

energy visions

A stylized sun graphic with yellow and orange rays, positioned behind the word 'visions' and extending across the horizontal line.

2050

Yhteenveto

ENERGY VISIONS 2050 – SUOMENKIELINEN YHTEENVETO

VTT on julkaissut Energy Visions 2050 -kirjan kesäkuussa 2009. Kirja käsittelee globaalia näkökulmasta energiasektorin pitkän aikavälin kehitystä vuoteen 2050 asti. Se sisältää arvioita teknologian kehityksestä ja tulevaisuuden teknologioista kattaen koko energijärjestelmän eli energiavarat, energian tuotannon, loppukäytön sekä energian siirron ja jakelun teknologiat.

Kirjassa esitetään skenaarioita energijärjestelmän kehityksestä, jotka on saatu laajojen mallilaskelmien tuloksena. Skenaarioiden tuloksina on saatu mm. arvioita tulevaisuuden energijärjestelmän rakenteesta, mikäli ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi vaadittavat kasvihuonekaasupäästöjen vähennykset toteutetaan tehokkaasti.

energy visions 2050

VTT:n kesäkuussa 2009 julkaisema Energy Visions 2050 –kirja luotaa keskeisiä globaalia energiajärjestelmää tulevaisuudessa koskettavia haasteita ja puhtaiden energiateknologioiden tulevaisuuden kehitystä keinona vastata haasteisiin. Kirjassa esitettyjen teknologisten keinojen avulla ilmastonmuutosta pyritään hillitsemään inhimillistä hyvinvointia vaarantamatta. Teknologioiden vaikutusta ilmastonmuutoksen hillinnässä tutkitaan laajoilla mallilaskelmilla, joissa on analysoitu vaihtoehtoisia maailmantalouden ja energiajärjestelmien kehityspolkuja. Tulevaisuuden tarkastelut ulottuvat aina vuoteen 2050 asti.

Sisältö kattaa koko energiaketjun teknologiat: energiantuotannon, lopukäytön sekä energian siirron ja jakelun teknologiat. Lisäksi kirjassa luodaan kattava katsaus maailman energiavaroihin. Tässä suomenkielisessä yhteenvedossa on esitetty kirjan keskeinen sisältö.

Kirja sisältää erillisiä visionäärisiä tietolaatikoita, joissa esitettyjen ideoiden toteutuminen tai yleistyminen kuvatulla tavalla ei välttämättä vaikuta todennäköiseltä kirjan tarkasteluajanjaksolla. Myös tämä yhteenvedo sisältää muutaman esimerkin näistä visioista.

Kirjan tulokset on saatu laajan kansallisen ja kansainvälisen tutkimuslaitosten ja yliopistojen yhteistyön tuloksena, ja ne esittävät suomalaisen vision teknologian kehittämisen mahdollisuuksista tulevaisuuden energiahaasteisiin, erityisesti ilmastonmuutokseen, vastaamiseksi. Työhön on osallistunut kymmeniä eri teknologia-alojen asiantuntijoita VTT:stä.

Energy Visions 2050 –hanke kuuluu Tekesin ClimBus-ohjelmaan, ja sen rahoittajina ovat olleet Tekes, VTT ja Valtion taloudellinen tutkimuskeskus VATT.

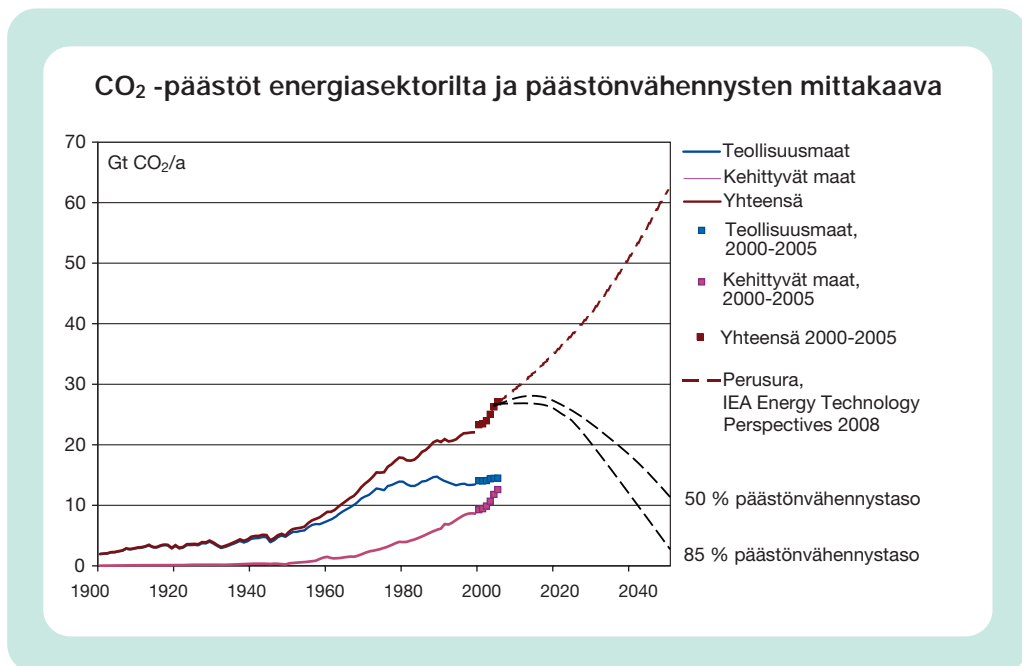
TULEVAISUUDEN HAASTEET JA NIIDEN VAIKUTUKSET ENERGIASEKTORIIN

Maailman energiajärjestelmä on suurien haasteiden edessä. Energian kysynnän kasvu aiheutuu pääosin maailmantalouden ja väestön kasvusta. Ilmastonmuutoksen hillitseminen on keskeisin energian tuotannon ja käytön ympäristövaikutusten vähentämiseen liittyvä haaste. Lisäksi tulevaisuudessa korostuvat energiaturvallisuuden liittyvät haasteet. Nämä haasteet ovat keskeisiä energiajärjestelmien kehitystä pitkällä aikavälillä ajavia voimia.

Maailman primäärienergian kulutuksen

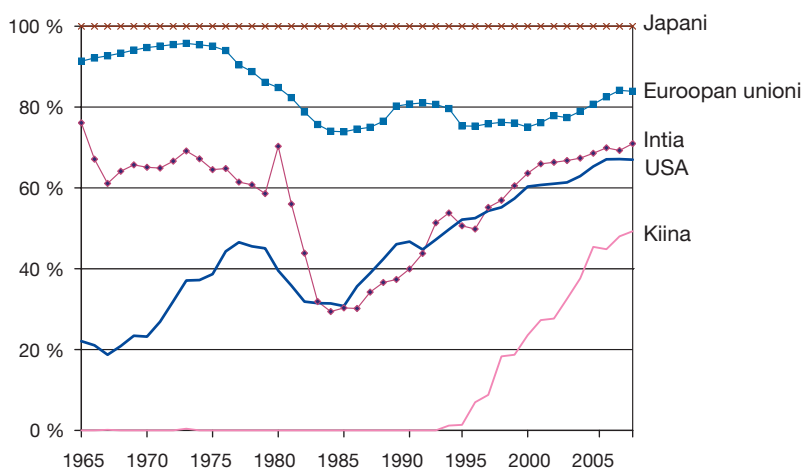
kasvu on 2000-luvun alussa ollut keskimäärin lähes 3 % vuodessa. Merkittävä osa kasvusta sijoittuu nopeasti kehittyviin maihin, erityisesti Kiinasta ja Intiaan. Maailman primäärienergian kulutus vuonna 2006 oli noin 490 EJ. Maailman nykyinen energiajärjestelmä perustuu yli 80 %:sti fossiilisiin polttoaineisiin, joista tärkeimmät ovat öljy (35 % primäärienergiasta, hiili (26 %) ja maakaasu (20 %). (IEA 2008)

Energian tuotanto nykyisellään aiheuttaa ympäristöongelmia, kuten happamointumista, ilmanlaatuongelmia ja erityisesti kasvihuonekaasupäästöjä. Energiantuotannosta aiheutuvat hiilidioksidipäästöt (CO₂) ovat kasvihuonekaasupäästöjä, joita pidetään merkittävimpinä ilmastonmuutokseen vaikuttavana tekijänä. Ilmastonmuutos on



KUVA 1. CO₂-päästöt fossiilisten polttoaineiden käytöstä teollisuusmaissa (ns. Kioton pöytäkirjan liitteen I valtiot) ja kehittyvissä maissa (muut kuin Kioton pöytäkirjan liitteen I valtiot). Kuvassa näkyy toteutuneiden päästöjen historia vuosina 1900–2005 ja ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi vaadittavien päästövähennysten mittakaava. IPCC:n (2007) mukaan tarvitaan 50–85 %:n vähennys vuoden 2000 tasosta vuoteen 2050 mennessä, jotta maapallon keskilämpötilan nousu esiteolliseen aikaan verrattuna voidaan rajoittaa kahteen asteeseen. Rajoittamalla maapallon keskilämpötilan nousu kahteen asteeseen esiteolliseen aikaan nähden voidaan merkittävästi rajoittaa ilmaston muuttumisesta seuraavia haittoja verrattuna tilanteeseen, jossa lämpötila nousisi selvästi yli kahden asteen tason. (Kuvan tietojen lähteet: CDIAC, IEA, VTT, CAIT)

Tuontiöljyn osuus öljynkulutuksesta



KUVA 2. Tuontiöljyn osuus öljynkulutuksesta eräissä maissa ja Euroopan unionissa. Tuontiöljyn osuus EU:ssa ja USA:ssa laski 1970- ja 1980-lukujen öljykriisien jälkeen, mutta viime vuosina tuonti on kasvanut. Tuontiöljyn osuus myös Kiinassa ja Intiassa on kasvussa. (Kuvan tietojen lähde: BP 2008)

laajalti tunnustettu suurimmaksi maailmanlaajuisesti ympäristöuhaksi.

Energiasektori – energian tuotanto ja käyttö – on maailmanlaajuisesti suurin kasvihuonekaasupäästöjen lähde. Ilmakehän kasvihuonekaasujen rajoittaminen turvalliselle tasolle vaatii hyvin rajuja päästöleikkauksia tulevina vuosikymmeninä. Lisäksi maailman CO₂-päästöjen pitäisi kääntyä laskuun vuosien 2000–2015 välillä eli aivan lähivuosina. CO₂-päästöjen historiallinen kehitys ja päästöjen rajoittamisen erittäin haastava mittakaava näkyy kuvasta 1.

Maailmassa nykyisin käytetyistä energia-varoista erityisesti öljy- ja kaasuarvat ovat maantieteellisesti erittäin keskittyneitä. Lukuisissa tutkimuksissa helposti hyödynnettävien varojen arvioidaan saavuttavan tuotantohuippunsa tulevien vuosikymmenten aikana. Useat maat ovat hyvin riippuvaisia tuontienergiasta (kts. kuva 2 tuontiöljyn osuudesta eräissä maissa). Kehityssuuntaus

voi tulevaisuudessa vaarantaa yhä useamman maan energian saatavuuden ja altistaa ne yhä enemmän energian hinnan heilahteluille. Viimeisten vuosikymmenten kehitys on johtanut siihen, että maiden tai maaryhmien **energiaturvallisuuden parantaminen** on keskeinen tulevaisuuden kehitystä ajava voima.

Kehittyneitä teollisuusmaita ja kehittyviä maita tulevaisuudessa kohtaavat energiaan liittyvät haasteet ovat hyvin erilaisia. Kehittyvissä maissa on yhä 1,5 miljardia ihmistä ilman nykyaikaisia energiapalveluita, mikä on vakava este kehitykselle. Kehittyneissä maissa ongelmat liittyvät ikääntyvien energiajärjestelmien suurien kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen. Ympäristöystävällisiä ratkaisuja tarvitaan myös kehittyvissä maissa, joissa energiantarve kasvaa nopeasti.

Energiantuotannon ja käytön järjestelmän on muututtava radikaalisti, jotta tu-

levaisuuden haasteisiin voidaan vastata. Keinot kehitykseen vaikuttamiseksi voidaan periaatteessa jakaa kahteen luokkaan: 1) teknologiset keinot ja 2) kulutuksen rakenteen muuttumiseen vaikuttavat keinot. Teknologiaan ja kulutuksen muutokseen liittyvät keinot eivät kuitenkaan välttämättä ole toisistaan riippumattomia. Energy Visions 2050 -kirjan käsittelyn pääpaino on teknologian mahdollistamissa keinoissa, mutta myös kulutuksen rakenteeseen vaikuttavia keinoja sivutaan. Tämä yhteenveto keskittyy erityisesti teknologiaan.

Haasteisiin vastaaminen vaatii tehokkaampien energiantuotanto- ja loppukäyttöteknologioiden kehittämistä ja käyttöönottoa. Energiantuotannon tulee tulevaisuudessa perustua hiilidioksidivapaisiin ja vähäpäästöisiin tuotantomuotoihin, joihin kuuluvat uusiutuvia energialähteitä hyödyntävät teknologiat, ydinvoima sekä hiilidioksidin talteenotto- ja varastointiteknoteknologiat (carbon capture and storage, CCS). Uusien energiateknologioiden soveltaminen

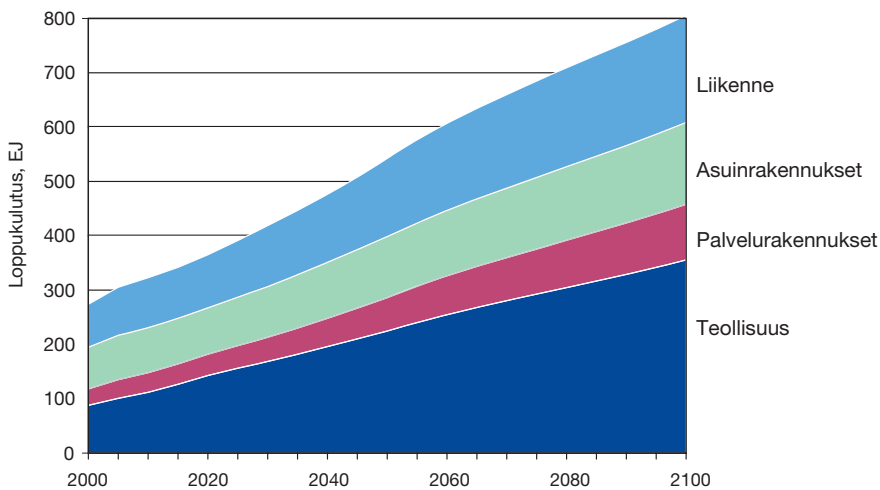
aiheuttaa tulevaisuudessa kehitystarpeita myös energian jakelulle, kuten sähkösiirto- ja jakeluverkoille.

Teknologian kehitys on hyvin hidasta. Teknologian kehittyminen laboratorioista laajasti markkinoille voi kestää vuosikymmeniä. Lisäksi erityisesti energiajärjestelmien muutoksia hidastavat **investointien pitkät käyttöiät**. Esimerkiksi rakennusten tekniset käyttöajat ovat tyypillisesti 50–100 vuotta, samoin vesi- ja ydinvoimalaitosten eliniät voivat ylittää 50 vuotta. Toisaalta hitaudesta johtuen on mahdollista tarkastella energiajärjestelmän muutoksia ja kehitysmahdollisuuksia jopa vuoteen 2050 saakka.

ENERGIAN KÄYTTÖ

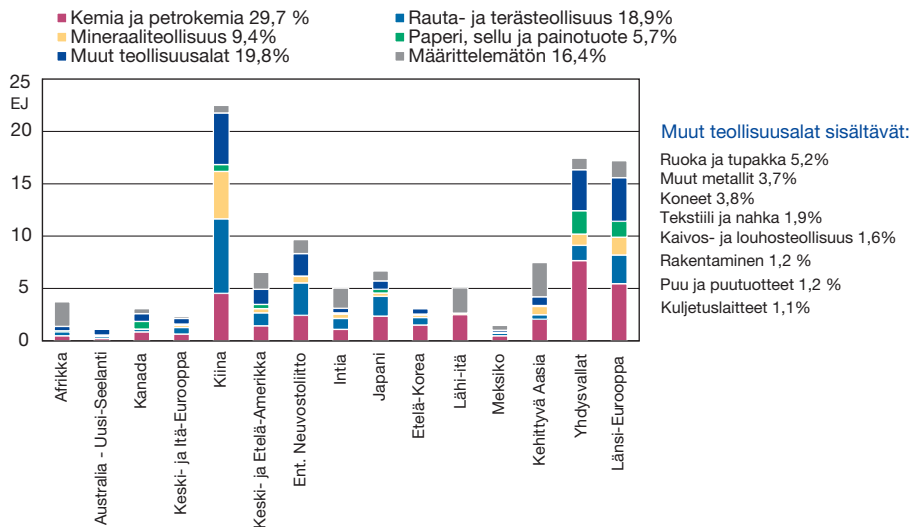
Energiaa käytetään kaikkialla yhteiskunnassa kuluttajien tarpeiden tyydyttämiseksi. Energy Visions 2050 -kirjassa tulevaisuuden teknologiamahdollisuuksia on arvioitu loppukäyttösektoreittain: **teollisuus, rakennukset (palvelu- ja asuinrakennukset)**

Maailman energian loppukulutus sektoreittain perusskenaariossa



KUVA 3. Energia loppukäyttö maailmassa sektoreittain Energy Visions 2050 -kirjan perusskenaariossa. Skenaariossa teollisuus- ja palvelusektorien loppuenergian käyttö kasvaa nopeimmin.

Teollisuuden energian loppukäyttö maailmassa - 113 EJ vuonna 2004



KUVA 4. Energiankulutus teollisuussektoreittain vuonna 2004. (Kuvan tietojen lähde: IEA)

sekä liikenne.

Energiatehokkuus ja sen parantaminen ovat tärkeitä käsitteitä tulevaisuuden energian käyttöä tutkittaessa. Yksinkertaistettuna energiatehokkuuden parantaminen tarkoittaa sellaisen uuden teknologian tai käyttötottumuksen omaksumista, joka vaatii vähemmän energiaa saman tuotteen tai palvelun tuottamiseksi. Energiatehokkuuden parantaminen parantaa siten myös energiaturvallisuutta ja vähentää energiantuotannon ympäristövaikutuksia.

Teollisuuden energiankäyttö

Teollisuuden kehittämisen aikana sen energiankulutus on kasvanut tuotantomäärien kasvaessa. Historiallisesti teollisuuden energiankäytön ja bruttokansantuote ovat olleet kytköksissä toisiinsa, mutta viime aikoina tieto- ja tietoliikenneteknologian (ICT) ja palvelusektorin kasvu ovat pienentäneet tätä riippuvuutta. Kehityssuuntaus on kulkenut kohti tuotteiden korkeampaa jalostusastetta,

mikä on lisännyt energiankulutusta. Prosessien kehittäminen on kompensoinut tätä kehitystä, eli prosessien energiatehokkuus on parantunut. Energiatehokkuuden tulisi olla olennainen osa prosessien suunnittelussa ja toiminnassa. Energiatehokkuuden kannalta olennaisimmat päätökset tehdään prosessin suunnittelu- ja rakennusvaiheessa.

Maailmanlaajuisesti energiankäytöltään suurin teollisuudenala on kemian- ja petrokemianteollisuus, joka kulutti 30 % teollisuuden loppuenergiasta vuonna 2004. Seuraavina olivat metalliteollisuus (19 %) ja mineraaliteollisuus (9 %). Metsä- ja paperiteollisuus on neljänneksi suurin nimetty luokka (6 %). Yhteensä neljä merkittävintä teollisuudenalaa kuluttivat yli 60 % teollisuuden energian globaalista loppukulutuksesta (kuva 4).

Teollisuuden energiankulutus voidaan jakaa prosessissa kulutettavaan energiaan ja muuhun kulutukseen (tilojen lämmitys, valaistus jne.). Termodynamiikan lait asettavat teoreettisen minimin prosessien ener-

TAULUKKO 1. Pitkän aikavälin mahdollisuudet energiatehokkuuden parantamiseksi joidenkin teollisuustuotteiden valmistuksessa. Nykytilan ja teoreettisesti saavutettavissa olevan tason välillä on merkittäviä eroja tuotteiden välillä. Lyhenne SEC tarkoittaa ominaisenergiankulutusta (specific energy consumption). (Turkenburg 2007)

**Energiatehokkuuden parantamis-
mahdollisuudet pitkällä aikavälillä**

SEC, GJ/tonni tuotetta	Nykyinen paras	Tulevat teknologiat	SEC, teoreettinen minimi
Paperi/kartonki	2,3-8,6	0,6-4,3	0,0
Neitseellinen teräs	19,0	12,5	6,6
Kierrätysteräs	7,0	3,5	0,0
Ammoniakki	33,0	28,6	19,2
Typpihappo	26,8	15,3	3,2

giankulutukselle. Esimerkiksi veden haihduttaminen ja kemialliset reaktiot vaativat tietyn määrän energiaa. Näitä rajoituksia energiatehokkuuden parantamiselle voitaisiin ohittaa suunnittelemalla uudelleen koko prosessikonsepti, esimerkiksi paperinvalmistus käyttämättä vettä prosessissa. Toinen vaihtoehto on korvata prosessiin syötettävä energia alempiarvoisella energialla, kuten matalalämpöisellä höyryllä. Suuret parannukset prosessien energiatehokkuudessa edellyttävät täten merkittäviä muutoksia prosesseihin. Teollisuudessa muutoksia hidastavat lisäksi investointien pitkät eliniät, hitaasti muuttuvat toimintatavat ja pääomavaltaisuus. Vaikka itse prosessin energiankulutus olisi lähellä teoreettista minimiä, muun kulutuksen pienentäminen voi tarjota merkittäviä energiansäästämahdollisuuksia.

Teollisuusprosessien energiankäyttö ja energiatehokkuus vaihtelevat paljon prosessista riippuen, eikä niiden mittaaminen ole yksiselitteistä. Jopa saman tuotteen valmistusprosesseilla voi olla yksilöllisiä ominaisuuksia. Teknologian mahdollisuudet energiatehokkuuden parantamiseksi eri te-

ollisuudenaloilla koostuvat hyvin kirjavasta joukosta eri teknologioita. Taulukossa 1 on arvioitu mahdollisuuksia energiatehokkuuden parantamiseksi pitkällä aikavälillä eräiden teollisuustuotteiden valmistuksessa ominaisenergiankulutusta mittarina käytäten. Taulukosta 1 nähdään, että parhaiden nykyisten prosessien, tulevaisuuden teknologioiden ja teoreettisten minimien energiakulutuksessa on merkittäviä eroja tuotteiden välillä. Myös parhaan teknologian levinneisyydessä voi olla eroja. Teknologian mahdollisuudet parantaa tuotteiden valmistuksen energiatehokkuutta voivat täten voimakkaasti vaihdella teollisuusalojen ja alueiden välillä. Energy Visions 2050 sisältää analyysin tärkeimpien teollisuussektoreiden teknologioista sekä yhden kappaleen yleisistä, kaikille teollisuusaloille sovellettavissa olevista teknologioista.

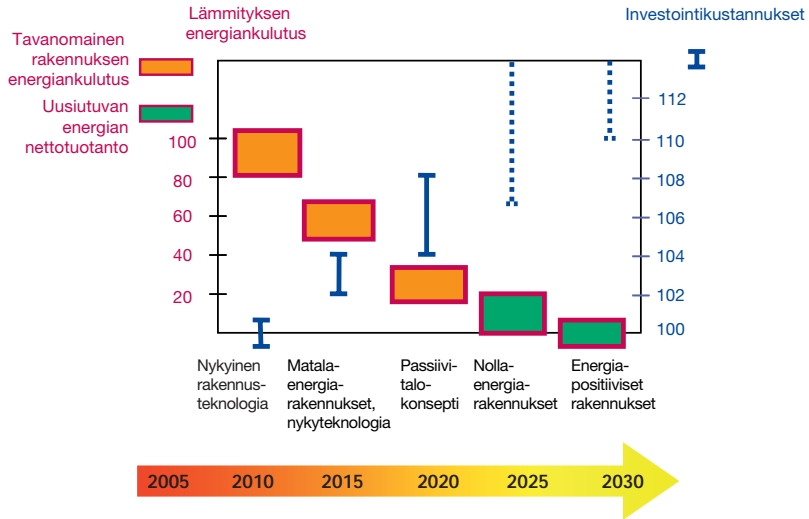
Rakennussektori

Rakennussektorilla (eli asuin- ja palvelurakennuksissa) pääasialliset energian loppukäyttökohteet ovat tilojen lämmitys, lämpimän käyttöveden tuotanto, jäähdytys, valaistus, ruuan valmistus ja moninaiset sähkölaitteiden ryhmän. Rakennussektorin energiatehokkuuden parantamisessa ja rakennussektorilta aiheutuvien CO₂-päästöjen vähentämisessä on kaksi päävaihtetta: (i) rakennusten energiantarpeen vähentäminen, ja (ii) vähentyneen energiantarpeen tyydyttäminen pääasiassa uusiutuvilla energialähteillä.

Energiantarpeen pienentämistä edesauttaa kokonaisvaltainen ja ammattitaitoinen suunnittelu. Tällöin mahdollistuvat energiantarpeen pienentämiseksi edulliset kokonaisvaltaiset ratkaisut, jotka käsittävät rakennusten arkkitehtuurisuunnittelun, rakenteiden suunnittelun ja sähkösuunnittelun sekä rakennusautomaation ja urakoinnin.

Rakennusten tekniset käyttöiät ovat rakennetussa ympäristössä tyypillisesti usei-

Rakennusteknologioiden suhteelliset erot ja kehitys



KUVA 5. Energiatehokkaiden rakennusten lämmitysenergian tarve ja investointikustannukset verrattuna nykyiseen rakennusteknologiaan. Lisäinvestointi on pieni verrattuna esimerkiksi suhdannetilanteesta aiheutuviin hintaheilahduksiin tai rakennuksen sisustuksen kustannuksiin.

ta vuosikymmeniä, joten suuret muutokset rakennuskannassa tapahtuvat hitaasti. Siksi on hyvin tärkeää tehdä perusteltuja ja kestäviä rakennuskannan energiakulutusta ja sen tyydyttämistä koskevia ratkaisuja sekä aluesuunnittelun että yksittäisten rakennusten tasolla. Viimeisen kahden vuosikymmenen aikana tapahtunut rakennus- ja rakennekomponenttitekniikan kehitys sekä huolellinen suunnittelu mahdollistavat tulevaisuudessa huomattavan energiansäästön asuin- ja palvelurakennuksissa. Lukuisien Suomessa toteutettujen koerakennusprojektien perusteella energiaterhokkaiden rakennusten lämmitysenergian säästämahdollisuudet voivat olla yli 50 % nykyisiin rakennuksiin verrattuna (kts. kuva 5). Säästö edellyttää vain marginaalista lisäkustannusta rakennusten koko elinkaaren aikaisiin kustannuksiin.

Energiaterhokkaiden rakennusten markkinat ovat vielä varhaisessa kehitysvaiheessa,

mutta niiden osuuden arvioidaan lähitulevaisuudessa kasvavan ympäristö-, taloudellisten ja poliittisten syiden vaikutuksesta. Rakennussektorilla on mahdollisuudet merkittäviin CO₂-päästöjen vähennyksiin, mutta niiden toteutuminen edellyttää suuria muutoksia rakennussääntöihin ja alalla vallitseviin käytäntöihin.

Kymmenien kansainvälisten koerakennusprojektien perusteella energiaterhokas rakennus on myös hyvä investointi. Vaikka nykytekniologialla toteutettujen matalaenergiarakennusten rakentamiskustannukset ovat 2-5 % suuremmat kuin tavanomaisen rakennuksen, nämä kustannukset tulevat katetuksi pienempien energiakustannusten ansiosta 5-15 vuodessa.

Tilojen lämmitysenergian ja muiden käyttökohteiden (mm. lämpimän käyttöveden tuottaminen, jäähdytys, valaistus, ruuanvalmistus ja sähkölaitteet) osuudet Energy Visions 2050 -skenaarioiden mu-

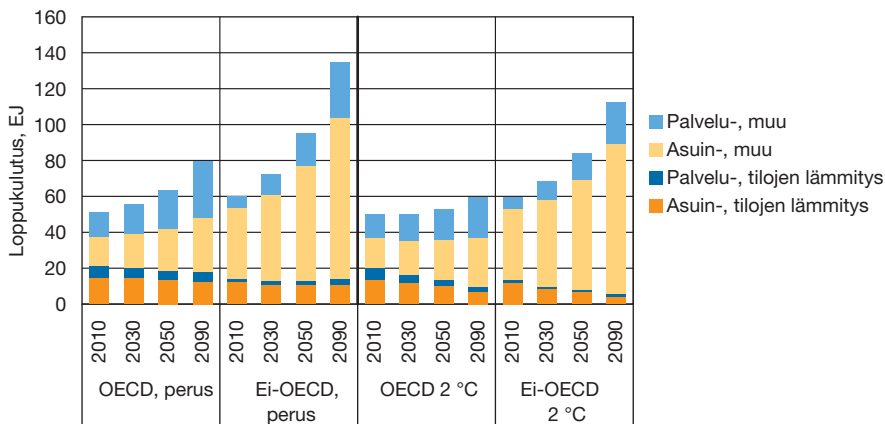
kaan esitetään kuvassa 6. Vuonna 2005 lämmituksen osuus oli noin kolmannes, mutta skenaarioissa sen osuus tulee huomattavasti vähentymään vuoteen 2050 mennessä.

Kuvan 6 kaltainen kehitys on mahdollista, koska monissa maissa tilojen lämmityksen energiatehokkuus on vielä melko heikko, ja siksi huomattavia parannuksia voidaan saavuttaa. Toisaalta jäähdytyksen ja sähkölaitteiden energiankäyttö kasvaa skenaarioissa nopeasti kehittyvissä maissa. Asuin- ja palvelurakennussektorilla sähkölaitteiden energiatehokkuuden parantaminen koostuu hyvin suuresta joukosta teknologioita ja päätöksiä, yksittäisistä Energy Visions 2050 -kirjassa käsitellyistä mahdollisuuksista voidaan mainita kulutuselektronikkalaitteiden lepovirtakulutuksen (ns. stand-by -kulutus) pienentäminen. LED-teknologian kehittyminen ja yleistyminen mahdollistaa tulevaisuudessa huomattavan valaistuksen energiankäytön tehostumisen.

Liikennesektori

Talouden ja yhteiskunnan kehitys heijastuu ihmisten ja hyödykkeiden liikuttamistarpeeseen. Esimerkiksi bruttokansantuotteen kasvu on heijastunut vastaavana tai jopa suurempana liikenteen ja kuljetusten lisääntymisenä jo vuosikymmenien ajan. Vasta viime aikoina suuntaus on muuttunut talouskasvun siirtyttyä enenevästi aineettomiin hyödykkeisiin ja palveluihin. Uusien autojen keskimääräinen polttoaineenkulutus on merkittävästi laskenut viime vuosikymmeninä moottorien tehokkuuden parantumisen ansiosta. Kuluttajien mieltymykset ovat kuitenkin siirtyneet kohti suurempia ja tehokkaampia autoja, jotka ovat kulutusta lisääviä tekijöitä. Nykyisen liikenteen valtateknologian, polttomoottorin (ICE) ja öljyn yhdistelmän korvaamiseksi useat vaihtoehdot, kuten hybridi- ja sähköautot ja polttokennoteknologiaan perustuvat teknologiat, ovat tutkimus- ja kehitystyön kohteena. On kuitenkin vielä liian aikaista

Asuin- ja palvelurakennusten energian loppukulutus maailmassa



KUVA 6. Asuin- ja palvelurakennusten loppuenergiankäyttö Energy Visions 2050 -skenaarioissa. Tilojen lämmityksen osuus loppukulutuksesta vähenee skenaarioissa huomattavasti.



KUVA 7. Keinoja vähentää liikennesektorin ympäristövaikutuksia. Toteuttamiseen tarvittava aika vaihtelee huomattavasti keinojen välillä.

sanoa, mikä näistä nousee tulevaisuuden valtateknologiaksi.

Liikenteessä ja kuljetuksissa sovellettavien energialähteiden ja teknologioiden kirjo tulee tulevaisuudessa huomattavasti lisääntymään. Lähitulevaisuudessa suurin muutos tulee olemaan biopolttoaineiden lisääntyvä käyttö yhdessä öljypohjaisten polttoaineiden kanssa.

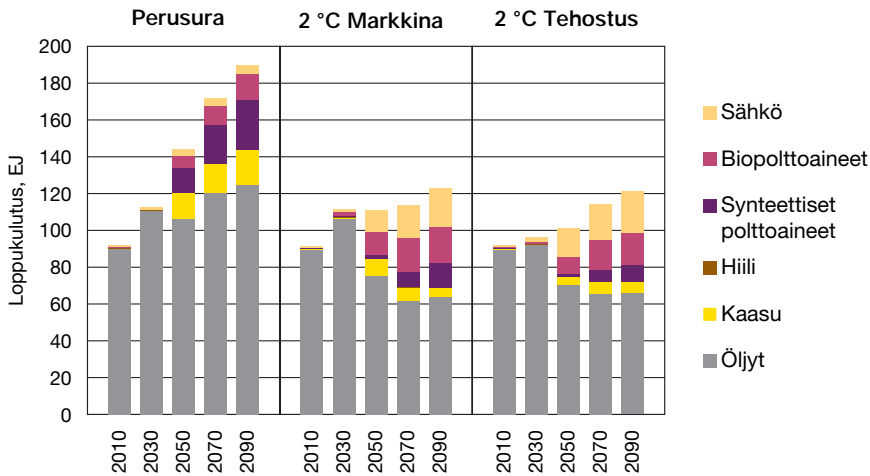
Energy Visions 2050 -kirjan perusskenaariossa liikenteen käyttämä energia kasvaa yli 60 %:lla vuoden 2005 tasosta vuoteen 2050 mennessä. Lentoliikenne on nopeimmin kasvava liikennemuoto, mutta myös tieliikenne kasvaa hyvin nopeasti kehittyvissä maissa. Esimerkiksi kehittyvässä Aasiassa autoliikenne kasvaa kuusinkertaiseksi.

Teknologian mahdollisuudet liikennesektorilla ovat huomattavat, mutta riittävien päästövähennyksen saavuttaminen on suuri haaste. Viime vuosina polttoainetehokkuus on kehittynyt suotuisasti kaikissa liikennemuodoissa, ja skenaarioissa tämän suunta-

uksen on oletettu jatkuvan.

Suuremmat päästövähennykset ja tehokkuuden parantaminen saavutetaan ilmastomuutoksen hillitsemiseen tähtäävissä skenaarioissa (2 °C-skenaariot kuvassa 8), joissa vaihtoehtoisia polttoaineita käyttävät ajoneuvot alkavat vallata markkinaosuutta. Biopolttoainekomponenttien lisääminen dieselajoneuvoihin onnistuu jo nykyteknologialla, ja niiden osuus on teknisesti mahdollista nostaa erittäin korkealle tasolle vuoteen 2050 mennessä. Sähköä hyödyntävät hybridisähköautot ja ns. plug-in-hybridit ovat jo astumassa markkinoille, ja ne ovat mahdollisia lyhyen aikavälin vaihtoehtoja ratkaisuja siirryttäessä täysin sähköisiin sähköautoihin. Toinen merkittävä teknologiavaihtoehto pidemmällä aikavälillä ovat polttokennot, erityisesti vetyä polttoaineena käytettäessä. 2 °C-skenaarioissa sähköautot vaikuttavat kilpailukykyisemmältä vaihtoehdolta pienitehoisimmissa luokissa. Vetyä käyttävät polttokennoajoneuvot valtasivat

Liikenteen energian loppukulutus skenaarioissa



KUVA 8. Energian loppukäyttö liikennesektorilla Energy Visions 2050 -kirjan skenaarioissa. Sähköautot alkavat vallata markkinoita pienemmissä teholuokissa pyrittäessä rajoittamaan maapallon lämpeneminen kahteen asteeseen.

skenaarioissa merkittävän markkinaosuuden raskaammassa liikenteessä vuoden 2050 jälkeen. Liikennesektorilla skenaarioihin sisältyy suuri epävarmuus, joka johtuu vielä kehitysvaiheessa olevista teknologioista ja erityisesti tulevaisuuden poliittisista päätöksistä ja kansallisista säädöksistä

ENERGIAN TUOTANTOTEKNOLOGIAT

Energy Visions 2050 -kirjassa käsitellyt energiantuotantoteknologiat mahdollistavat kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen ja tarjoavat keinon vähentää riippuvuutta hupenevista fossiilisista energiavaroista tulevaisuudessa. Teknologiat perustuvat uusiutuviin tai vähäpäästöisiin energialähteisiin tai hyötysuhteen parantamiseen.

Suurin osa esitellyistä ja arvioiduista teknologioista soveltuu sähköntuotantoon tai nestemäisten tai kaasumaisten biopolttoai-

neiden tuotantoon öljyn ja maakaasun korvaamiseksi. Neste- ja kaasumaisten biopolttoaineiden pääasialliset sovelluskohteet ovat liikennesektorilla, mutta kirjassa käsitellään myös kotitalouksien lämmitys- ja teollisuuden prosessisovelluksia. Yhdyskunnissa ja teollisuudessa sovellettavia lämmöntuotantoteknologioita ovat uudet ja edistykselliset lämmön ja sähkön yhteistuotantoteknologiat (CHP). Pienen mittakaavan lämmöntuotantoteknologiat rajoittuvat aurinkolämmitykseen, polttonenoihin perustuvaan CHP-tuotantoon sekä uusiin, korkealla hyötysuhteella toimiviin varaaviin lämmitysratkaisuihin, joiden pienhiukkaspäästöt ovat alhaiset.

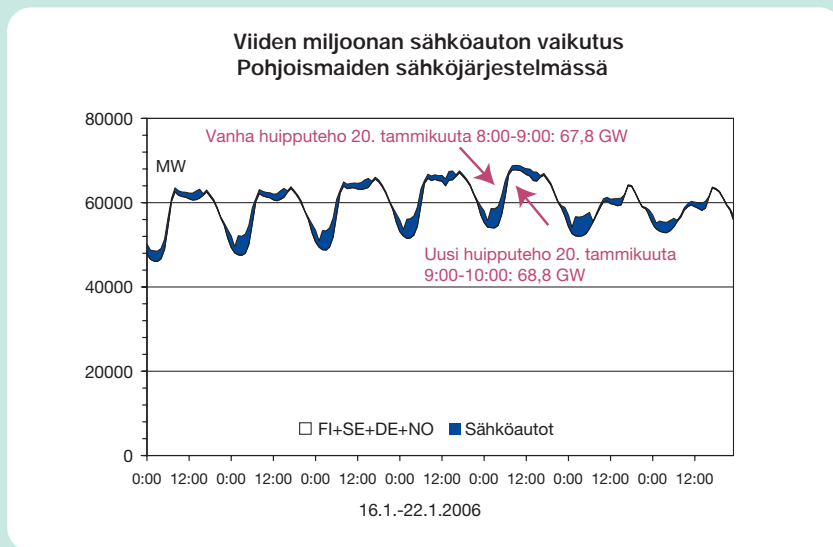
Energy Visions 2050 -kirjassa käsitellään uusiutuviin energialähteisiin perustuvista sähköntuotantomuodoista tuuleen, biomassaan, aurinkoon, vesivoimaan ja valtamerien energiaan perustuvia sähköntuotantoteknologioita. Vähäpäästöisistä sähköntuotantoteknologiavaihtoehdoista käsitellään lisäksi

Visio: 5 miljoonaa sähköautoa Pohjoismaissa – vaikutukset sähköverkkoon

Millaisia vaikutuksia aiheutuu sähköverkkoon, jos puolet Pohjoismaiden henkilöautokannasta on sähköautoja (EV) tai plug-in-hybridisähköautoja (PHEV)? Autoja ladataan älykkäästi, eli lataaminen tapahtuu yöaikaan matalan tehon aikana. Vuosittainen lisäys sähkökulutuksessa on alle 4 % eli noin 14 TWh. Vaikutus huipputehoon olettaen, että

- kaikki autot ladataan kotitalouksien pistokkeista (max 2500 W), ja
- latausjärjestelmä on riittävän älykäs siirtämään 90 % illan kuormituksesta yöaikaan,

voidaan nähdä kuvasta 9. Laskennassa käytettiin vuoden 2006 huipputehoviikkoa. Mikäli autojen lataamista voidaan ohjata, ovat sähköautojen laajamittaisen käyttöönoton vaikutukset sähköjärjestelmään kohtuullisen pieniä. Huipputeho kasvaa alle 2 %.



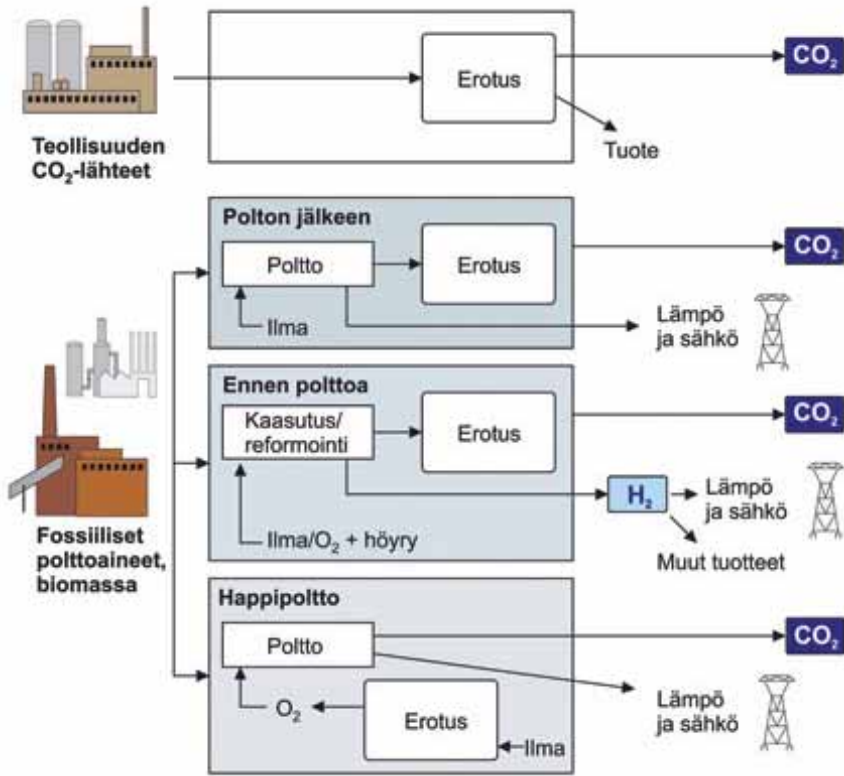
KUVA 9. Viiden miljoonan sähköauton (henkilöauton) vaikutus Pohjoismaiden sähköjärjestelmässä huipputehoviikolla. Laskennassa käytettiin vuoden 2006 toteutunutta huipputehoviikkoa.

ydinvoimaa sekä hiilidioksidin talteenottoa ja varastointia (CCS) ja niiden tulevaisuuden mahdollisuuksia.

Ydinvoiman tulevaisuuden mahdollisuuksiin vaikuttavat oleellisesti uudet tulevaisuuden laitosvaihtoehdot. Kehitteillä on useita edistyksellisiä fissioon perustuvia voimalaitoskonsepteja, joista osassa hyödynnetään nopeita reaktoreita ja suljettua polttoainekiertoa. Ne mahdollistavat uraaniresurssien huomattavasti nykyistä tehokkaamman hyö-

dyntämisen ja turvaavat siten polttoaineen riittävyyden pitkälle tulevaisuuteen. Lisäksi osa uusista voimalaitoskonsepteista voisi toimia prosessilämmön tai vedyn tuotannossa. Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituslaitos, jota varten Suomessa on suunniteltu jätettävän rakennuslupahakemus vuoteen 2012 mennessä, on esimerkki suomalaisesta teknologiakehityksestä kansainvälisellä ydinteknologiakehitystyön alueella. Energia vapautuu myös fuusiossa, raskaiden

Hiilidioksidin talteenoton mahdollisuudet



KUVA 10. Hiilidioksidin talteenoton mahdollisuudet. CO₂:n erottamiseksi on kolme talteenottoteknologioiden pääluokkaa: erotus polton jälkeen, erotus ennen polttoa ja happipolttto, joiden välinen valinta riippuu mm. siitä, minkälaiseen voimalaitokseen CO₂:n erotusta sovelletaan. Erotettu hiilidioksidi puuristetaan kokoon ja kuljetetaan varastointipaikalle putkessa tai laivalla. Soveltuvia varastointipaikkoja voivat olla mm. käytetyt öljy- ja kaasukentät ja muut soveltuvat geologiset muodostumat kuten suolakerrostumat. (Alkuperäinen kuva: IPCC 2005)

vetyisotooppien (deuterium, tritium) yhdistymisessä. Mahdollisuus hyödyntää fuusioenergiaa tulevaisuuden energiaratkaisuna on teoreettisesti todistettu, mutta teknologian mahdollinen kehittyminen soveltamiskelpoiseksi ratkeaa vasta usean vuosikymmenen koe- ja demonstraatiovaiheen jälkeen. Mikäli fuusiovoiman demonstrointi toteutuu menestyksellisesti, sen kaupallinen soveltaminen voi alkaa aikaisintaan vuoden 2050 tienoilla.

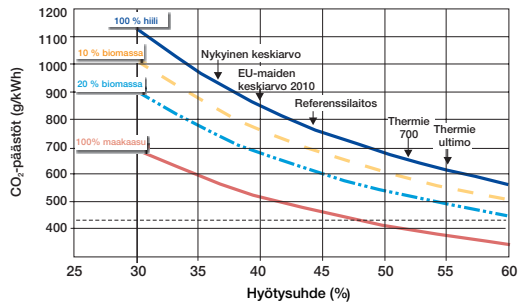
CCS:n nykyinen kehitystyö Suomessa

keskittyy pääosin tekniikan soveltamiseen leijukerroskattiloissa happipolton yhteydessä. Se mahdollistaisi CCS:n soveltamisen suuren kokoluokan CHP-laitoksissa, keski-suuren kokoluokan (600–800 MW) hiili- ja seospolttolaitoksissa ja jälkiasennukset jo toiminnassa oleviin nykyisiin laitoksiin. Myös leijukerrospoltttoa ja paineistettua kaasutusta soveltavat integroidut laitoskonseptit ovat erityisen soveltuvia CCS:lle.

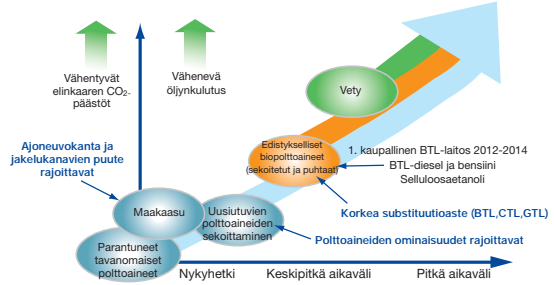
Bioenergian hyödyntäminen suuren kokoluokan laitoksissa on riippuvainen tehok-

ENERGIANTUOTANTOTEKNOLOGIOIDEN KEHITYS

CO₂-päästöjen vähentämismahdollisuudet ylikirittisillä kattiloilla

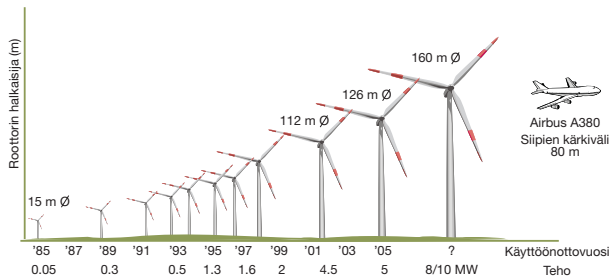


Tiekartta tulevaisuuden liikenteen polttoaineteknologioille

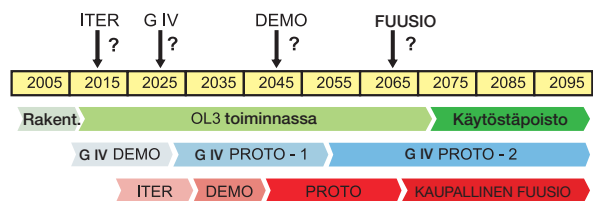


Muokattu lähteestä Røj (2005)

Tuulivoimateknologian kehitys

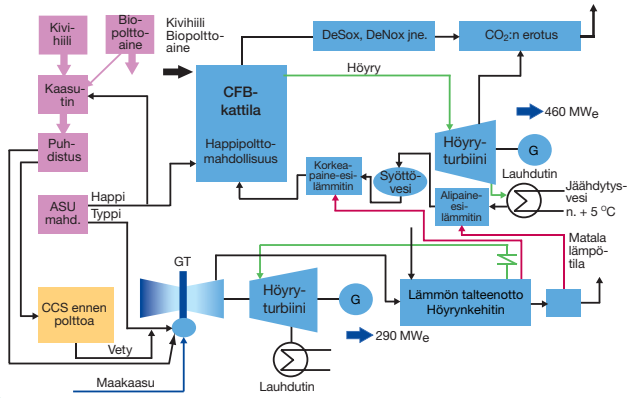


Viitteellinen aikajana uudentyypisten ydinreakteiden kehitykselle



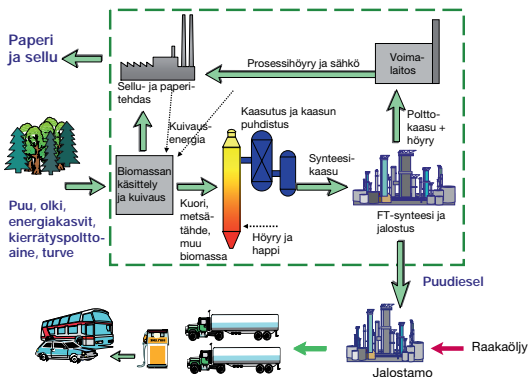
UUSIA SUOMESSA KEHITETTÄVIÄ ENERGIA TEKNOLOGIOITA

Korkean hyötysuhteen monipolttoaine-CHP-laitos CO₂:n erotuksella

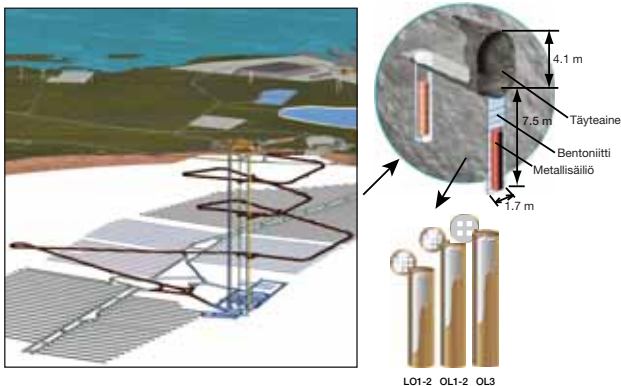


Pohjolan Voima

FT-synteesilaitoksen integrointi sellu- ja paperitehtaaseen



Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitus



Visio: Bioenergia-CCS

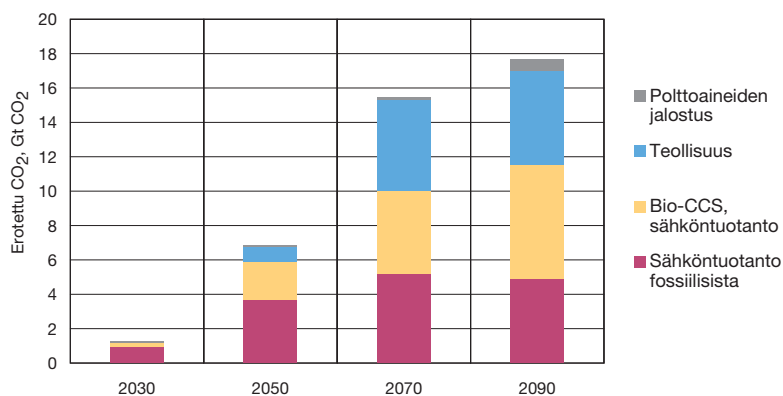
Hiilidioksidin talteenotto- ja varastointitekniologiaa voitaisiin periaatteessa soveltaa myös biomassaperäisten CO₂-päästöjen erottamiseksi, mikäli voimalaitos on riittävää kokoluokkaa kustannusten kattamiseksi. Bioenergia-CCS:llä (bio-CCS:llä) voidaan päästä elinkaarta ajatellen negatiivisiin hiilidioksidipäästöihin.

Biomassalla on tiettyjä energiantuotantoteknologiaan ja tuotettavien energiatuotteiden valikoimaan liittyviä samankaltaisuuksia fossiilisten polttoaineiden, erityisesti hiilen kanssa. Sekä biomassalla että fossiiliset polttoaineet soveltuvat perusvoiman ja kaasun ja nestemäisten polttoaineiden tuotantoon. Kaikkia kolmea CCS:n talteenottoteknologioiden pääluokkaa voitaisiin siten soveltaa myös biomassaaenergiajärjestelmiin. Nykyiset talteenottoteknologiat kuluttavat suhteellisen paljon energiaa, joten bioenergian yhteydessä ne olisivat sovellettavissa vain suuren kokoluokan (yli 500 MW) sähkön- ja lämmöntuotantolaitoksissa. Koska pääosa biomassakattiloista on tyypillisesti tätä pienempiä, CCS:n potentiaali bioenergian yhteydessä rajoittuisi käytännössä mustalipeäsoodakattiloihin ja muutamiin CHP-laitoksiin.

EU:n biopolttoainedirektiivin tavoite lisätä huomattavasti biopolttoaineiden käyttöä saataisi tarjota lisää CCS:n hyödyntämismahdollisuuksia. Useat biopolttoaineiden jalostusprosessit tuottavat sivutuotteenaan CO₂-kaasua, joka voitaisiin kohtalisen helposti kuivata, puristaa kokoon ja kuljettaa varastoitavaksi. EU:n tavoite liikenteen uusiutuvan energian 10 %:n osuudesta vuoteen 2020 mennessä nostaisi EU:n vuosittaisen biopolttoaineiden käytön yli 40 Mtoe:n suuruiseksi. Olettaen sekä etanolin että synteettisen dieselin osuudeksi 10 Mtoe ja lisäksi CCS-laitos puoleen biopolttoainelaitoksista, vuosittainen CCS:n potentiaali olisi noin 10 Mt CO₂.

Biomassaa voitaisiin myös hyödyntää seospoltossa CCS:llä varustetuissa hiilikattiloissa, mikä vähentäisi laitoksen CO₂-päästöjä. Biomassan käyttö määräytyy paikallisen saatavuuden ja biomassan hinnan perusteella. On kuitenkin todennäköistä, että biomassan seospolttoa sovellettaisiin vallitsevasti CO₂-päästöjen vähentämiskeinona kattiloissa, joita ei ole varustettu CCS:llä. Bio-CCS:n mahdollisuudet näkyvät myös Energy Visions 2050 -kirjan ilmastonmuutoksen hillintään tähtäävissä skenaarioissa, joissa bioenergiaan perustuva CCS valtaa merkittävästi markkinaosuutta pitkällä aikavälillä, noin vuodesta 2050 alkaen (ks. kuva 11).

CO₂:n erotus luokittain 2 °C Markkina -skenaariossa



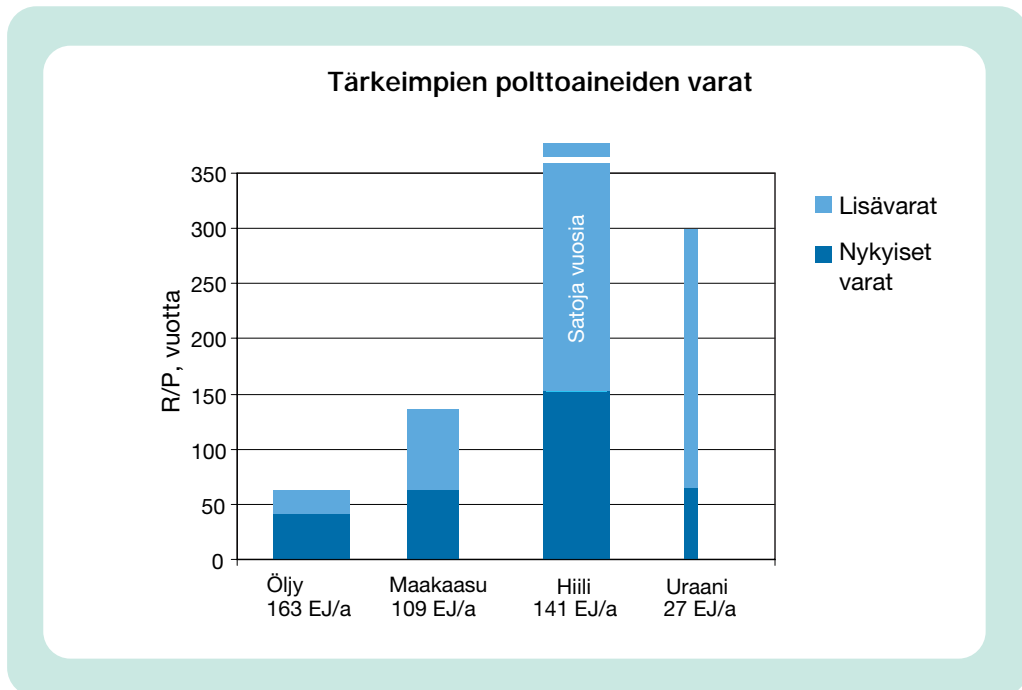
KUVA 11. Hiilidioksidin talteenotto pääluokittain ilmastonmuutoksen hillitsemiseen tähtäävässä "2 °C Markkina" -skenaariossa. Tulosten mukaan CCS biomassalaitoksiin sovellettuna vaikuttaa pitkällä aikavälillä kustannustehokkaalta päästövähennykskeinolta.

kaasta hankintajärjestelmästä, kun suuria määriä biomassaa korjataan, kuljetetaan ja varastoidaan matkalla pelloilta tai metsistä energialaitokselle. Tehokkaimmat ja taloudellisesti hyödyntämiskelpoisimmat konseptit on tyypillisesti yhdistetty prosesseihin, joissa biomassaa hyödynnetään ensin raaka-aineena ja prosessin sivutuotteet tai jätteet käytetään energiantuotannossa. Klassinen esimerkki on sellutehdas, jossa puun kuidut hyödynnetään sellantuotannossa ja loput puusta energiantuotannossa, josta osa käytetään tehtaan oman energiantarpeen tyydyttämiseen. Nykyiset integroidut energiantuotantokonseptit voivat sisältää höyryn ja sähkön tuotannon CHP-laitoksilla sekä mäntyöljyn ja pelletin valmistuksen sivutuotteista. Tulevaisuudessa nestemäisten biopolttoaineiden tuotanto tulee usein toimimaan teollisuusprosessei-

hin integroituna metsäteollisuuden, elintarviketeollisuuden tai jätteiden kierrätyksen yhteydessä tai muilla teollisuudenaloilla, joissa biomassaa hyödynnetään teollisuusprosessien raaka-aineena. Biomassan käyttö fossiilisten polttoaineiden rinnalla on mahdollinen vaihtoehto myös seospoltossa ja kaasutuksessa teollisuuden ja yhdyskuntien CHP-laitoksissa.

ENERGIAVARAT

Fossiiliset polttoainevarat ovat rajallisia ja kiihtyvästi hupenevia. Mikäli kulutus säilyisi nykytasolla seuraavilla vuosikymmenillä, helposti hyödynnettävien raakaöljy- ja maakaasuvarojen arvioidaan riittävän 40 – 70 vuotta. Helposti hyödynnettävien öljy- ja kaasuvarojen lisäksi on todennäköisiä varoja eli resursseja, joiden hyödyntäminen on kal-

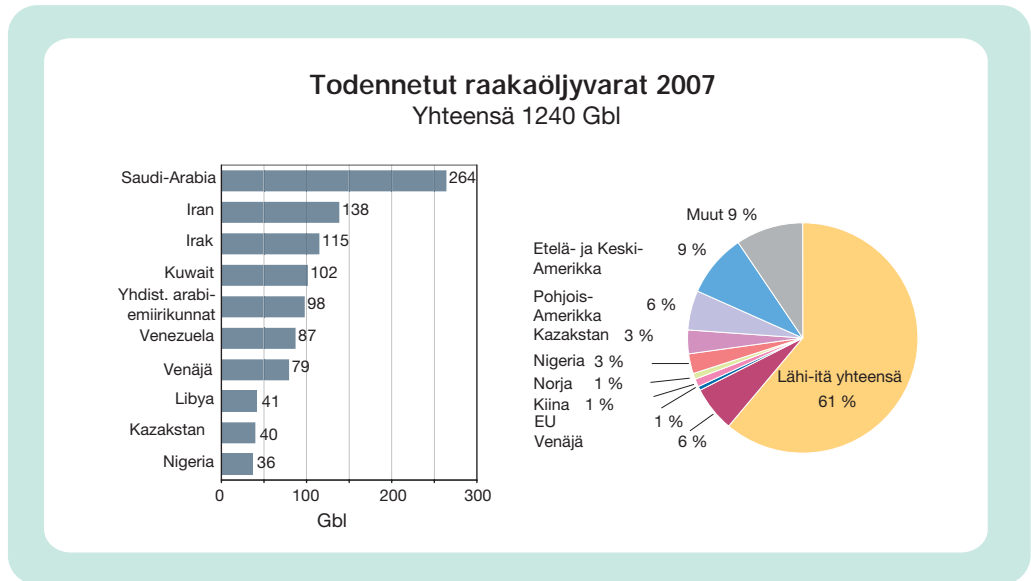


KUVA 12. Konventionaalisten (tavanomaisimpien) fossiilisten polttoaineiden ja uraanivarojen riittävyys nykyisellä kulutustasolla ja teknologiolla. Pylväiden leveys kuvaa nykyisen käytön suuruutta ja ala kunkin energiaressurssin kokoa (Kuvan tietojen lähde: BGR 2006). Useilla uusiutuvilla energiavaroilla, joita ei ole esitetty kuvassa, on teoreettinen ja tekninen potentiaali ylittää maailman energiantarve moninkertaisesti. Lisäksi edistykselliset tulevaisuuden ydinenergiateknologiat voivat mahdollisesti lisätä ydinpolttoainevarojen riittävyttä useilla kertaluokilla.

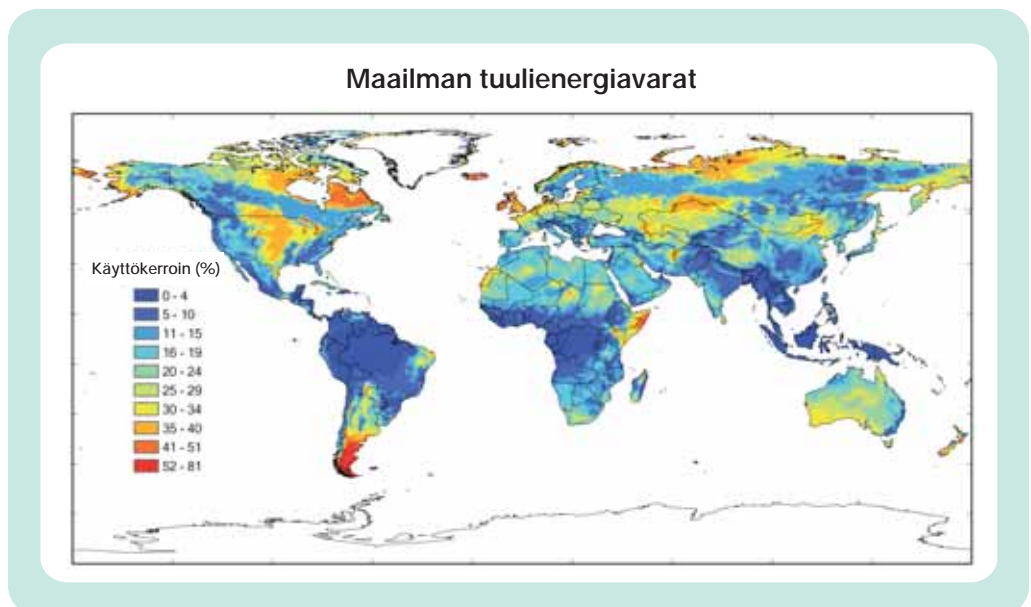
liimpaa tai vaatii mahdollisesti suuremman energiapanoksen. Helposti hyödynnettävät hiilivarat ovat lähes kaksinkertaiset, ja todennäköiset varat kestäisivät vuosisatoja nykyisellä kulutustasolla (kuva 12).

Maailman energianhankinta perustuu

valtaosin fossiilisiin polttoainevaroihin, ja niiden osuus tulee olemaan merkittävä vielä useita vuosikymmeniä. Fossiilisten polttoainevarojen energiasisältö on peräisin aurinkoenergiasta, joka on mahdollistanut suuren biomassavarojen kattumisen. Maatunut



KUVA 13. Todennetut raakaöljyvarat vuonna 2007 (1 GBl = $1,36 \cdot 10^8$ tonnia). (Kuvan tietojen lähde: BP 2008)



KUVA 14. Maailman tuulienergiavarat käyttökertoimen avulla esitettynä. Mitä suurempi käyttökerroin on, sitä edullisempi sijainti tuulivoiman kannalta. (Lu, McElroy & Kiviluoma 2009)

biomassa on muuntunut fossiiliseksi polttoaineiksi geologisissa prosesseissa. Itse asiassa suurin osa nykyisistä tärkeimmistä uusiutuvista energialähteistä (bioenergia, tuulivoima, vesivoima) on suoraan tai epäsuorasti peräisin runsaasta aurinkoenergiasta.

Maapallon pinnalle tuleva auringon säteilyteho on keskimäärin 81 000 TW. Vertaamalla tätä maailman energiankulutukseen 490 EJ/vuosi (16 TW) on selvää, että aurinkoenergialla voidaan teoreettisesti tyydyttää hyvin suuri osa ihmiskunnan energiantarpeesta. Myös geotermiset energiavarat ovat teoreettisesti hyvin suuret. Tekninen potentiaali näiden uusiutuvien varojen hyödyntämiseksi on kuitenkin huomattavasti pienempi kuin teoreettinen potentiaali.

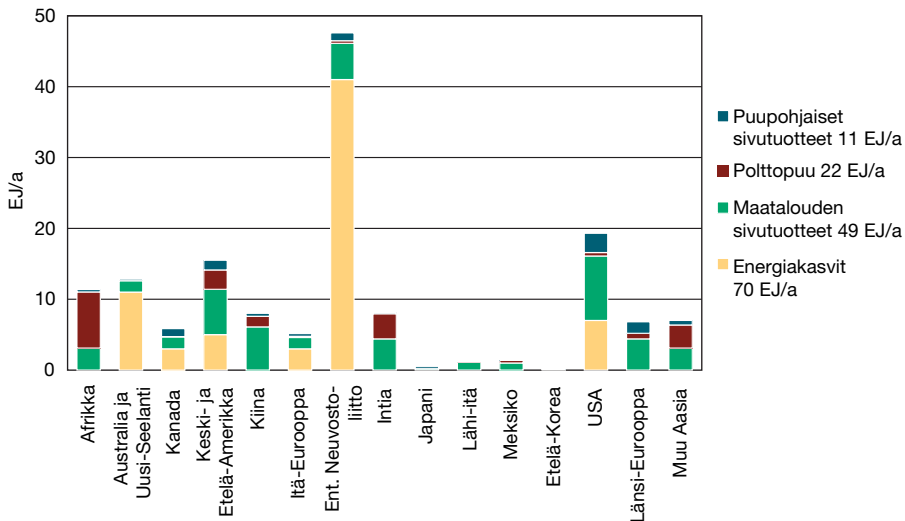
Noin 1–2 % ilmakehän energiasta muuntuu tuuleksi. Nykytekniikalla tuulivoiman tuotannon teknisen potentiaalin maailmassa arvioidaan olevan suuruusluokkaa 1 000 PWh/a (3 600 EJ/a). Luku

sisältää merituulivoiman tuotannon lähellä mantereita alueilla, joissa veden syvyys on sopiva. Pääosa potentiaalista sijaitsee kuitenkin sisämaassa.

Tuulienergiavarojen maantieteellisestä vaihtelusta maapallon eri osissa rannikoilla ja sisämaassa esitetään arvio kuvan 14 kartassa. Nykyiset maapallon laajuiset tuulienergiavarakartat ovat vain viitteellisiä, sillä tilastojen kattavuus ja laatu eivät riitä tarkkojen arvioiden tekemiseen. Tästä johtuen erityisesti arviot alueilla, joilla maaston muodot ovat monimutkaisia, sisältävät epävarmuuksia. Kuvan 14 tulokset ovat kuitenkin kohtalaisen hyvin sopusoinnussa tuuliatlaksissa esitettyjen tarkempien tuulienergiapotentiaaliarvioiden kanssa.

Biomassan nykyinen energiakäyttö on keskittynyt kehittyviin maihin. Kehittyvien maiden energiasta 33 % on peräisin biomassasta, jota käytetään polttoaineena

Biomassapohjainen energiapotentiaali alueittain maailmassa v. 2050



KUVA 15. Biomassapohjainen energiapotentiaali (EJ/a) alueittain maailmassa vuonna 2050. Arviot on johdettu VTT:n puumassaa koskevista arvioista ja MTT:n arvioista tärkeimpien energiakasvien ja maatalouden sivutuotteiden ja maatalousjätteiden energiapotentiaalista. (Koljonen et al. 2009; Pakkala et al. 2009)

Visio: Yhteyttävät mikrobit tulevaisuuden energialähteenä

Periaatteessa kaikkia yhteyttäviä eliöitä voidaan pitää auringonvaloa voimanlähteenään käyttävinä solutehtaina, jotka muuntavat hiilidioksidin biopolttoaineina hyödynnettäviksi orgaanisiksi molekyyleiksi. Yhteyttäviin mikrobeihin (photosynthetic microbes, PMs), eli mikroleviin, kuuluu sekä esitumallisia sinileviä että aiotumallisia leviä. Niiden arvioitu pinta-alaa kohti laskettu tuottavuus ylittää maakasvien tuottavuuden vähintään yhdellä kertaluokalla. Eri lajien välillä on kuitenkin suuria eroja lipidikoostumuksen suhteen, millä on merkitystä erityisesti energiahyödyntämisen kannalta. Yhteyttäviä mikrobeja arvioidaan olevan noin 100 000 lajia, joista vasta noin 40 000 on löydetty. Lisäksi vain muutamien lajien soveltuvuutta biopolttoaineiden tuottamiseen on tutkittu. Kartoitettujen lajien öljypitoisuudet ovat vaihdelleet 20 %:n ja 70 %:n kuivapainosuuden välillä, ja melko varovaiset saantoarviot ennustavat 58 700 l/ha tuottotasoja (Chisti 2007). Trooppisessa ja subtrooppisessa ilmastossa kasvavaa öljykasvia, *Jathropaa*, on pidetty lupaavana uutena vaihtoehdona biopolttoaineiden tuotantoon, sillä se kasvaa myös jättömailla eikä siten kilpaile ruuantuotannon kanssa. *Jathropan* tuottavuus (noin 1 900 l/ha vuodessa) on kuitenkin liian pieni nykyisten energialähteiden korvaamiseksi, sillä sen käyttö vaatisi jopa yli 17 % maapallon pinta-alasta. Nämä esitetyt luvut kuvaavat yhteyttävien mikrobin valtavaa potentiaalia, joka teoreettisesti mahdollistaa TW-suuruusluokan osuuden tulevaisuudessa käytettävistä polttoaineista.

Yhteyttävien mikrobin laajamittaiseen hyödyntämiseen tarvittavien viljely- ja prosessointitekniologioiden kehittäminen on vasta alkuvaiheessa. Vain neljää mikrobilajia on toistaiseksi viljelty teollisessa mittakaavassa ravintolisien ja hienokemikaalien tuottamiseksi. Suurista tutkimusohjelmista Yhdysvaltojen vesikasvionohjelma (US Aquatic Species Program, ASP) keskittyi yhteyttävien mikrobin avoimeen allasviljelyyn (1 000 m²). Tämän tutkimuksen perusteella todettiin, että yhden lajin viljelmää ei voi ylläpitää avoallassa muutamia kuukausia pidempään kontaminaatio-riskin takia. Toisaalta japanilainen tutkimuslaitos ("Research Institute of Innovative Technology for the Earth", RITE), joka keskittyi kokonaan bioreaktoreiden käyttöön ja kehittämiseen, ei saavuttanut teollisesti kannattavaa mittakaavaa (Lee 2001). Yhteyttäviä mikrobeja kasvatetaan suljetuissa ns. fotobioreaktoreissa, joissa valonsaanti taataan läpinäkyvien seinämien tai valokuitujen avulla. Näissä bioreaktoreissa yhteyttävien mikrobin kasvua voidaan säännöstellä tarkasti ravinteiden ja hiilidioksidin avulla. Kaksivaiheinen lähestymistapa, jossa sovellettaisiin fotobioreaktoreita vain yhtä mikrobia sisältävän kannan alkutuotantoon ja ulkoaltilta lopputuotantoon, saattaisi olla käytännöllinen ja yksinkertainen ratkaisu, jossa kustannukset eivät kohoa liian suuriksi. Tätä strategiaa, eli 25 000 litran fotobioreaktoria ja 50 000 litran avoallassa, on menestyksellisesti käytetty kaupallisessa mittakaavassa Havaijilla. Esimerkkitapauksessa tuotettiin karotenoideja *Haematococcus*-lajin avulla. Vaihteleva valon määrä leudoilla alueilla on valitettavasti estänyt konseptin käyttöönoton. Leudoille alueille saattaisivat kasvatustavat, joissa hiilidioksidin ohella käytettäisiin muitakin hiilen lähteitä, jolloin esim. jätevesivirtojen hyödyntäminen voisi tulla kysymykseen.

Fotobioreaktoreiden suuren mittakaavan käyttöön liittyy myös muita ongelmia teknisten ja taloudellisten selkkojen lisäksi, kuten biomassan keräys nesteestä ja jatko-prosessointi (Molina Grina et al. 2003). Biomassa täytyy kerätä talteen melko laimeista (<0,5 kg m⁻³) kasvatusalustoista välttämättä energiaa vaativia menetelmiä, esimerkiksi sentrifugointia. Mahdollisia keräysmenetelmiä ovat mm. suodatus ja ns. flokkulointi eli höydyn muodostuminen. Suodattaminen voi kuitenkin olla ongelmallista leväsolujen pienen koon (3–30 µm) vuoksi. Flokkuloinnin avulla voidaan ainakin kasata soluja yhteen ja siten helpottaa sakkauttamista tai suodattamista.

On perusteltua tarkastella koko yhteyttävien mikrobin jalostusketjua, jotta niiden biopolttoainetuotannosta saataisiin taloudellisesti kannattavaa. Ns. biojalostamokonsepti yhdistää täysin kemikaalien ja energian jalostusketjut. Esimerkiksi lipidien erottamisen jälkeen jäljelle jäävä biomassa voidaan hyödyntää monin tavoin ja käyttää metaanin, vedyn, etanolin, lipidien tai sähköntuottamiseen. Lisäksi sivutuotteina voidaan saada käyttökelpoisia ja arvokkaita kemiallisia yhdisteitä, jotka parantavat kokonaisprosessin taloudellisuutta.

Parhaiden biopolttoaineiden tuotantoon sopivien yhteyttävien mikrobilajien valinnan ohella geeniteknologian avulla voidaan todennäköisesti saavuttaa kaupallisen mittakaavan biopolttoainetuotanto. Selkeitä optimoitavia ominaisuuksia ovat yhteyttämisen tehokkuus, kasvu ja saanto. Tällä hetkellä vain muutamien levien perimä on kyetty selvittämään. Lisää tutkimusta tarvitaan sekä laajan tietopohjan saavuttamiseksi että levien geenimuuntelun mahdollistavien työkalujen kehittämiseksi. Samanaikaisesti on huolehdittava bioturvallisuudesta toiminnan ympäristöriskien minimoimiseksi.

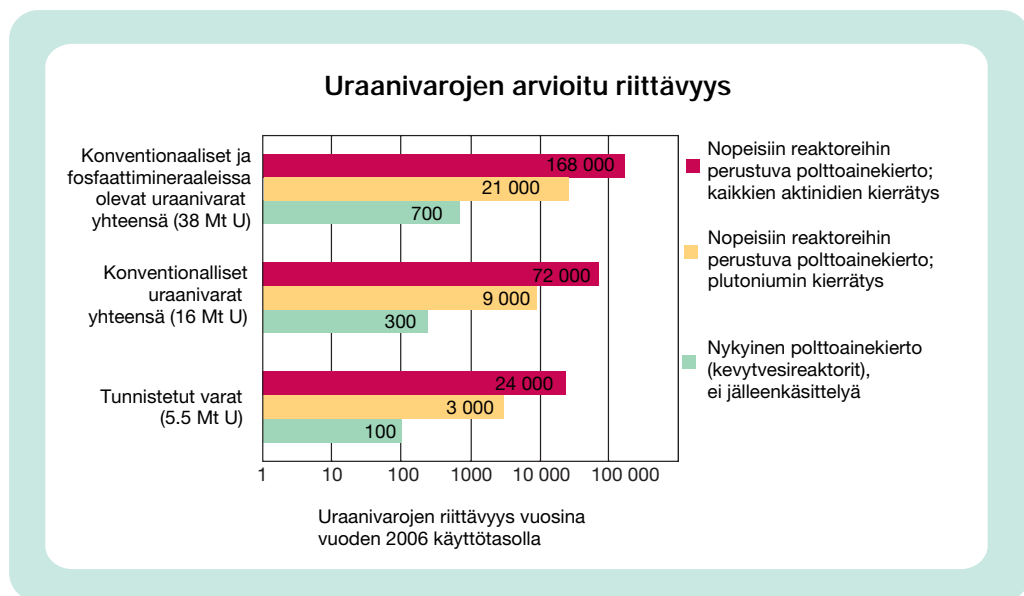
pääasiassa ruuanlaitossa ja lämmityksessä. Tulevaisuuden biomassaperäisen energian hyödyntämispotentiaalia arvioitaessa täytyy huomioida maankäyttö muihin tarkoituksiin, tärkeimpänä ruuantuotantoon. Lisäksi tulee huomioida luonnon monimuotoisuus, maaperän ja luonnon suojele sekä biomassan merkitys hiilinieluna. Nämä kysymykset ratkaisevat bioenergian lisäämisen kelpoisuuden ilmastonmuutoksen hillinnässä ja muihin energiasektorin tulevaisuuden haasteisiin vastaamisessa. VTT:n ja MTT:n tuore tutkimus arvioi bioenergian hyödyntämispotentiaalin vuonna 2050 olevan eri skenaarioissa 120–210 EJ. Alarajaa vastaavassa skenaariossa ihmiskunnan ruokavalio on liharuokavaliopainotteisempi kuin nykyään, kun taas ylärajan skenaariossa ruokavalio muuttuu kasvispainotteisemmaksi, jolloin mahdollisuudet bioenergian hyödyntämiseksi lisääntyvät. Kuvassa 15 esitetään skenaario, jossa ruokavalio on lähellä nykyistä sekaruokavaliota.

Ydinenergian eri lajeista fuusiovoima tähtää samojen ydinreaktioiden energian valjastamiseen, joihin auringon energiakin

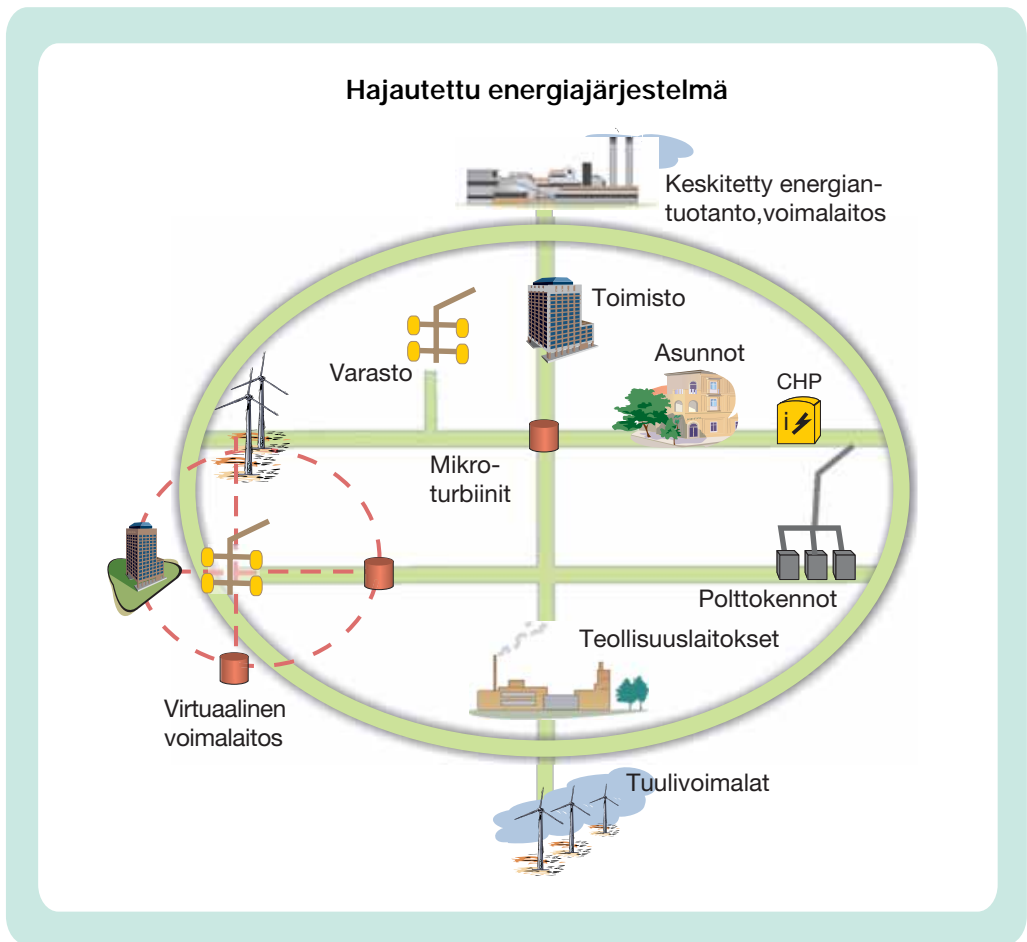
perustuu. Ydinfissiosta vapautuva energia perustuu eräiden raskaimpien alkuaineiden, kuten uraanin ja toriumin, hajoamiseen. Näillä alkuaineilla on vähäinen hyödynnettävyys muissa tarkoituksissa, ja fissio voi olla tulevaisuudessa riittoisa energianlähde, mikäli sovelletaan edistyskäsittelyä teknologisia konsepteja polttoainevarojen käytön tehokkuuden parantamiseksi. Teknologioiden vaikutus uraanivarojen riittävyyteen näkyy kuvassa 16, jossa on esitetty arvioita eri ydinfissioreaktoriteknologioilla.

ENERGIAN SIIRTO- JA JAKELUJÄRJESTELMÄT

Järjestelmä, jossa energia muunnetaan loppukäyttöön sopivaan muotoon, koostuu pääasiassa energian lähteestä, siirrosta ja/tai jakelusta, mahdollisesti varastosta, energiantuotannosta (eli konversiosta, energiasällön muunnosta muodosta toiseen) ja loppukäytöstä. Koska energian varastointi monissa muodoissa on tällä hetkellä taloudellisesti kannattamatonta tai teknisesti haastavaa, energia varastoidaan usein pri-



KUVA 16. Arvioitu uraanivarojen riittävyys eri teknologioilla vuoden 2006 käyttötasolla (2 660 TWhe/a; 29 EJ/a). (Kuvan tietojen lähteet: OECD 2008; OECD 2001; OECD 2006)



KUVA 17. Eri energialähteiden tasapaino tulevaisuudessa.

määrienergian muodossa, kuten hiilenä, öljynä tai maakaasuna, ja tuotanto sovitetaan vastaamaan hetkellistä kulutusta.

Energy Visions 2050 -kirjassa käsitelty energian siirto- ja jakelujärjestelmät kattavat nykyisen laajasti käytössä olevan sähkö- ja kaukolämpöinfrastruktuurin teknologisen kehityksen. Lisäksi pidemmällä aikavälillä vetytalous, käsittäen koko asiankuuluvan infrastruktuuriin, saattaisi tarjota monipuolisen tulevaisuuden energiantalouden vaihtoehtona energian varastoinnille ja siirtämiseksi.

Sähkövoimajärjestelmät koostuvat voimalaitosten lisäksi korkeajännitteisistä siirtoverkoista ja jakeluverkoista. Nykyään sähköverkko toimii integroidusti tietoli-

kenne- ja televalvontajärjestelmien kanssa, jotta sähkövoimajärjestelmän toiminta olisi turvallista ja luotettavaa. Tulevaisuudessa hajautetun tuotannon lisääntyminen (eli energian tuottaminen pienistä paikallisista energialähteistä), sähköntuotanto uusiutuvista energialähteistä, sähkön kysynnän hallinta (Demand Side Management, DSM) ja sähköenergian varastointi korvaavat osittain suuren kokoluokan tuotannon tavanomaisissa voimalaitoksissa. Hajautetulla tuotannolla on erityistä merkitystä kehitysmaissa, joissa sähköverkko on usein rajoittunut.

Aktiivisen jakeluverkon tarkoitus on tehokkaasti yhdistää sähkön kulutus- ja tuotantopisteet sallien sekä kuluttajille että

tuottajille mahdollisimman suuren joustavuuden niiden reaaliaikaisessa toiminnassa. Älykkäiden mittarien, modernin viestintäteknologian ja lisääntyneen kuluttajatoisuuden mahdollistama energianhallinta on keskeisessä osassa kehitettäessä tulevaisuuden palveluita, jotka parantavat verkon toimintaa ja lisäävät osapuolten mahdollisuuksia joustavaan toimintaan. Pitkällä aikavälillä edistyksellistä tasavirtateknologiaa (HVDC, FACTS) vahvojen vaihtovirtayhteyksien ohella hyödyntävä ”superverkko” jopa mantereiden välillä on ajateltavissa oleva mahdollisuus siirron toteuttamiseksi pitkilläkin välimatkoilla

Kaukolämpöä sovelletaan nykyisin Euroopassa, Pohjois-Amerikassa ja Aasiassa. EU-27-maiden kaukolämmön kulutus on noin 10 % lämmön kokonaiskulutuksesta, ja Yhdysvalloissa noin 4 % talojen lämmitysergiasta tuotetaan kaukolämmöllä. Suomi

on kaukolämmön soveltamisen edelläkävijä: noin puolet rakennuskannasta on kytketty kaukolämpöverkkoon, ja suurimmissa kaupungeissa osuus on yli 90 %. Suuri levinneisyys on mahdollistanut Suomen kansainvälisesti korkean tehokkaan lämmön ja sähkön yhteistuotannon (CHP). Jopa yli 75 % Suomen kaukolämmöstä on tuotettu yhteistuotannolla.

Tulevaisuudessa kaukolämpöjärjestelmän täytyy sopeutua matala- ja nollaenergia- tai jopa energiapositiivisten rakennusten tuomiin vaatimuksiin. EU-maissa toimivien sähkökauppajärjestelmien kaltaisen lämpökaupan toteuttaminen alueellisissa lämmitysjärjestelmissä on eräs tulevaisuuden mahdollisuus. Matalaenergiarakennusten vuoksi kaupungeissa tarvitaan korkeampia rakennuksia ja tiiviimpää asutusta. Tulevaisuuden kaukolämpöjärjestelmät voisivat toimia matalamassa lämpötilassa (60 °C) kuin nykyiset

Visio: Monienergiaverkot (multiple energy carrier system)

Sähkö-, maakaasu- ja kaukolämpö/kaukokylmäverkot toimivat nykyään lähes täysin riippumattomasti toisistaan. Niiden yhdistäminen voisi tuottaa etuja, mikäli kunkin järjestelmän hyvät puolet voitaisiin säilyttää. Sähköä voidaan siirtää pitkiä matkoja vähäisin häviöin. Kemiallista energiaa, kuten maakaasua, voidaan varastoida yksinkertaisin ja edullisin teknologioin. Kokoonpuristuvia nesteitä voidaan säilyttää verkoissa ilman erillisiä varastointilaitteistoja.

Monienergiaverkkojen idea on, että energiaa siirretään esim. sähkön, vedyn tai lämmön muodossa samoja linjoja pitkin ja muutetaan muuntimilla olomuodosta toiseen ”energiakeskuksissa” (eng. ”Energy Hub”). Energiakeskus on yksikkö, jossa eri energiankantajia voidaan muuntaa muodosta toiseen, käsitellä ja varastoida. Se on rajapinta eri energian siirtojärjestelmien ja/tai energian kulutuspiestien välillä. Energiakeskuksiin syötetään energiaa esimerkiksi sähkönä ja maakaasuna, jonka ne muuntavat halutuiksi energiapalveluiksi kuten sähköksi, lämmitys- tai jäähditysenergiaksi tai paineilmaksi. On mahdollista myös muuntaa ja käsitellä energiaa esim. CHP-teknologialla, muuntajilla, tehoelektroniikkalaitteilla, kompressoreilla, lämmönvaihtimilla ja muilla laitteistoilla.

Energian siirron energiakeskusten välillä voisi mahdollistaa yhdysjohdin, jonka avulla sähköisen, kemiallisen ja lämpöenergian siirto voitaisiin toteuttaa yhdellä maanalaisella siirtoteknologialla. Toistaiseksi lupaavimmalta ratkaisulta vaikuttaa onntto sähköjohdin, joka sisältää kaasumaisen väliaineen. Edullisia tulevaisuuden ratkaisuja voivat olla myös konseptit, jotka sisältävät nestemäisen kemiallisen energiankantajan tai muitakin energianmuotoja. Monienergiaverkkojen toteuttamiseen menee nykyhetkestä noin 30–50 vuotta.

Lähteet: Geidl et al. 2007; Favre-Perrod & Bitschi 2006

(80–120 °C). Tämä mahdollistaa uudentyyppiset CHP-laitokset, joissa sähköntuotannon osuus (rakennusaste) on suurempi, mikä puolestaan mahdollistaa paremman mukautumisen yhteiskunnan energiankulutusrakenteeseen.

Vetyä pidetään usein lupaavana vaihtoehtoisena tulevaisuuden polttoaineena ja energian kantajana, koska ainoa aiheutuva päästö on vesihöyryä. Vedyllä on suuri energiasisältö massayksikköä kohti, ja sitä voidaan varastoida. Haittapuolena on kaasumaisen vedyn pieni tiheys, jonka vuoksi varastointi ja kuljetus ovat ongelmallisia.

Vetyä voidaan tuottaa useilla teknologioilla useista primäärienergiälähteistä, joista monet ovat uusiutuvia. Vähähiilisten teknologioista ydinsähköä käyttävä elektrolyysi ja biomassan kaasutus ovat päävaihtoehtoja vedyn tuottamiseksi.

Koko infrastruktuurin käsittävä vetytalous voisi tarjota sähkön ohella monipuolisen uuden energiankantajan energian varastoimiseksi ja siirtämiseksi. Vety pitäisi kuitenkin tuottaa vähähiilisten energialähteistä, kuten uusiutuvilla lähteillä ja ydinvoimalla. Vetyä

arvellaan hyödynnettävän pääosin liikennepolttoaineena ja myös välivarastona tuotannon ja kysynnän tasapainottamiseksi.

SKENAARIOITA ENERGIA-TULEVAISUUKSISTA

Energy Visions 2050 -kirjassa on muodostettu neljä erilaista kehityspolkua energiajärjestelmän pitkän aikavälin tulevaisuudesta ja kasvihuonekaasupäästöjen kehityksestä vuoteen 2050 asti ja pidemmälläkin. Skenaariot on saatu laajoista mallilaskelmista, joissa on oletettu erilaisia maailmantalouden, väestön, informaatio- ja pääomavirtojen sekä teknologian kehityksen kehityskulkuja. Tuloksista saadaan muun muassa arvioita päästörajoitustavoitteiden kustannustehokkaasta saavuttamisesta sekä vastaavista tulevaisuuden energiajärjestelmien rakenteesta maailman, Euroopan ja Suomen tasoilla. Esitetyt pitkän aikavälin skenaariot osoittavat, että teknologian käyttöönoton ja kehittämisen sekä kansainvälisen ilmastoyhteistyön avulla kestävä energiatulevaisuus on mahdollista.

TAULUKKO 2. Energiajärjestelmäskenaarioiden perusominaisuudet.

Ominaisuus	Perusura	2°C Markkina	2°C Tehostus	Alueellinen maailma
Talouselineitys	Globalisaatio	Globalisaatio	Globalisaatio	Alueelliset kauppapolitiikat
Teknologiaiden kehitys ja kustannukset	Tavanomainen kehitys	Tavanomainen kehitys	Tehostettu kehitys	Tavanomainen kehitys
Energiatuehokkuus-investointien tuottovaatimus	Kohtuullinen	Kohtuullinen	Alhainen	Kohtuullinen
KHK-päästöjen rajoittamistavoite	Ei ole	2°C:n lämpötilan nousu	2°C:n lämpötilan nousu	Alueelliset rajoittamistavoitteet

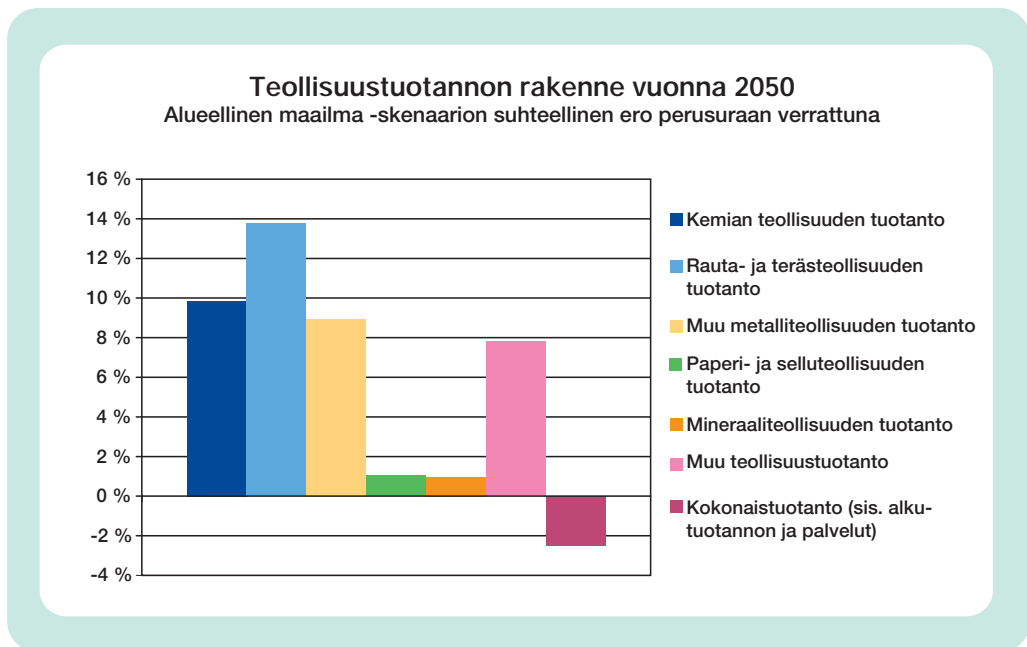
Energiajärjestelmäskenaariot on laadittu VTT:n globaalilla TIAM-mallilla (TIMES Integrated Assessment Model). Kattavien teknologiakuvausten lisäksi malli sisältää periaatteessa kaikki ihmisperäiset kasvihuonekaasupäästöjen lähteet sekä yksinkertaistetun ilmastomallin. VATT laati Global Trade Analysis (GTAP) -projektin tietokannoilla ja malleilla simulointilaskelmia maailmantalouden pitkän aikavälin kehityksestä. Tuloksia talouden eri sektorien tuotantovoimien kehityksistä maailmantaloudessa ja alueellisesti käytettiin TIAM-mallin lähtötietoina energiajärjestelmäskenaarioiden tuottamiseksi.

Energy Visions 2050 -kirjassa esitetyt maailman ja Euroopan kehityksiä kuvaavat energiajärjestelmäskenaariot ovat nimeltään Perusura, 2 °C Markkina, 2 °C Tehostus ja Alueellinen maailma. Perusura-skenaario kuvaa kehityksen jatkumista nykyisen kaltaisena. Siinä voimassa olevat politiikat vastaavat tilannetta ennen vuotta

2005, jolloin Kioton sopimus tuli voimaan. Perusura-skenaariossa ei oleteta kansainvälisiä ilmastosopimuksia.

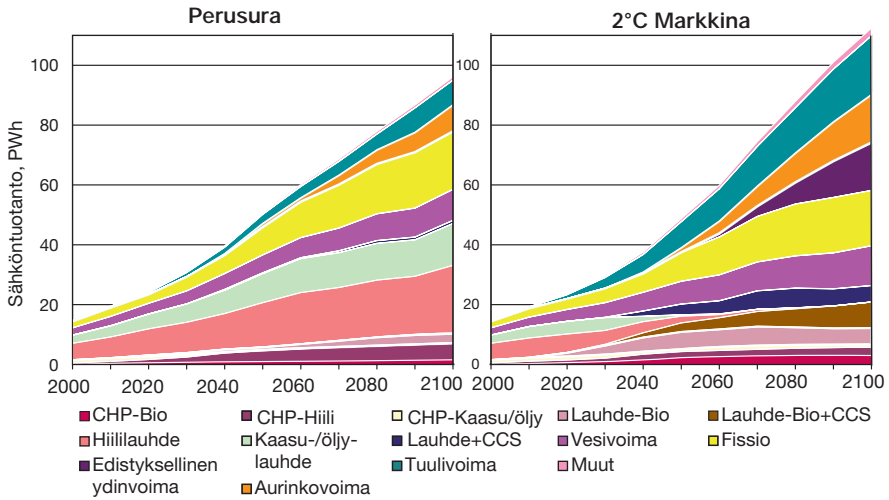
2 °C Markkina- ja 2 °C Tehostus -skenaarioissa malli ratkaisee toteutettavat päästönvähennystoimet siten, että maapallon keskilämpötilan nousu rajoittuu mallin mukaan 2 asteeseen vuoteen 2100 mennessä. Näissä skenaarioissa oletetaan maailmanlaajuiset kasvihuonekaasupäästöjen markkinat, mikä vastaa jatkuvaa globalisoitumiskehitystä. Mallituloksista saadaan siis arvio globaalisti kustannusoptimaalisesta tavasta säästää kahden asteen tavoite. 2 °C Tehostus-skenaariossa on lisäksi oletettu tehostettu energiateknologian kehitys sekä lisääntynyt kuluttajien tietoisuus kestävämmistä valinnoista. Nämä ominaisuudet heijastuvat skenaariossa nopeampana uusien teknologioiden kehittymisenä ja investointikustannusten laskemisena.

Alueellinen maailma -skenaario kuvaa kehityssuuntausta protektionistisempia mark-



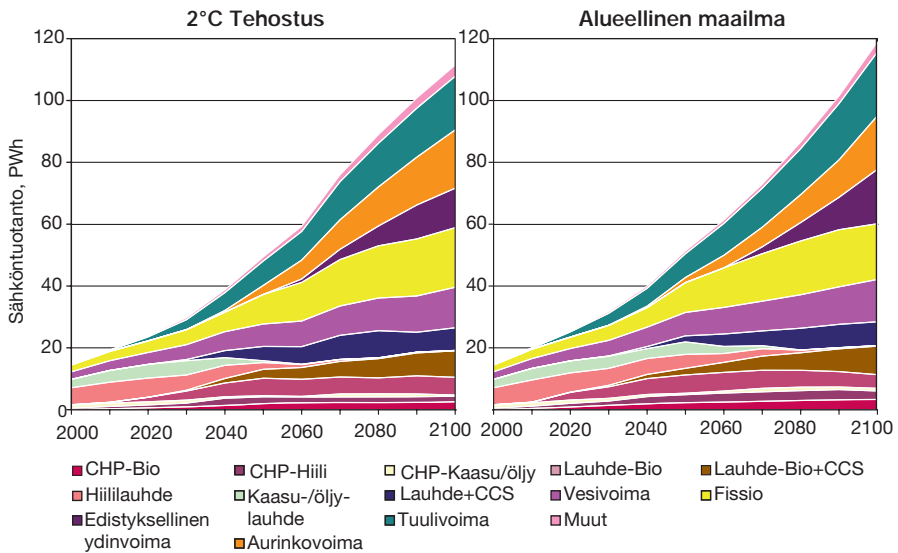
KUVA 18. Esimerkki maailmantalouden skenaarioiden tuloksista: tehdasteollisuusalojen tuotantomäärät vuonna 2050, Alueellinen maailma -talousskenaarioiden suhteellinen ero perusuraan verrattuna. Alueellinen maailma -talousskenaariossa teollisuustuotannon rakenne on painottuneempi energiain- tensiivisten teollisuusalojen, kuten kemian-, metalli- ja terästeollisuuden suuntaan.

Maailman sähköntuotanto pääluokittain skenaarioissa



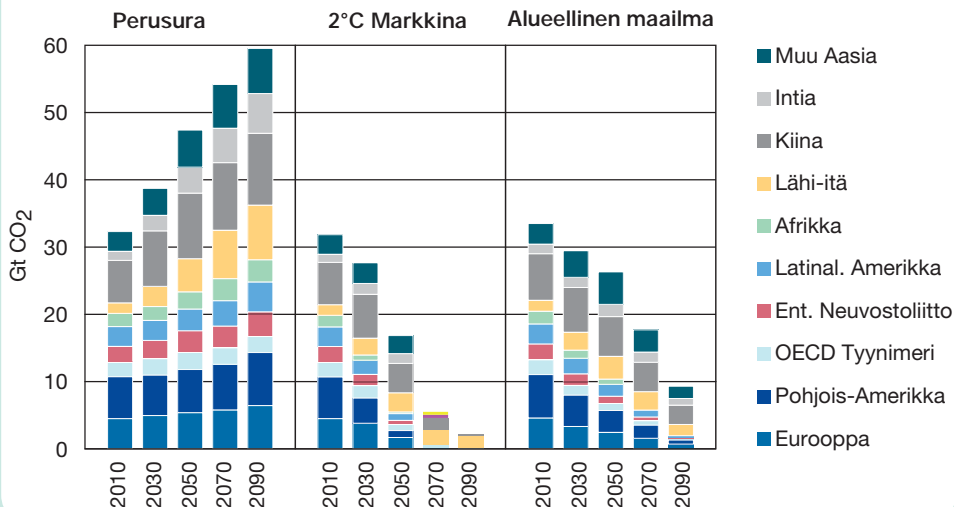
KUVA 19. Maailman sähköntuotanto pääluokittain Perusura- ja 2 °C Markkina -hillintäskenaariossa, jossa energianhankinnan rakenne optimoidaan 2 °C:n tavoitteen saavuttamiseksi. Kuvia vertailemalla näkyy selvä ero ilmastonmuutoksen hillinnän vaikutuksesta sähköntuotannon rakenteeseen. Laaja joukko eri teknologiavaihtoehtoja tarvitaan ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi.

Maailman sähköntuotanto pääluokittain skenaarioissa



KUVA 20. Maailman sähköntuotanto pääluokittain 2 °C Tehostus- ja Alueellinen maailma -skenaariossa. Tehostettu tutkimus, kehitys ja demonstroitinto kiihdyttävät teknologioiden pääsyä markkinoille, mutta avainteknologiat ovat samoja. Skenaariotulosten mukaan alueelliset politiikat lisäävät energiankulutusta.

Alueellinen CO₂-päästökehitys skenaarioissa



KUVA 21. Alueellisten CO₂-päästöjen kehitys kolmessa skenaariossa. Alueellinen maailma -skenaariossa saavutettavat päästövähennykset ovat pienempiä kuin 2 °C Markkina -skenaariossa. Tulosten mukaan tämä aiheuttaa suuremman maapallon lämpenemisen. Tulosten mukaan OECD-maiden päästöjen tulisi lähes nollaantua vuoteen 2070 mennessä, mikäli kahden asteen tavoite halutaan saavuttaa.

kinoita kohti. Tässä skenaariossa on oletettu alueelliset, globalisaatioketäytystä estävät politiikat ja suljetummat markkinat. Skenaarioiden lähtökohdat on esitetty taulukossa 2.

VATT rakensi energiajärjestelmäskenaariota varten kaksi erilaista talousskenaariota: Perusura, jossa globalisaatioketäytys jatkuu nykyisen kaltaisena, ja Alueellinen maailma, jossa protektionistiset ja nationalistiset piirteet kauppapolitiikoissa voimistuvat.

Maailmantalouden skenaariotulosten keskeinen ero oli alueellisten talouksien rakenteessa. Alueellinen maailma -talousskenaariossa maailmantalous on vuonna 2050 vain 2–3 % pienempi kuin Perusurassa. Talouden rakenne sektoreiden välillä on kuitenkin erilainen. Tulosten mukaan muutos kohti modernia taloutta on hitaampaa, kun protektionistiset ja nationalistiset piirteet voimistuvat. Tämä näkyy nopeimman talouskasvun alueilla, joissa perinteisen teollisuustuotannon kasvu on ollut nopeampaa kuin esimerkiksi

palvelualueiden. Kuva 18 havainnollistaa talouden rakenteen eroja talousskenaarioiden välillä. Alueellinen maailma -talousskenaariossa teollisuustuotannon rakenne on painottuneempi energiaintensiivisten teollisuusalojen, kuten kemian-, metalli- ja terästeollisuuden suuntaan.

Kesällä 2009 Energy Visions 2050 -kirjan julkaisemisen aikaan maailmantalous on ajautumassa taantumaan. Tässä taloustilanteessa on enenevässä määrin keskusteltu politiikan mahdollisesta muuttumisesta Alueellinen maailma -skenaariota muistuttavaan suuntaan, jossa alueet pyrkivät suojaamaan markkinoitaan esim. tuontitullien avulla.

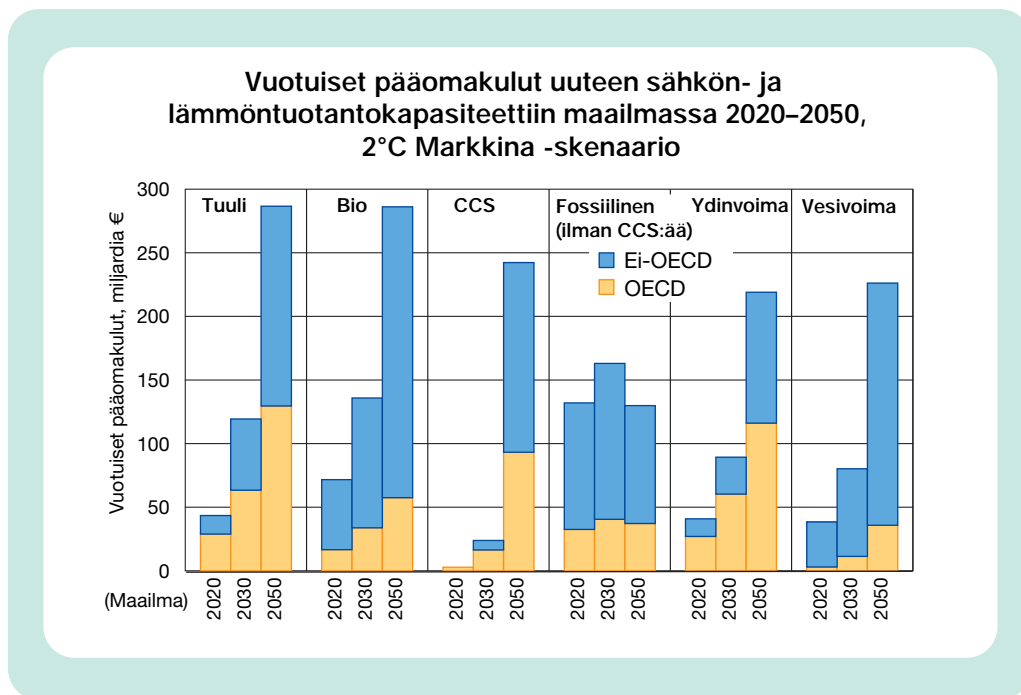
Energiajärjestelmäskenaarioiden tulosten mukaan maailmantalouden loppuenergian käytön intensiteetin tulisi laskea yli 2 % vuodessa maapallon keskilämpötilan nousun rajoittamiseksi alle kahteen asteeseen tällä vuosisadalla. Tällainen kehitys edellyttäisi huomattavaa nopeutumista vuosien 1990 ja

2005 välillä toteutuneeseen 1,1 %:n keskimääräiseen vuosimuutokseen verrattuna. Merkittävempien teknologiamuutosten täytyisi kuitenkin tapahtua energiantuotannossa (kuvat 19 ja 20). Vuoteen 2050 asti tuulivoima, ydinvoima, biomassapohjainen sähköntuotanto ja hiilidioksidin talteenotto- ja varastointiteknologialla varustetut voimalaitokset ovat kaikki erittäin tärkeässä roolissa kestävämmän energiajärjestelmän saavuttamiseksi. Aurinkoenergiajärjestelmillä on suuria mahdollisuuksia, mutta niiden kustannusten täytyisi laskea melko jyrkästi, jotta aurinkovoimalla voisi olla merkittävä osuus maailman sähköntuotannosta ennen vuotta 2050.

Kestävämpi energiajärjestelmä vaatii erittäin suuret investoinnit uuteen energiateknologiaan vuoteen 2050 mennessä. Laskelmien mukaan pelkästään sähköntuotannossa vuotuiset pääomakulut uusiin laitoksiin olisivat maailmassa noin 1 400 miljardia euroa vuonna 2050. Tehokkaampiin loppukäyttötieteologioihin tarvittavat

investointikustannukset ovat suuret myös kaikilla loppukäyttösektoreilla. Vaikka investointien rahoitus on haastavaa, vaadittava kehitys luo myös valtavat markkinat teknologian kehittäjille ja valmistajille.

Kuvassa 22 on esitetty joidenkin sähkön- ja lämmöntuotantoteknologioiden vuosittainen investointitarve 2 °C Markkina -skenaariossa. Perusura-skenaariossa fossiilisten polttoaineiden, erityisesti hiilen, käyttö kasvaa nopeasti, kun taas 2 °C -politiikkaskenaarioissa uusiutuvat energialähteet ja ydinvoima hallitsevat. Vuosittaiset investoinnit tuuli- ja biomassapohjaiseen sähköntuotantoon maailmassa vuonna 2050 ovat näissä skenaarioissa lähes 300 miljardia euroa vuodessa. CCS:llä varustetun sähköntuotannon vuosi-investoinnit vuonna 2050 ovat vastaavasti noin 250 miljardia euroa vuodessa. Myös ydinvoima- ja vesivoimainvestoinnit kasvavat voimakkaasti vuosien 2020 ja 2050 välillä. On kuitenkin muistettava, että ydinvoima- ja suuren kokoluokan vesivoimain-



KUVA 22. Vuotuiset pääomakulut uuteen sähkön- ja lämmöntuotantokapasiteettiin maailmassa vuosina 2020–2050 2 °C Markkina -skenaariossa.

vestoinnit ovat yleensä kansallisten poliittisten päätösten säätelemiä, mikä saattaa osin estää näiden investointien toteutumista tulevaisuudessa.

Suomen energiajärjestelmää koskevat skenaarit (Lehtilä et al. 2008) viittaavat siihen, että avainteknologiat ilmastomuutoksen hillinnässä Suomessa kuuluvat samoihin ryhmiin kuin edellä esitetyissä maailmanlaajuisissakin skenaarioissa. Sekä ydin- että tuulivoimalla on tulosten mukaan suuri taloudellisesti hyödyntämiskelpoinen potentiaali tiukkojen ilmastomuutoksen hillintäpolitiikkojen valitessa. Lisäksi biomassan energiankäyttöä voidaan Suomessa lisätä huomattavasti. Metsäteollisuuden sivutuotteiden laajemmän hyödyntämisen lisäksi tämä käsittää myös metsänkasvusta suoraan energiaksi korjattavan biomassan ja maatalousperäiset biomassat. Täysin hiilidioksidineutraaliin sähköjärjestelmään siirtyminen vuoteen 2050 mennessä vaikuttaa silti hyvin haastavalta tavoitteelta. Lisäksi erityisesti liikennesektorilla teknologian kehittämisen haasteet ovat globaaleja, ja kansallisten toimenpiteiden vaikutusmahdollisuuksia voidaan pitää melko rajallisina.

Johtopäätökset

Teknologisia ratkaisuja energiankäytön kokonaistehokkuuden parantamiseksi sekä energian tuotannosta ja käytöstä aiheutuvien päästöjen vähentämiseksi on olemassa laaja joukko. Monet päästöttömiin energianlähteisiin perustuvista tai edistyksellisistä vähäpäästöisistä energiantuotantoteknologioista ovat tällä hetkellä aktiivisessa kehitysvaiheessa. Useat teknologioista eivät ole vielä kaupallisia tai ovat vielä markkinoille astumisen alkuvaiheessa. Energy Visions 2050 -kirjassa ja tässä tiivistelmässä on esitetty lukuisia esimerkkejä tällaisista tulevaisuuden energiantuotantoteknologioista. Pitkällä aikavälillä myös useissa loppukäyttökohteissa voidaan saavuttaa erittäin huomattavia parannuksia lukuisten tekno-

logioiden avulla. Energiajärjestelmien luontaisesti hitaan uusiutumisen takia suuret parannukset lyhyellä aikavälillä nopeiden teknologiasiirtymien ansiosta voivat yleisesti ottaen olla melko kalliita. Kuitenkin ajan myötä teknisesti mahdollisten ratkaisujen voidaan olettaa tulevan yhä kilpailukykyisemmiksi ja enenevästi käyttöön.

Vaikka ilmastomuutoksen hillintä vaatii tulosten mukaan suuria muutoksia jo seuraavien 40 vuoden aikana, teknologian kehittyminen saattaa ajan myötä avata yhä kestävämpiä energiaratkaisuja. Eri aurinkoenergiateknologiat tulevat asteittain yhä kilpailukykyisemmiksi, ja niillä voi hyvinkin olla merkittävä rooli maailman energiajärjestelmässä vuoteen 2100 mennessä. Lisäksi edistykselliset ydinvoimalaitosteknologiat, sisältäen fuusion, saattavat olla avainroolissa hiilipäästöttömässä vedyntuotannossa ja siten myötävaikuttaa lopulliseen fossiilisten polttoaineista luopumiseen.

Ilmastomuutoksen hillintään, energian saatavuuteen ja energiaturvallisuuteen liittyvät haasteet vaativat tulevaisuudessa valtavia investointeja energian käyttöön ja tuotantoon. Uusille ja tehokkaille teknologioille avautuvat hyvin laajat markkinat, ja innovaatioille tulee olemaan suuri tarve. Tämä voi luoda uuden liiketoimintapohjan ja avata uusia mahdollisuuksia teknologian kehittäjille, suunnittelijoille ja palveluntarjoajille sekä luoda kokonaisia uusia teollisuuden lajeja.

Kymmeniä vuosia eteenpäin tehtävien taskelujen epävarmuus on luonnollisesti suuri. Uudet teknologian läpimurrot esimerkiksi tieto- ja viestintäteknologiassa, nanoteknologiassa, bioteknologiassa tai materiaalitieteissä saattavat mahdollistaa tämän päivän käsityskyvyn ulkopuolella olevia ratkaisuja tulevina vuosikymmeninä. Innovaatioita, teknologian ja talouden kehitystä on hyvin haastavaa ennakoita pitkällä aikavälillä, joten toteutuva kehitys voi muodostua aivan erilaiseksi kuin mitä teoksen tekijät ja laskennalliset mallit ovat pystyneet ennakoimaan.

VIITTEET

- BP 2008. *BP Statistical Review of World Energy*. British Petroleum, June 2008. <http://www.bp.com/productlanding.do?categoryId=6929&contentId=7044622>
- BGR 2006. *Reserves, Resources and Availability of Energy Resources 2006. Annual Report*. Bundesanstalt für Geowissenschaft und Rohstoffe.
- Chisti, Y. 2007. *Biodiesel from microalgae*. *Biotechnol Adv* 25, 294-306.
- Ekholm, T., Soimakallio, S., Höhne, N., Moltmann, S., Syri, S. 2008. *Assessing the effort sharing for greenhouse gas emission reductions in ambitious global climate scenarios*. *VTT Research Notes* 2453. 75 p. + app. 3 p.
- Favre-Perrod, P., Bitschi, A. 2006. *A concept for dual gaseous and electric energy transmission*. *Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE*. 18–22 June 2006. P. 7 pp.
- Geidl, M., Koepfel, G., Favre-Perrod, P., Klockl, B., Andersson, G., Frohlich, K. 2007. *Energy hubs for the future*. *Power and Energy Magazine, IEEE*. Volume 5, Issue 1, Jan.-Feb. 2007, P. 24–30.
- IEA 2008. *World Energy Outlook 2008*. OECD/IEA: Paris, France.
- IPCC 2007. *Climate Change 2007. Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)] Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 851 pp.
- IPCC 2005. *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Metz, B., Davidson, O. de Coninck, H.C., Loos, M., Meyer, L.A. (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge.
- Koljonen, T., Ruska, M., Pahkala, K., Flyktman, M., Kiviluoma, J., Forsström, J. 2009. *Polttoaineresurssit ja -markkinat*. Julkaistaan VTT Tiedotteita -sarjassa.
- Lee, Y.K. 2001. *Microalgal mass culture systems and methods: Their limitation and potential*. *J Appl Phycol* 13, 307-315.
- Lehtilä, A., Syri, S., Savolainen, I. 2008. *Teknologiapolut 2050. Skenaariotarkastelu kasvihuonekaasupäästöjen syvien rajoittamistavoitteiden saavuttamiseksi Suomessa*. *VTT Research Notes* 2433. 65 p.
- Lu, X., McElroy, M.B., Kiviluoma, J. 2009. *Electricity from Wind: Global Perspective with Detailed Application to the US*. In press.
- Molina Grima, E., Belarbi, E.-H., Ación Fernández, F.G., Robles Medina, A., Chisti, Y. 2003. *Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics*. *Biotechnol Adv* 20, 491-515.
- OECD 2006. *Advanced nuclear fuel cycles and radioactive waste management*. OECD, Paris.
- OECD 2001. *Trend in the nuclear fuel cycle, economic, environmental and social aspects*. OECD, Paris.
- OECD 2008. *Uranium 2007: Resources, Production and Demand. Joint Report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency*. OECD, Paris.
- Pahkala, K., Hakala, K., Kontturi, M., Niemeläinen, O. 2009. *Peltobiomassat globaalina energianlähteenä*. *Maa- ja elintarviketalous numero* 137. 53 p.
- Røj, A. 2005. *Presentation at European Commission's Conference on Renewable Energy for Europe - Research in Action, 21-22 November 2005*.
- Turkenburg, W.C. 2007. *Suggestions for an energy research agenda*. Copernicus Institute –Utrecht University. Presentation, EC, Brussels, 24 May 2007.

Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi vaaditaan radikaaleja kasvihuonekaasupäästöjen vähennyksiä. Energian tuotanto ja käyttö on merkittävin kasvihuonekaasupäästöjen lähde, joten tavoite edellyttää vallankumouksellisia muutoksia nykyiseen, fossiilisiin energialähteisiin perustuvaan maailman energijärjestelmään. Maailman energiantarpeen arvioidaan jatkavan tulevana vuosikymmeninä kasvuaan erityisesti kehittyvissä talouksissa. Lisääntyvä energiantarve sekä maantieteellisesti keskittyneiden fossiilisten energiavarojen hupeneminen korostaa energiaturvallisuuden merkitystä tulevassa kehityksessä.

Energy Visions 2050 -kirjassa on pohdittu keinoja energiasektorin tulevaisuudessa kohtaamien haasteiden voittamiseksi. Aihepiiriä lähestytään globaalista näkökulmasta, mutta joissain teknologisissa yksityiskohdissa korostetaan suomalaista teknologiaa ja Suomen teknologisia saavutuksia. Tähän tiivistelmään on koottu keskeisimmät kirjassa esitetyt asiat. Tarkastelut keskittyvät teknologisiin ja teknis-taloudellisiin näkökulmiin. Teknologian kehityksen tarkastelu käsittää koko energiaketjun, mikä korostaa energiatehokkuuden välttämättömyyttä yhteiskuntien kaikissa toiminnoissa. Sisältö kattaa vähäpäästöisten ja uusiutuvien energiantuotantoteknologioiden lisäksi uudet teknologiset ratkaisut teollisuus-, rakennus- ja liikennesektoreilla sekä energian siirto- ja jakelujärjestelmissä. Siirtyminen kohti nollapäästöistä energijärjestelmää vaikuttaa hyödynnettävien energialähteiden jakaumaan, joten tarkasteluun on sisällytetty katsaus maailman energiavaroihin.

Esitetyt skenaariot kuvaavat vuoteen 2050 ulottuvia vaihtoehtoisia kehityspolkuja. Skenaarioissa on oletettu erilaisia arvioita teknologian, talouskasvun, globalisaation ja ympäristötietoisuuden leviämisen sekä hyödyntämisen tulevaisuuden kehityksistä. Tuloksista voidaan nähdä mielenkiintoisia eroja skenaarioiden välillä energian käytössä ja tuotantotavoissa, kasvihuonekaasupäästöjen vähenemisessä ja ilmaston lämpenemisessä.