasähkölämmitysrakennusta ja 100 000-200 000 vesikiertoista sähkölämmityskohdetta (Lindell ja Weckström 2012). Heinimö ja Alakangas (2011) ovat esittäneet, että vuonna 2020 lämpöpumppujen tuottotavoite olisi 8 TWh/a. Rinteen ja Syrin (2013) mukaan tämä vastaa suunnilleen sitä potentiaalia, jolla kaikki öljyn lämmityskäyttö voitaisiin korvata lämpöpumpuilla (Rinne ja Syri 2013).

Vaikka maalämpö on ilmasta luonnon energiaa, niin maalämpöjärjestelmän riippuvuus sähköstä heikentää sen ilmastoystävällisyyttä. Maalämpöpumppuja ei kustannussyistä juuri lainkaan mitoiteta

suurimman lämmöntarpeen mukaan, jolloin sähköenergian kulutus kasvaa huomattavasti kovilla pakkasilla. Usein ne toimivat kuten suora sähkölämmitys huippupakkasilla. Rinne ja Syri (2012) ovat arvioineet, että maalämpöpumpuilla tuotetun lämmön päästökerroin on tuntipohjaiseen markkinatarkasteluun ja marginaalisähköön (päästökerroin 680 gCO₂/kWh) perustuen noin 200 gCO₂/kWh, ja ilmalämpöpumpuilla yleisesti enemmän johtuen sekä huonommasta lämpökertoimesta että enemmän talviajalle painottuvasta sähkönkulutuksesta.

Lämpöpumppujen päästökehityksen kannalta on olennasita kuinka marginaalisähkön päästöt kehittyvät ja kuinka lämpöpumppujen tarvitsemaa ulkoista sähköenergiaa voidaan vähentää.

Kiinteistökohtaiseen pientuulituotantoon on kohdistunut pitkään odotuksia, mutta niiden avulla sähkön tuottaminen on edelleen kallista. Esimerkiksi suomalaisen valmistajan pientalolle tarkoitettu 4kW:n tuulivoimala maksaa vajaa 20 000 euroa ja sen vuotuinen tuotto-odotus on paikasta riippuen 5000-12000 kWh. Paikalliset tuuliolosuhteet vaihtelevat paljon, ja Suomen tuulikartta pystyy antamaan vain hyvin karkean suunnittelunperustan pientuulivoiman rakentamiselle.

Pienvesivoimalaitokset jaetaan tehonsa puolesta kahteen kokoluokkaan varsinaisiin pienvesivoimalaitoksiin, joiden teho on 1-10 MW ja minivesivoimalaitoksiin, joiden teho on alle 1 MW. Tässä yhteydessä tarkastellaan vain minivoimaloita, joita vuonna 2009 Suomessa oli 73 kappaletta (Pienvesivoimalaitosyhdistys 2012). Minivesivoiman käyttämättömäksi potentiaaliksi on arvioitu 144 MW /1 021 GWh/a. Vanhojen patojen, voimaloiden ja ohivirtausten järkevällä käyttöönotolla ja saneerauksella on arvioitu, että minivesivoimapotentialista olisi taloudellisesti kannattavaa ottaa käyttöön vuoteen 2020 mennessä noin 22-75 MW (Motiva 2012). Rakennetun ympäristön läheisyydessä olevat voimalaitoskohteet eivät kuitenkaan välttämättä realisoitu, sillä ko. vesistöalueisiin liittyy usein virkistyskäyttötarpeita ja lupaprosessit ovat siksi vaikeata.

Hajautetut energijärjestelmät osana laajempaa energiaverkkoa

Hajautetut sähköntuotantojärjestelmät ovat käytännössä aina yhteydessä valtakunnan sähköverkkoon. Saksalla on kokemusta haasteista, joita uusiutuvan energian nopea lisäys energiantuotannossa on merkinnyt sähköverkon sopeuttamiselle uuteen tilanteeseen. Aurinko- ja tuulienergian tuotanto ei ole samalla tavoin säädettävissä kuten perinteiset voimalaitokset ja siten niiden tuotannossa ja paikallisessa sähkönkulutuksessa voi olla merkittäviäkin epäsuhtia. Katoille asennettava aurinkosähkö liittyy sähkön jakeluverkkoihin, joita ei alun perin ole suunniteltu ottamaan vastaan merkittävää sähköntuotantoa. Tämä voi heikentää sähkön laatua tai aiheuttaa jakeluverkon komponenttien ylikuormittumista. Erityisenä ongelmana on, että toistaiseksi asennetun PV kapasiteetin ohjattavuus on pääsääntöisesti olematonta, minkä seurauksena jakeluverkon sähkön laatu voi aurinkoisina päivinä heiketä huomattavasti. Liian korkeat jännitteet voivat vahingoittaa herkimpiä sähkönkulutuslaitteita ja pahimmillaan ylijännitteet voivat johtaa verkon kaatumiseen. Tilanne on kuitenkin muuttumassa uusien vaatimusten ja jälkiasennusten myötä. Aurinko- ja tuulisähkön osuuden kasvaessa yhä suuremmiksi Saksan sähköntuotannossa haasteet kasvavat merkittävästi myös kantaverkon tasolla edellyttäen investointeja joko siirtokapasiteettiin tai sähkön varastointiin.

Hajautetun energiatuotannon osuuden selvä kasvattaminen edellyttää hajautetun tuotannon tehokasta integrointia valtakunnan verkkoon. Lisäksi sähköjärjestelmän kustannustehokkuutta voidaan parantaa kasvattamalla järjestelmän säädettävyyttä. Hajautetun energijärjestelmän tehokkaalla integroinnilla voidaan vaikuttaa päästöihin, energijärjestelmän kustannuksiin, kokonaiskapasiteetin tarpeeseen ja taloudellisiin muuttujiin. Hajautetun energian integrointi valtakunnalliseen (pohjoismaiseen) energijärjestelmään vaatii ainakin seuraavien tekijöiden suunnittelua: 1) sähkönjakelun varmistaminen ja perinteisten voimalaitosten säädettävyyden, 2) kysynnän joustavuuden merkityksen ymmärtäminen ja siihen liittyvien ohjauskeinojen hyödyntäminen, 3) älykkäiden sähköverkkojen toiminnan kehittäminen ja toimivuus. Lisäksi voidaan aluksi tarvita tukitoimenpiteitä kysynnän joustavuuden lisäämiseksi

esimerkiksi tukemalla lämmityksen joustavuuden kasvattamista, sekä muiden tarkoituksenmukaisten ja tehokkaiden tukimekanismien suunnittelu ja toimeenpano. Mahdollisilla tukitoimeinpiteillä pitää kuitenkin aina olla selkeä rajattu määräaika ja niiden kokonaisvaikutuksia tulee tarkastella riittävän laajasti niin että tuet johtavat päästöjen pienenemiseen kokonaisuuden kannalta.

Jotta älykkäät sähköverkot voivat hyödyntää hajautetusta energiantuotannosta saatavat mahdollisuudet tehokkaasti vaatii tämä selkeästi aikaisempaa voimakkaampaa kysynnän joustavuutta. Kysynnän joustavuuteen voidaan vaikuttaa useilla eri mekanismeilla kuten aikaisempaa dynaamisemmalla hinnoittelulla, reaaliaikaisella mittaroinnilla ja älykkäällä taloteknologiolla.

Vaihtelevan hajautetun energiatuotannon (lähinnä tuuli- ja aurinkosähkö) lisääntyminen lisää muilta tuotantomuodoilta vaadittavia tuotannonvaihteluita. Siksi on arvioitava miten tarvittava joustavuus kannattaa hankkia. Nykyisessä sähköjärjestelmässä tuotanto vaihtelee vastaamaan kulutuksen päivä-, viikko- ja kausivaihtelua. Tuotanto on siis jo varsin säädettävää ja tutkimustulosten mukaan merkittäviäkin määriä tuuli- ja aurinkotuotantoa voidaan säätää melko vähäisillä lisäkustannuksilla myös ilman merkittäviä uusia investointeja (Holtinen ym. 2009). Kustannustehokkaimpia tapoja lisätä joustavuutta ovat markkinasääntöjen muutokset (Kiviluoma et al 2012), jotkut kysyntäjoustopuodot (esim. sähkölämmitys), yhdistetyn sähkön- ja lämmön tuotannon tarjoamat joustomahdollisuudet (Kiviluoma ja Meibom 2010), perinteisten voimalaitosten joustavuuden lisääminen (Corbus ym. 2010), uudet siirtoyhteydet Rebours ym. (2010) ja hajautetun tuotannon jousto, jos tuotanto ei mahdu järjestelmään. Vesivoimalaitosten kapasiteetin nostolla voidaan myös lisätä joustavuutta, mutta investoinnin kannattavuus riippuu voimakkaasti vesistön ja voimalan ominaisuuksista. Kun uutta termistä voimalaitoskapasiteettia tarvitaan, joko korvaamaan poistuvia laitoksia tai turvaamaan kulutuksen kasvua, niin on hyvä huomioida uuden laitoksen joustavuus myös tulevaisuutta silmällä pitäen. Mikäli alueiden ja maiden väliset siirtolinjat sen mahdollistavat voidaan vaihteluita säätää myös muilla alueilla toimivalla vesivoimalla tai muulla tuotannolla.

Hajautettu energijärjestelmä voi olla myös osa paikallista tai alueellista kaukolämpöverkkoa. Kaukolämpöverkkojen kehitys on osa muutosta kohti älykkäämpää energiankäyttöä kaupungeissa ja taajamissa. Tulevaisuuden sähkön ja kaukolämmön yhteistuotannon (CHP) rakennusastetta voidaan nostaa ja siten kannattavuutta parantaa siirtymällä matalalämpötilaisempiin verkkoihin, jotka ovat myös paremmin yhteensopivia paikallisen lämpötuotannon kanssa matalalämpötilaisista lähteistä, kuten ylijäämälämmön talteenotto ja aurinkokeräimet.

Helsingin Kalasataman uuden asuinalueen perustella tehdyn laskelman mukaan erittäin korkea energiatehokkuustaso ja paikallinen aurinkolämmön kerääminen on yhteen sovitettavissa taloudellisesti kannattavan kaukolämpöverkon kanssa (Tuomaala ym. 2012).

Rakennuksiin integroitu paikallinen lämmöntuotanto esim. aurinkokeräimillä tuottaa helposti lämpöä yli rakennuksen oman tarpeen mitoituksista ja rakennuksen käytöstä riippuen (esimerkiksi kesäloma-aikana) Tällöin rakennuksen kaukolämpöverkkoliittymä, jota on kehitetty kaksisuuntaiseksi, pystyisi siirtämään energian kaukolämpöverkon kautta kohteeseen, jossa sitä tarvitaan. Lisäksi kaukolämpöverkko voi palvella myös lämpövarastona, joko verkkoon liitettyjen varsinaisten lämpövarastojen tai verkon oman melko rajallisen lämpökapasiteetin avulla.

Aurinko- ja kaukolämmön yhteensopivuutta kaupunkien sähkön ja lämmön yhteistuotannon kaukojärjestelmiin tulisi tutkia lisää, jotta löydettäisiin tavat hyödyntää aurinko- ja maalämpöä ilman, että aiheutetaan päästöjen kannalta negatiivisia kerrannaisvaikutuksia. Lämmön ja sähkön yhteistuotannon vähentäminen ei ole järkevää, jos korvaavana sähköntuotantona on hiililauhde muualla

sähköjärjestelmässä. Kaukolämpöä on käsitelty yksityiskohtaisemmin erillisessä ilmastopaneelin raportissa (Syri ja Rinne 2012).

Kansantaloudelliset vaikutukset

Hajautetun energiatuotannon vaikutukset kansantalouden tasolla riippuvat paljon siitä minkälaisen aseman ne tulevat saamaan energiapaletissa, millä energia tuotetaan, minkälaista tuotantoa ne tulevat korvaamaan ja minkälaisen aseman pientuotanto tulee saamaan hajautetussa energiatuotannossa. Jos yksittäiset tahot innostuvat tekemään osan energiatarpeestaan tai kokonaan itse, merkitsee se myös uudenlaisia tulonjakoa energiatuotannossa. Lähtökohdana on kuitenkin tällöin se, että laajamittainen lähienenergiatuotanto on mahdollista vain jos omatoiminen tuottaja onnistuu pienentämään energiakustannuksiaan kannattavasti omalla tuotannollaan. Tällöin tuotettu energia on pois muutoin keskitetystä energiasta tuottavalta toimijalta, mutta toisaalta hajautettu energiatuotanto tarjoaa perinteiselle verkkoyhtiölle uudenlaisia liikemahdollisuuksia. Kansantaloudellisissa vaikutuksissa tarkasteltaessa on aina huomioitava, että tarkastellaan riittävän laajasti kokonaisuuden toimivuutta.

Omatoimisen pientuotannon kustannuskehitykseen vaikuttaa muun muassa yhteiskunnan tukipolitiikka, energiatuotantolaitteiden massatuotanto ja niihin liittyvät tekniset uudet innovaatiot sekä fossiilisten polttoaineiden markkinahinnat ja verokehitys. Yhteiskunnan tukipolitiikalla vaikutetaan etenkin uuden teknologian käyttöönottoon, jonka kustannustehokkuus markkinoilla ei ole kilpailukykyinen, mutta sen edistämisen katsotaan pitkällä tähtäyksellä olevan kansantaloudellisesti mielekästä.

Pienimuotoisiin uusiutuviin energialähteisiin tuotanto- ja käyttöketjun työllisyysvaikutuksista tuotettua energiamäärää kohti on tehty kansainvälisestikin vähän selvityksiä, joiden perusteella eri tuotantotapoja on vaikea saada täsmällisesti vertailukelpoisiksi keskitettyihin ratkaisuihin nähden. Selvitysten tekovuodet vaihtelevat, eri energiatuotantomuotojen selvitysten välilliset työllisyysvaikutukset muun muassa välituotekäytön osalta ovat puutteelliset tai eivät ole läpinäkyvästi dokumentoitu. Hajautettujen energialähteiden osalta kotimainen aineisto puuttuu käytännössä kokonaan. Lisäksi arvioiden tekeminen uusiutuvia energiaa koskevista selvityksistä on lähes mahdotonta, koska ne kattavat etenkin suuren mittakaavan tuotantoa (ks. esim. Lindroos ym. 2012).

Taloudellisia vaikutuksia arvioidessa on olennaista huomioida että sähkön arvo ei ole sama jokaisena vuorokauden ja vuoden tuntina. Olennaista taloudellisessa arvioinnissa on siis huomioida mihin ajanhetkeen uusiutuvan energian tuotanto tapahtuu ja mitä tuotantoteknologiaa se korvaa (kts. esim. Borenstein 2011). Tämä vaikuttaa niin työllisyyteen, kansantalouden kustannuksiin, kuluttajien kohtamiin hintoihin kuin päästöihin. Täten uusiutuvan energian ja hajautetun energiantuotannon taloudelliset vaikutukset voivat vaihdella voimakkaasti eri alueiden ja maiden välillä. Epäsuoria vaikutuksia työllisyyteen tulee lisäksi mm. innovaatiotoiminnan kautta.

Tuontipolttoaineiden teknillinen korvaamispotentiaali hajautetulla energiatuotannolla on suuri energiaintensiivisen teollisuuden ulkopuolella. Öljyn korvaaminen hajautetun energiajärjestelmän uusiutuvalla energialla rakennusten erillislämmityksessä on parhaat mahdollisuudet toteutua jo lähitulevaisuudessa. Kaasun ja kivihiiilen suurempi korvaaminen kuitenkin edellyttäisi, että uusiutuvalla energialla tuotettu hajautettu energia korvaisi nykyisillä keskitetyillä kaukolämmön ja sähkön yhteistuotantolaitoksilla tuotettua energiaa. Tämän realisoituminen on jo teknis-taloudellisessa ja osittain poliittisessa mielessä vaikea asia.

Johtopäätökset

Rakennuskannassa muutokset ovat hitaita ja niiden vaikutukset ovat pitkäaikaisia. Rakennuskannassa tehtävien muutoksien on ensisijaisesti pienennettävä primäärienergiankulutusta ja sitä kautta

vähennettävä päästöjä. Tämä on tärkeää, sillä myös uusiutuva energia on luonnonvara, jota tulee käyttää säästeliäästi.

Rakennuksia, hajautettua energiantuotantoa ja koko energiajärjestelmäämme on tarkasteltava kokonaisuutena. Päästöjen vähentäminen tulee tehdä kustannustehokkaalla tavalla samalla kun täytetään yhteisesti sovittuja tavoitteita esimerkiksi hajautetun energian tuotannossa. Hajautettu energia muuttaa kustannusoptimaalista tuotantorakennetta – erityisesti joustavuudesta tulee entistä arvokkaampaa kun tuuli- ja aurinkosähkö lisääntyy. Aurinkoenergiankäyttö jäädytetyissä rakennuksissa on suositeltavaa, sillä silloin tuotto ja kulutus on samanaikaista. Biopohjaisen hajautetun tuotannon etuna on sen riippumattomuus sääolosuhteista.

Uusiutuvien energioiden käyttöön tulee kannustaa ja tehdä siihen liittyvä pientuotanto mahdolliseksi hajautettujen energiajärjestelmien yhteydessä samalla huomioiden koko energiajärjestelmämme toiminta ja kokonaisuuden päästöjen pienentäminen. Hajautetun energiantuotannon teknologian kysyntä kasvaa maailmalla, ja Suomella on mahdollisuus kasvattaa tällä alueella uusia liiketoimintamahdollisuuksia ja vientiä. Hajautettuihin pienimuotoisiin energiajärjestelmiin liittyy myös mahdollisuus hyödyntää kotimaisia paikallisia uusiutuvia energiavaroja ja korvata fossiillista tuotipolttoainetta. Hajautetuilla energiajärjestelmillä voidaan saavuttaa siten positiivisia vaikutuksia päästökehitykseen, kauppataseeseen ja kansantalouteen. Pienimuotoiseen energiantuotantoon (alle 1 MW) liittyvistä työllisyys- ja kansantalousnäkökohdista puuttuu kuitenkin tällä hetkellä yksiselitteistä aineistoa ja niiden arviointiin tulisi kehittää metodologiaa, jolla voidaan myös perustella yhteiskunnan tukitoimien miellekkyyttä jatkossa.

Lämpöpumpuilla ja biomassoihin perustuvalla pienenergiatuotannolla on hyvät edellytykset vastata rakennetun ympäristön energiantuotanto/tehostamistarpeeseen vuoteen 2020 mennessä. Lämpöpumppujen ilmastoystävällisyyden kehittäminen vaatii kuitenkin ratkaisuja, jolla talviaikainen sähkönkulutus voidaan minimoida. Lämpöpumppuratkaisu soveltuu erityisen hyvin alueille, joissa ei ole yhdistetyn sähkön ja kaukolämmön tuotantoa saatavilla. Aurinkoenergian mahdollisuudet osana rakennetun ympäristön hajautettua energiajärjestelmää voi muodostua merkittäväksi tulevaisuudessa, jos aurinkosähkön hintakehitys jatkuu nykyisellä tavalla. Samalla on kuitenkin huomioitava koko järjestelmän toimivuus myös silloin kun aurinkoa ei ole saatavilla. Tämä vaatii uusia varastointiteknologioita ja hybridijärjestelmiä sekä huippukuormien hallintaa.

Hajautetuista energiajärjestelmistä on maailmalla kokemuksia osana valtakunnallista sähköverkkoa. Suomen erityispiirteenä on varsinkin kaupungeissa yhdistettyyn lämmön- ja sähköntuotantoon perustuva kaukolämpöverkko. Aurinko- ja maa- ja merilämmön yhdistämisestä CHP-kaukojärjestelmiin tulisi tutkia lisää, jotta löydettäisiin tavat hyödyntää näitä lämmönlähteitä ilman, että synnytetään päästöjen kannalta negatiivisia kerrannaisvaikutuksia.

Käyttäjien ja rakennusten ohjauksen ja ylläpidon rooli on keskeinen toteutunutta kulutusta seurattaessa. Tätä on kuitenkin mahdotonta säädellä mutta kannustavia ja ohjaavia toimenpiteitä tulee kehittää. Esimerkiksi hinnoittelulla ja energiankulutuksesta informoimalla on usein osoitettu olevan selkeä kulutusta hillitsevä vaikutus.

Pienimuotoisiin uusiutuviin energialähteisiin tuotanto- ja käyttöketjun työllisyysvaikutuksista tuotettua energiamäärää kohti on tehty kansainvälisestikin vähän selvityksiä, joiden perusteella eri tuotantotapoja on vaikea saada täsmällisesti vertailukelpoiksi keskitettyihin ratkaisuihin nähden. Selvitysten tekovuodet vaihtelevat, eri energiantuotantomuotojen selvitysten välilliset työllisyysvaikutukset muun muassa välituotekäytön osalta ovat puutteelliset tai eivät ole läpinäkyvästi dokumentoitu. Hajautettujen energialähteiden osalta kotimainen aineisto puuttuu käytännössä kokonaan. Lisäksi arvioiden tekeminen

uusiutuvia energiaa koskevista selvityksistä on lähes mahdotonta, koska ne kattavat etenkin suuren mittakaavan tuotantoa (ks. esim. Lindroos ym. 2012).

Taloudellisia vaikutuksia arvioidessa on olennaista huomioida että sähkön arvo ei ole sama jokaisena vuorokauden ja vuoden tuntina. Olennaista taloudellisessa arvioinnissa on siis huomioida mihin ajanhetkeen uusiutuvan energian tuotanto tapahtuu ja mitä tuotantoteknologiaa se korvaa (kts esim. Borenstein 2011). Tämä vaikuttaa niin työllisyyteen, kansantalouden kustannuksiin, kuluttajien kohtaamiin hintoihin kuin päästöihinkin. Täten uusiutuvan energian ja hajautetun energiantuotannon taloudelliset vaikutukset voivat vaihdella voimakkaasti eri alueiden ja maiden välillä. Epäsuoria vaikutuksia työllisyyteen tulee lisäksi mm. innovaatiotoiminnan kautta.

Tuontipolttoaineiden teknillinen korvaamispotentiaali hajautetulla energiatuotannolla on suuri energiaintensiivisen teollisuuden ulkopuolella. Öljyn korvaaminen hajautetun energijärjestelmän uusiutuvalla energialla rakennusten erillislämmityksessä on parhaat mahdollisuudet toteutua jo lähitulevaisuudessa. Kaasun ja kivihiilen suurempi korvaaminen kuitenkin edellyttäisi, että uusiutuvalla energialla tuotettu hajautettu energia korvaisi nykyisillä keskitetyillä kaukolämmön ja sähkön yhteistuotantolaitoksilla tuotettua energiaa. Tämän realisoituminen on jo teknis-taloudellisessa ja osittain poliittisessa mielessä vaikea asia.

VIITTEET

Airaksinen, M. Seppälä, J., Vainio, T., Tuominen, P., Regina, K., Peltonen-Sainio, P., Luostarinen, S., Sipilä, K., Kiviluoma, J., Tuomaala, P., Savolainen, I., Kopsakangas-Savolainen, M. Rakennetun ympäristön hajautetut energijärjestelmät. Suomen ilmastopaneeli. Raportti 4/2013.

Airaksinen, M., Vainio, T., 2012, Rakennuskannan korjaamisen ja kunnossapidon energiantehokkuustoimenpiteiden vaikuttavuuden arviointi energiansäästön, CO2 ekv päästöjen, kustannuksien ja kannattavuuden näkökulmista, Espoo 2012, VTT-CR-00426-12

Airaksinen, M., Vuolle M., 2013, Heating Energy and Peak-Power Demand in a Standard and Low Energy Building, *Energies*, 6, 235-250

Alakangas, E., Erkkilä, A. ja Oravainen H. (2008) Tehokas ja ympäristöä säästävä tulisijälämmitys - Polttopuun tuotanto ja käyttö. VTT-R-10553-08. Intelligent Energy Europe. Jyväskylä 2008.

Audin, L. (1993) Occupancy sensors: promise and pitfalls, E-Source Tech Update, Old Snowmass, CO, USA.

Borenstein, S. (2011) The Private and Public Economics of Renewable Electricity Generation, Center for Energy and Environmental Economics, University of California, E3WP-017R.

Caddet (1995) Saving energy with efficient lighting in commercial buildings, Maxi Brochure 01, Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies, Sittard, The Netherlands.

Corbus D, Schuerger M, Roose L, Strickler J, Surlles T, Manz D, Burlingame D, Woodford D, Oahu wind integration and transmission study: Summary report, NREL/TP-5500-48632, 2010.

EPRI (1994) Occupancy sensors: positive on/off lighting control, EPRI BR-100323, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA.

Heinimö, J. ja Alakangas, E. (2011). Market of biomass fuels in Finland – an overview 2009, Lappeenranta University of Technology, Institute of Energy Technology, Research Report 19.

Helin, T., Sokka, L., Soimakallio, S., Pingoud, K., Pajula, T. 2012. Approaches for inclusion of forest carbon cycle in life cycle assessment – A review. GCB Bioenergy (in press).

Holopainen, R., Vares, S., Ritola, J., Pulakka, S., 2010, Maalämmön ja -viilennyksen hyödyntäminen asuinkerrostalon lämmityksessä ja jäähdytyksessä, VTT Tiedotteita 2546 ,VTT, Espoo. 56 s.

Holtinen H., Meibom P., Orths A., van Hulle F., Lange B., O'Malley M., Pierik J., Ummels B., Tande J.O., Estanqueiro A., Matos M., Gomez E., Söder L., Strbac G., Shakoor A., Ricardo J., Smith J.C., Milligan M., Ela E., "Design and operation of power systems with large amounts of wind power" Final report, IEA WIND Task 25, Phase one 2006-2008. Espoo, VTT. 200 p. + app. 29 p. VTT Tiedotteita - Research Notes 2493. Available at <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2009/T2493.pdf>

IPCC 2011. Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Kiviluoma J, Meibom P, Tuohy A, Troy N, Milligan M, Lange B, Gibescu M, O'Malley M, "Short Term Energy Balancing With Increasing Levels of Wind Energy", IEEE Trans. on Sus. Ene., Vol. 3, Iss. 4, pp. 769-776.

Kiviluoma J, Meibom P, "Influence of wind power, plug-in electric vehicles, and heat storages on power system investments", Energy, Vol. 35 (3), pp. 1244–1255, 2010.

Lindell, M. ja Weckström, H. (2012). Valtakunta ensimmäinen maalämpöpumppuvertailu. Teknikan maailman erikoisnumero: Kodin energia. TM 18E/2012

Lindroos, T.J., Hast, A., Ekholm, T., Savolainen, I. 2011. Arvio ei-päästökauppasektorin päästövähennyskeinoista ja kustannuksista Suomessa. VTT Tiedotteita 2605. 65s.+liitt. 9s.

Lindroos, T.J., Monni, S., Honkatukia, J., Soimakallio, S., Savolainen, I. 2012. Arvioita uusiutuvan energian lisäämisen vaikutuksista Suomen kasvihuonekaasupäästöihin ja kansantalouteen. Espoo 2012. VTT Technology 11. 123 s. + liitt. 6 s.

Motiva 2011. Maatilojen energiaohjelma. Energiaa viisaasti maatilalla. http://www.mmm.fi/attachments/maatalous/tuotanto/5zVBwYp6Z/Maatilojen_energiaohjelma_Energiaa_viisaasti_maatilalla.pdf

Niemeläinen, O., Virkkunen, E., Jauhiainen, L. ja Lötjönen, T. (2012) Kuinka paljon viherkesanto- ja hoidettu viljelemätön peltolohkoilla olisi satoa biokaasun tuotantoon?. In: Toim. Nina Schulman ja Heini Kauppinen. Maataloustieteen Päivät 2012, 10.-11.1.2012 Viikki, Helsinki : esitelmät, posterit. Suomen maataloustieteellisen seuran tiedote 28: 6 p. [Url] Julkaistu 11.1.2012

Pahkala, K. ja Lötjönen, T. (2012) Peltobiomassat tulevaisuuden energioresurssina. MTT Raportti 44: 59 s. Verkkojulkaisu päivitetty 19.6.2012.

Pingoud, K., Savolainen, I., Seppälä, J., Kanninen, M., Kilpeläinen, A. Metsien käytön ja metsäbioenergian ilmastovaikutukset. Suomen ilmastopaneeli. Raportti 2/2013.

Rebours Y, Trotignon M, Lavier V, Derbanne T, Meslier F, "How much electric inter-connection capacities are needed within Western Europe?", 7th International Conference on the European Energy Market (EEM), 23–25 June 2010.

Rinne, S., ja Syri, S. Lämpöpumput ja kaukolämpö energijärjestelmässä. Suomen ilmastopaneeli. Raportti 3/2013.

Saari, A., Jokisalo, J., Keto, M., Alanne, K., Niemi, R., Lund, P., Paatero, J., 2010, Kestävä energia loppuraportti, TKK-R-B24, Aalto Yliopisto, Espoo 2010, 97 s.

Soimakallio, S., Kiviluoma, J., Saikku, L. 2012. The complexity and challenges of determining GHG emissions from grid electricity consumption and conservation in LCA - A methodological review. *Energy* 36, 6705–6713.

Steinfeld, J.; Bruce, A.; Watt, M. Peak load characteristics of Sydney office buildings and policy recommendations for peak load reduction. *Energy Build.* 2011, 43, 2179–2187.

Tilastokeskus 2012. Suomen kasvihuonekaasupäästöt 1990 – 2010. Katsauksia 2012/1. 57s+liitt.

Thyholt, M.; Hestnes, A.G. Heat supply to low-energy buildings in district heating areas, Analyses of CO2 emissions and electricity supply security. *Energy Build.* 2008, 40, 131–139.

Tuomaala, M., Ahtila, P., Haikonen, T., Kalenoja, H., Kallionpää, E., Rantala, J., Tuominen, P., Shemeikka, J., Rämä, M., Sipilä, K., Pursiheimo, E., Forsström, J., Wahlgren, I., Lahti, P. (2012) Energiatehokkuuden mittarit ja potentiaalit. Aalto-yliopisto, 1/2012.

van Vuuren, D., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J., Rose, S.K. (2011). The representative concentration pathways: an overview *Climatic Change* 109:5–31, DOI 10.1007/s10584-011-0148-z