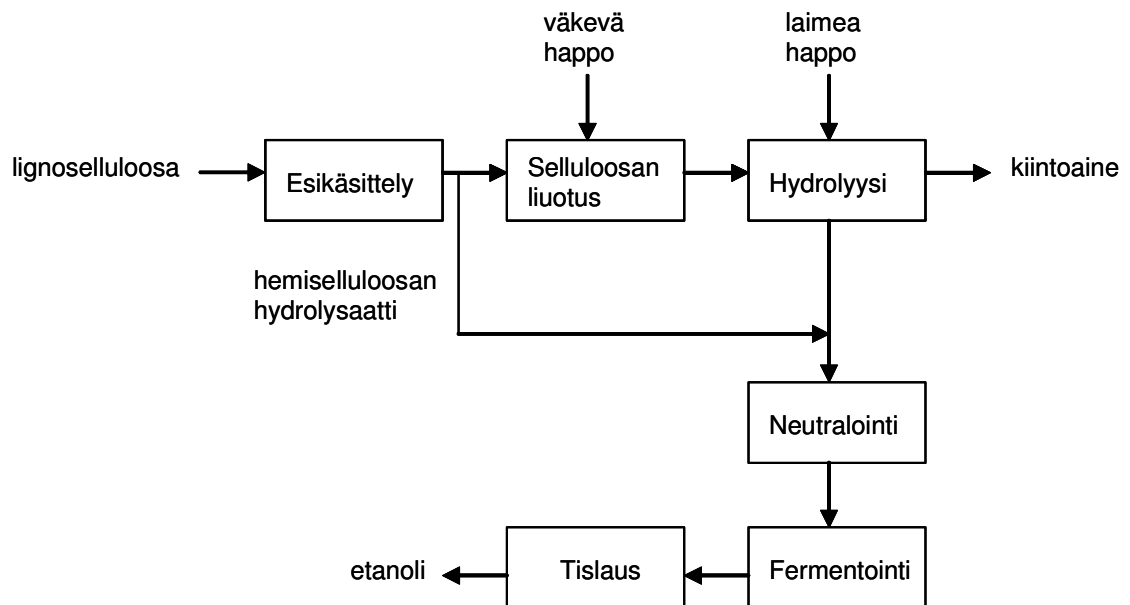


KIMMO KLEMOLA

ENERGIATEHOKKUUS



Teknillisen kemian laboratorio

Kemiantekniikan osasto

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

2009 (rev. 03.09.2009)

ALKUSANAT

Tämä tutkielma käsittelee energiatehokkuutta yksilötasolta globaaliin energiankulutukseen, pienistä loppukäyttäjän laitteista ja valinnoista suuriin yrityksiin ja valtioihin. Erityinen painotus on energiatehokkuuden suurella merkityksellä prosessi- ja kemianteollisuudessa.

Tutkielmassa on kiinnitetty huomiota energiatehokkuuden ja ympäristöystävällisyyden yhteyteen, joka ei ole niinkään yksinkertaista. Ympäristöystävällinen teknologia saattaa merkitä energiatehokkuuden pienenemistä ja luonnonvarojen kulutuksen kasvamista. Energiatehokas saattaa olla ympäristöystävällistä, mutta samat raaka-ainevarat ja resurssit ovat ehkä vielä tehokkaammin ja ympäristöystävällisemmin käytettävissä jossain muualla. Resurssien optimaalinen kohdentaminen on tärkeä osa energiatehokkuutta.

SISÄLLYS

Johdanto.....	2
Energiatehokkuus ja talous.....	5
Energiatehokkuus, hiilidioksidipäästöt ja resurssien järkevä kohdentaminen.....	7
Energiatehokkuus yhteiskunnassa ja yksilötasolla.....	10
Energiatehokkuus tuotanto- ja prosessiteollisuudessa.....	12
LUT:n teknillisen kemian laboratorion energiatehokkuustutkimus	17

Johdanto

Vuonna 2005 maailman primäärienergiankulutus oli 447 EJ (Jochem¹ 2006). Suomen osuus tästä oli 0,25 %. Noin 80 % maailman primäärienergiasta tulee fossiilista raaka-aineista: raakaöljystä, kivihiilestä ja maakaasusta. Kuluttajille käyttökelpoista energiaa, kuten sähköä ja liikennepolttoaineita, saatiin noin 300 EJ. Primäärienergiasta kului siis 147 EJ eli kolmannes käyttökelpoisen energian jalostamiseen. Hyötysuhde primäärienergiasta käyttökelpoiseksi energiaksi jalostettaessa oli noin 67 %. Kivihiilen energiasta saadaan muutettua sähköksi tyypillisesti noin 33 %. Raakaöljyn sisältämästä energiasta päätyy bensiiniin ja dieseliin jopa 80–90 %.

Käyttökelpoisesta energiasta, 300 EJ sähköä ja polttoainetta, päätyy hyötyenergiaksi 146 EJ. Primäärienergiasta päätyy siis yli 300 EJ hukkalämpönä ympäristöön ja maailman primäärienergian käytön hyötysuhde on vain 33 %.

Primäärienergiasta hyödyksi saatu kolmannes käytetään kaiken lisäksi tuhlailevasti ja tehottomasti. David Rose² (1974):

”Tähän mennessä olemme käyttäneet yhä enemmän energiaa muuttaessamme luonnonvarojamme turhuuksiin, joista saamme vain väliaikaista nautintoa.”

Energiankulutuksen, elintason, elämänlaadun ja onnellisuuden välistä riippuvuutta on tutkittu. Smilin³ (2002) mukaan 80 GJ:n vuotuinen energiankulutus henkeä kohti on määrä, jonka jälkeen elämänlaatu ja onnellisuus eivät enää parane – siitä yli menevä energiankulutus on ”tuhlailevaa”. Pohjois-Amerikassa vuotuinen energiankulutus henkeä kohti on 350 GJ.

¹ Jochem Eberhard K., An efficient solution, Scientific American, Vol. 295, No. 3, September, 2006.

² Rose David J., Nuclear electric power, Science, 184, 351–359, 1974.

³ Smil Vaclav, The Earth's Biosphere: Evolution, Dynamics and Change, MIT Press, Cambridge, MA, 2002.

Paradoksaalista on, että parantunut energiankäytön hyötysuhde ei ole johtanut energiankäytön laskuun. Jo vuonna 1865 W. Stanley Jevons⁴ varoitti tästä paradoksista:

”On väärin kuvitella, että polttoaineiden taloudellinen käyttö johtaa vähentyvään kulutukseen. Päinvastoin, kokemus osoittaa, että kulutus vain kasvaa.”

Esimerkkejä on useita. Huolimatta moottoritekniikan kehityksestä ja moottorien hyötysuhteen paranemisesta Yhdysvalloissa keskimääräisen auton polttoaineen kulutus kasvoi yhtäjaksoisesti 20 vuotta vuodesta 1987, koska autot olivat yhä suurempia ja tehokkaampia. Autojen määrä myös kasvoi jatkuvasti ja autoilla ajettiin keskimääräisesti yhä enemmän.

Talojen lämmityksen yhä paremman energiatehokkuuden ja paremman eristyksen vastapainona talojen koko on kasvanut jatkuvasti. Yhdysvalloissa on noin 50 vuodessa asuntojen pinta-ala asukasta kohti kasvanut 25 neliömetristä 72 neliömetriin. Ympäri maailman yhä suurempi osa rakennustilasta on lisäksi ilmastoitua. Talot ovat myös täynnä uudenlaista (useimmiten turhaa) elektroniikkaa. Pelkästään maailman televisiolaitteiden valmiustilassa pitäminen vaatii kuuden ydinvoimalan sähköntuotannon verran energiaa.

Valaistus on ehkä paras esimerkki siitä, että parantunut energiatehokkuus ei välttämättä johda energiankulutuksen pienenemiseen. Isossa-Britanniassa valaistusenergian hyötysuhde oli vuonna 2000 noin 1000 kertaa parempi kuin vuonna 1800. Silti vuonna 2000 Isossa-Britanniassa valaistukseen kului 25 000 kertaa enemmän energiaa kuin vuonna 1800. Henkeä kohti laskettuna valaistukseen kului 6500 kertaa enemmän energiaa. (Smil⁵ 2008)

⁴ Jevons W. Stanley, *The coal question: an inquiry concerning the progress of the nation, and the probable exhaustion of our coal mines*, London, Macmillan, 1865.

⁵ Smil Vaclav, *Energy in Nature and Society: General Energetics of Complex Systems*, MIT Press, Cambridge, MA, 2008.

Ympäristön kannalta energiatehokkuuden tai hyötysuhteen paraneminen ei siis välttämättä ole pelastus. Ympäristö hyöttyy pienemmistä hiilidioksidipäästöistä, ei pienemmistä hiilidioksidipäästöistä kilometriä kohti.

Entistä parempi energiatehokkuus on kuitenkin tavoittelemisen arvoista. Tehokkaamman energiankäytön myötä rajalliset fossiiliset energianlähteet riittäisivät pitkempään ja ympäristö hyötyisi.

Yhdysvalloissa kotitalouksien valaistus vastaa 6 % (Johnson⁶ 2007) sähkön kokonaiskulutuksesta. Mikäli Yhdysvaltojen kotitalouksissa vaihdettaisiin kaikki hehkulamput energiansäästölamppuihin, vähenisi kotitalouksien valaistuksen sähkönkulutus kolmannekseen. Säästöä tulisi 20 ydinvoimalan verran.

Energiankäytössä tulee ymmärtää ja ottaa huomioon koko elinkaaren energiahäviöt. Maailmanlaajuisesti sähköstä tuotetaan kivihiilellä noin 40 % ja fossiililla polttoaineilla (kivihiili, maakaasu ja öljy) yhteensä noin kaksi kolmasosaa. Tämän sähköntuotannon hyötysuhde on vain hieman yli 30 %. Kun voimalaitosten oma sähkönkäyttö (mm. savukaasujen hiukkasia poistavat sähkösuodattimet) ja sähkön siirtohäviöt otetaan huomioon, vain 25 % polttoaineen energiasta päätyy sähkön loppukäyttäjälle. Lukema pienenee vielä muutamalla prosenttiyksiköllä, jos polttoaineen tuotanto maaperästä voimalaitokselle otetaan huomioon. Sähkön loppukäyttö voi olla tehokasta tai tehotonta. Parhaimpien sähkömoottoreiden hyötysuhde on yli 90 %.

Smil⁷ (2003) antaa esimerkin sähköntuotannon ja -käytön tehokkuuden merkityksestä vertaamalla kahta tapausta. Ensimmäisessä tapauksessa sähköä tuotetaan tyypillisellä 35 %:n hyötysuhteella, sähkönsiirron hyötysuhde on 90 % ja loppukäyttö tapahtuu 70 %:n hyötysuhteella toimivassa sähkömoottorissa. Vain 22 % polttoaineen energiasta päätyy hyötyenergiaksi. Toisessa tapauksessa sähköä tuo-

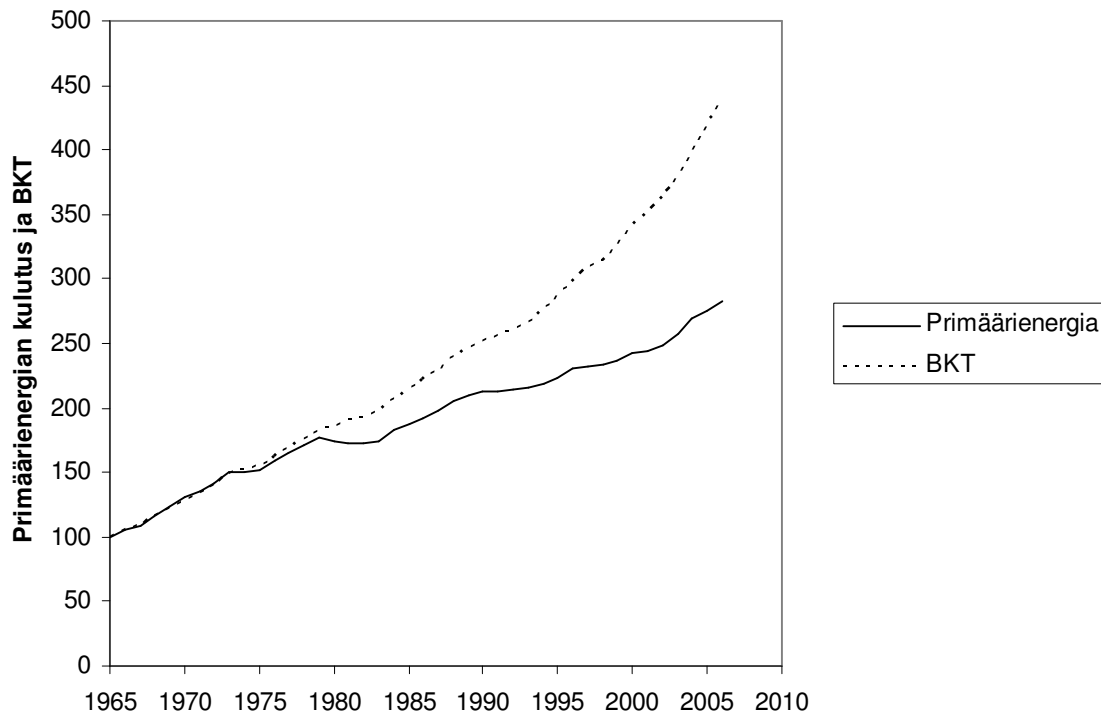
⁶ Johnson Jeff, The end of the light bulb, Chemical & Engineering News, December 03, 2007.

⁷ Smil Vaclav, Energy at the Crossroads: Global Perspectives and Uncertainties, MIT Press, Cambridge, MA, 2003.

tetaan 60 %:n hyötysuhteella modernissa kombivoimalassa, sähkönsiirron hyötysuhde on 96 % ja sähköä käyttävä moottori toimii 90 %:n hyötysuhteella. Tässä tapauksessa polttoaineesta saadaan käytettyä hyödyksi 50 % – yli kaksi kertaa enemmän kuin ensimmäisessä tapauksessa.

Energiatehokkuus ja talous

Taloukasvun ja energiankulutuksen välillä on riippuvuus, joka on viime vuosikymmeninä kuitenkin vähentynyt. Talouden energiaintensiteetti, taloukasvun ja energiankulutuksen kasvun suhde, on parantunut. Oheisessa kuvassa on esitetty maailman primäärienergian kulutuksen ja bruttokansantuotteen kehitys 1965–2006 (1965 = 100).



Maailman primäärienergian kulutuksen ja bruttokansantuotteen kehitys 1965–2006 (1965 = 100)
(BP statistical review of world energy June 2008⁸, Maddison⁹).

Vuodesta 1965 vuoteen 1980 energiankulutuksen kasvu oli 85,5 % bruttokansantuotteen kasvusta. Vuodesta 1980 vuoteen 2006 talous kasvoi huomattavasti riva-kammin kuin energiankulutus, energiankulutuksen kasvu oli enää 43,3 % bruttokansantuotteen kasvusta. On mielenkiintoista nähdä, mitä tapahtuu maailman energiankulutuksen ja bruttokansantuotteen riippuvuudelle vuonna 2009, kun maailman bruttokansantuotteen kasvu on miinuksella.

Kalifornian osavaltion energiansäästöohjelman ansiosta viimeisen 35 vuoden aikana henkeä kohti laskettu sähkönkulutus on laskenut Kaliforniassa 40 % verrattuna koko Yhdysvaltojen lukuihin. University of Californiassa Berkeleyssä tehdyn

⁸ BP statistical review of world energy June 2008, BP, June, 2008.

⁹ Maddison Angus, Statistics on World Population, GDP and Per Capita GDP, 1-2006 AD, http://www.ggdc.net/maddison/Historical_Statistics/horizontal-file_03-2009.xls, March, 2009.

tutkimuksen mukaan (Roland-Holst¹⁰ 10/2008) kotitaloudet ovat säästäneet energiansäästön myötä sähkölaskuissaan 56 miljardia dollaria vuosina 1972–2006. Tästä summasta ohjautui 46 miljardia dollaria tavaroihin ja palveluihin, mikä loi 1,5 miljoonaa uutta työpaikkaa.

Tutkimuksen mukaan kotitalouksien vähentynyt sähkönkulutus aiheutti energia-yhtiöille 1,6 miljardin dollarin tulonmenetykset ja 23 500 työpaikan menetettiin energiasektorilta. Parantunut energiatehokkuus toi kuitenkin tuloja ja työpaikkoja muille sektoreille: tukku- ja vähittäiskaupalle 11,2 miljardia dollaria ja 457 000 työpaikkaa, valaistusteollisuudelle 1,1 miljardia dollaria ja 41 000 työpaikkaa sekä kemianteollisuudelle 258 miljoonaa dollaria ja 6500 työpaikkaa. Roland-Holstin mukaan hiilidioksidipäästöjen alentamiseen tähtäävät toimet, kuten päästökauppa, parantavat energiantuotannon ja -käytön hyötysuhdetta, mikä johtaa Kaliforniassa vuoteen 2020 mennessä 400 000 uuden työpaikan syntyyn ja 76 miljardin dollarin suuruiseen talouden kasvuun.

Vaikka tuhlaileva energiankäyttö kasvattaa bruttokansantuotetta (esimerkiksi tarpeettoman suuret asunnot ja autot sekä kaukolomat), on tehokas energiankäyttö useimmiten edullista niin energian kuluttajalle kuin ympäristöllekin. Kun tuotetaan vähemmällä resursseilla enemmän, säästyy rahaa ja myös ympäristö hyötyy. Esimerkiksi kemian- ja prosessiteollisuudessa energian- ja raaka-aineidenkäytön tehostaminen on ollut vuosikymmeniä ensiarvoisen tärkeää ei niinkään ympäristön kuin kilpailukyvyn takia.

Energiatehokkuus, hiilidioksidipäästöt ja resurssien järkevä kohdentaminen

Useimmiten hyvä energiatehokkuus tarkoittaa pienempiä hiilidioksidipäästöjä. Kevyt auto, jossa on pieni moottori, aiheuttaa vähemmän hiilidioksidipäästöjä

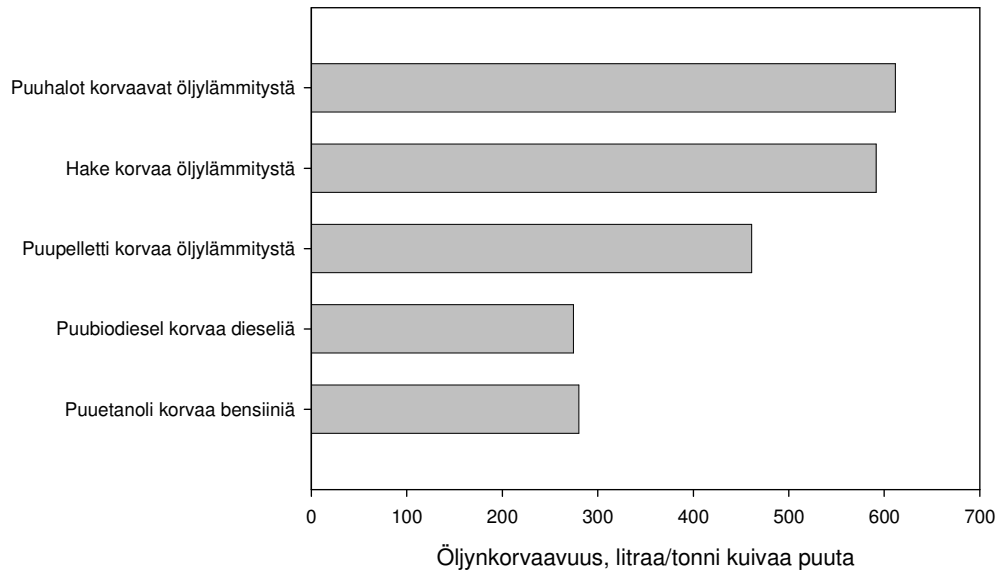
¹⁰ Roland-Holst David, Energy Efficiency, Innovation, and Job Creation in California, Center for Energy, Resources, and Economic Sustainability (CERES), Department of Agricultural and Resource Economics, University of California, Berkeley, CA, October, 2008.

kuin tehokkaalla moottorilla varustettu painava auto. Hyvin eristetyn pienen talon lämmittämisen hiilidioksidipäästöt ovat merkittävästi pienemmät kuin suuren huonosti eristetyn talon päästöt, jne.

Alhaiset hiilidioksidipäästöt eivät välttämättä kuitenkaan tarkoita hyvää energiatehokkuutta tai toiminnan järkevyyttä. Esimerkiksi vesivoimalla tuotetun sähkön käyttäminen vedyntuotantoon vetyautoja varten on erittäin tehontonta sähköenergian käyttöä, vaikka koko elinkaaren hiilidioksidipäästöt ovat olemattomat. Valitettavasti resurssien käytön vertailuissa tuijotetaan usein vain hiilidioksidipäästöjä, vaikka energiatehokkuus ja kokonaisyötysuhde olisivat hyviä mittareita. Vesivoimalla tuotetun sähkön paras käyttökohde olisikin kivihiihisähkön korvaaminen, jolloin samoilla resursseilla saavutettaisiin suurimmat hiilidioksidipäästöjen vähennykset.

Energiatehokkuuden ja hyötysuhteen merkitystä resurssien kohdentamisen järkevyyden arvioinnissa valaisee esimerkki puupohjaisista liikenteen biopolttoaineista. Fischer–Tropsch-dieseliä voidaan tuottaa puuta epäsuorasti synteetikaasureitin kautta nesteyttämällä. Verrattuna tavalliseen petrodieseliin ns. stand alone -Fischer–Tropsch-laitoksessa tuotetun dieselin hiilidioksidipäästöt ovat hieman yli 70 % pienemmät ja elinkaaren öljynkulutus noin 90 % pienempi. Tarkastelua ei kannata kuitenkaan jättää tähän, vaan kannattaa tarkastella puun energiakäytön muita vaihtoehtoja ja niiden hyötysuhteita.

Puupohjaisen Fischer–Tropsch-dieselin tuotannon hyötysuhde koko elinkaari huomioiden on 42 %, kun raakaöljypohjaisen dieselin tuotannon hyötysuhde on 87 %. Myös kevyen polttoöljyn tuotannon hyötysuhde on 87 %, samoin kuin puuhakkeen tuotannon hyötysuhde. Tämä tarkoittaa, että samalla puumäärällä pystytään lämmityskäytössä korvaamaan yli kaksi kertaa enemmän öljyä kuin jalostamalla puu liikenteen biopolttoaineiksi. Samalla hiilidioksidipäästöjä saadaan vähennetyksi yli tuplasti enemmän. Lisäksi energiatehokkaampi puunkäyttö on merkittävästi halvempaa kuin vaativa ja suuria pääomia sitova puun prosessointi nestemäisiksi hiilivedyiksi autojen moottoreita varten.



Puun käyttö energiaksi – raakaöljyn korvaavuus.

Fossiilisia polttoaineita kuten kivihiiltä käyttävien voimaloiden savukaasujen puhdistaminen tai hiilidioksidinpoisto pienentää sähköntuotannon hyötysuhdetta. Kivihiilivoimalassa pienhiukkaset saadaan suurelta osin poistetuksi elektrostaattisten suodattimien avulla ja rikkidioksidi saadaan pois kalkkipesulla. Elektrostaattiset suodattimet (lentotuhkan poisto) kuluttavat 2–4 % ja rikinpoistossa kuluu 8 % voimalan tuottamasta sähköstä (Smil¹¹ 2003).

Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi kivihiiltä polttavista laitoksista on keino vähentää kivihiilen polton suuria hiilidioksidipäästöjä. Tekniikoita on useita, mutta kaikki ovat kalliita ja energiaintensiivisiä. Hiilidioksidin jälkipoisto yleisimmällä menetelmällä eli amiiniabsorptiolla pienentää kivihiilivoimalan hyötysuhdetta 14 % ja esipoisto ns. oxyfuel-voimalassa (puhtaalla hapella poltto) pienentää hyötysuhdetta 11 % (Service¹² 2004). Näiden lisäksi energiaa kuluu runsaasti hiilidioksidin varastointiin.

¹¹ Smil Vaclav, *Energy at the Crossroads: Global Perspectives and Uncertainties*, MIT Press, Cambridge, MA, 2003.

¹² Service Robert F., *The carbon conundrum*, *Science*, Vol. 305, August 13, 2004.

Hiilidioksidipäästöjen vähentäminen taloudellisesti kivihiili- tai maakaasuvoimaloissa tuntuu hankalalta. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi pienentävät energiatehokkuutta ja nostavat voimakkaasti tuotetun sähkön hintaa. Kivihiilikombivoimaloiden (IGCC) hyötysuhde on korkea, jolloin hiilidioksidipäästöt tuotettua sähköyksikköä kohti laskevat ja laitosten polttoaineen kulutus pienenee. Menetelmä on kuitenkin niin kallis, että sähkön hinta myös tässä tapauksessa nousee voimakkaasti. (Johnson¹³ 2004)

Hiilidioksidipäästöjen alentaminen hiilidioksidin talteenotolla ja varastoinnilla on paitsi energiatehoton myös hidaskäyttö tapa vähentää hiilidioksidipäästöjä. Sillä on merkitystä aikaisintaan muutaman kymmenen vuoden päästä. Järkevämpää olisikin parantaa energiatehokkuutta ja lisätä uusiutuvien sähköntuotantomuotojen, kuten aurinko ja tuuli, tuotantokapasiteettia.

Energiatehokkuus yhteiskunnassa ja yksilötasolla

Energiantuotanto- ja käyttöteknologioiden uudistaminen kestävät vuosia tai vuosikymmeniä (Tekes¹⁴ 2003). Yhdyskuntasuunnittelun vaikutus on vieläkin pitkäkestoisempi. Asuinalueiden, kauppapaikkojen ja liikenneverkkojen pysyvyys ja vaikutus on jopa vuosisatoja.

Rakennukset ovat hyvin pitkäikäisiä. Rakennettu neliö ja kuutio tarvitsevat lämmitystä, ilmanvaihtoa ja valaistusta vuosikymmeniä. Rakennukset käyttävät EU:n alueella kulutetusta energiasta 30–40 % (Saari¹⁵ 2003). Suomessa rakennusten kuluttamasta energiasta kuluu kaksi kolmasosaa lämmitykseen ja kolmasosa valaistuksen ja laitteiden sähkөөn.

Siinä missä monet kemialliset synteesit toimivat lähellä termodynaamista maksimihiötysuhdettaan ja jotkut sähkömoottorit, tulipesät ja sähkömoottorit jopa 90–

¹³ Johnson Jeff, Putting a lid on carbon dioxide, Chemical & Engineering News, December 20, 2004.

¹⁴ Ilmastonmuutos – miten voimme vaikuttaa, Ilmasto – haaste teknologialle, ed. Ilkka Savolainen, Mikael Ohlström, Anne Kärkkäinen, Tekes, 2003.

¹⁵ Saari Mikko, Rakennusten energiankulutus voidaan puolittaa, Ilmasto – haaste teknologialle, ed. Ilkka Savolainen, Mikael Ohlström, Anne Kärkkäinen, Tekes, 2003.

97 %:n hyötysuhteella, rakennukset ovat hämmästyttävän energiatehottomia. Käyttämällä hyvää eristystä talon energiankulutus voidaan puolittaa. Kerrostaloniön energiankulutus on rakenteellisesta tehokkuudesta johtuen noin 40 % pienempi kuin omakotitalon (Smil¹⁶ 2008).

Maailma on täynnä esineitä, jotka kuluttavat joko paljon tai vähän energiaa: esimerkiksi autot ja kodinkoneet. Näitä tavaroita ja niiden käyttäjiä on satoja miljoonia tai miljardeja, joten pienikin parannus niiden energiatehokkuudessa merkitsee suuria energia- ja päästömääriä.

Kiinassa aloitettiin 1980-luvun alussa kampanja alkeellisten huonolla 5–15 %:n hyötysuhteella toimivien tulisijojen korvaamiseksi tehokkaammilla 25–30 %:n hyötysuhteella toimivilla tulisijoilla. Tulisijoja korvattiin 15 vuodessa jopa 180 miljoonaa kappaletta, mikä säästi puu- ja kivihiihienergiaa noin 2 EJ vuodessa (Suomen primäärienergian kulutus on noin 1 EJ vuodessa). Yhdysvalloissa kymmeniä miljoonia kotitalouksia lämpiää maakaasulla alle 60 %:n hyötysuhteella, kun modernit tehokkaat lämmitysjärjestelmät pystyvät yli 90 %:n hyötysuhteeseen. (Smil¹⁷ 2008)

Rissan¹⁸ (2003) mukaan yhteiskunnan rakennemuutos kohti tieto- ja palveluyhteiskuntaa pois perusteellisuudesta on ilmastontorjunnan kannalta edullista. Näkemys on idealistinen, koska korkean teknologian yhteiskunta ei sulje pois perusteellisuuden tarvetta. Matkustaminen, tavaroiden ja raaka-aineiden kulutus ovat kasvaneet käsi kädessä tietoteknisen kehityksen kanssa. Tieto- ja palveluyhteiskuntaan siirtyminen on korkeintaan tarkoittanut saastuttavan ja energiaintensiivisen tuotannon ulkoistumista kolmansiin maihin. Ilmasto ei tunne valtiorajoja.

¹⁶ Smil Vaclav, *Energy in Nature and Society: General Energetics of Complex Systems*, MIT Press, Cambridge, MA, 2008.

¹⁷ Smil Vaclav, *Energy in Nature and Society: General Energetics of Complex Systems*, MIT Press, Cambridge, MA, 2008.

¹⁸ Rissa Kari, *Ilmastonmuutos – teknologiapoliitiikan vaikutukset*, Tekes, 2003.

Energiatehokkuus tuotanto- ja prosessiteollisuudessa

Resursseja kannattaa hyödyntää prosessiteollisuudessa ja teollisuudessa ylipäänsä säästeliäästi sekä ympäristön että taloudellisen kannattavuuden takia. Prosessiteollisuudessa tämä tarkoittaa raaka-aineiden tehokasta käyttöä ja kierrätystä sekä energian ja veden ominaiskulutuksen vähentämistä (Tekes¹⁹ 1997).

Raaka-aineiden, esineiden ja tuotteiden valmistaminen kuluttaa energiaa. Valmistuksen osuus saattaa olla merkittävä esineen tai tuotteen koko elinkaaren energiankulutuksessa. Esimerkiksi paljon energiaa käyttövaiheessa kuluttavien autojen ja rakennusten elinkaaren energiankulutuksesta ja hiilidioksidipäästöistä merkittävä osa tulee valmistusvaiheesta – autoilla noin 30 % tulee auton ja polttoaineen valmistuksesta.

Eri tuotteiden valmistus vaatii erisuuruiset määrät energiaa. Betonin valmistus vaatii energiaa noin 2 GJ/t, raudan valmistus noin 20 GJ/t, alumiinin valmistus noin 200 GJ/t ja piin valmistus noin 2000 GJ/t. Kierrätyksen merkityksestä kertoo jotain se, että esimerkiksi kierrätysalumiinin tuotanto vaatii energiaa vain noin 10 GJ/t (Sawin²⁰ 2004).

IEA:n (International Energy Agency) vuoden 2008 arvion mukaan parempi energiatehokkuus maailman perusteellisuudessa säästäisi 26–40 EJ energiaa (Maailman primäärienergian kulutus oli vuonna 2007 noin 470 EJ). Maailman hiilidioksidipäästöt pienenisivät 1,9–3,2 Gt vuodessa eli 7–12 %.

Yhdysvaltojen energiaministeriö DOE on arvioinut, että vuoteen 2020 mennessä Yhdysvalloissa kemianteollisuus voisi kustannustehokkaasti parantaa energiatehokkuuttaan niin että energiaa säästyisi vuosittain 0,8 EJ (Mendez²¹ 2007). Määrä vastaa noin 20 miljoonan suomalaishenkilöauton energiankulutusta. Euroopan

¹⁹ Ympäristö ja teknologia, Tekes, 1997.

²⁰ Sawin Janet L., Making better energy choices, The World Watch Institute – State of the World 2004, 2004.

²¹ Mendez Miguel, The role of chemical engineers in green engineering: what we can do to support its goals, Chemical Engineering, December, 2007.

unioni on puolestaan arvioinut EU15:n prosessiteollisuuden energiansäästöpotentiaaliksi 2 EJ (Käyhkö²² 2004). Yksi kemiallisen prosessiteollisuuden suurimmista energiasyöpöistä on tislaukset. On arvioitu (Chemical Engineering²³ 2003), että vaihtamalla neljäsosa Yhdysvaltojen tislauksetkolonneista käyttämään modernia tehokasta tislausteknologiaa säästettäisiin vuosittain 0,63 EJ tislauksen energiankulutuksessa. Määrä vastaa noin 15 miljoonan suomalaishenkilöauton energiankulutusta ja yli puolta koko Suomen primäärienergian kulutuksesta.

Perusteellisuus on parantanut energiatehokkuutta paljon energiaa kuluttavassa tuotannossaan varsinkin 1970- ja 1980-luvuilla. Länsimaissa 1970-luvun alusta 1980-luvun loppuun energiankulutus tuotantotonna kohti pieneni rauta- ja terästeollisuudessa 27 % ja kemianteollisuudessa 37 % (Smil²⁴ 2001).

Kemianteollisuuden jätti BASFin mukaan se on vuodesta 1990 vuoteen 2006 vähentänyt kasvihuonekaasupäästöjään 38 % ja samaan aikaan kasvattanut tuotantoaan 51 % (Ord²⁵ 2008). Toinen kemianteollisuuden jätti DuPont puolestaan vähensi 1990-luvun alusta 2000-luvun alkuun kasvihuonekaasupäästöjään 70 %, vaikka sen tuotanto kasvoi 30 %:lla (Northrop²⁶ 2005). Samalla DuPont säästi energiakuluissa kaksi miljardia dollaria (Varchaver *et al.*²⁷ 2004). Kun Finnsementti uusi Lappeenrannassa sementtitehtaan, energiankulutus laski tuotettua sementtitonnia kohti 20 % (Vilenius²⁸ 2005).

Kuten aiemmin jo mainittiin, monien kemianteollisuuden synteettien energiatehokkuus lähentelee termodynaamista maksimia. Saksalainen kemisti Fritz Haber

²² Käyhkö Tuija, Energiansäästö hoituu ilman omaa investointia, Tekniikka ja Talous, 29.01.2004

²³ Distillation improvements could save U.S. industry up to \$6 billion/yr, says report, Chemical Engineering, January, 2003.

²⁴ Smil Vaclav, Feeding the World: A Challenge for the Twenty-First Century, MIT Press, Cambridge, MA, 2001.

²⁵ Ord David, In the balance?, ICIS Chemical Business Americas, April 21–27, 2008.

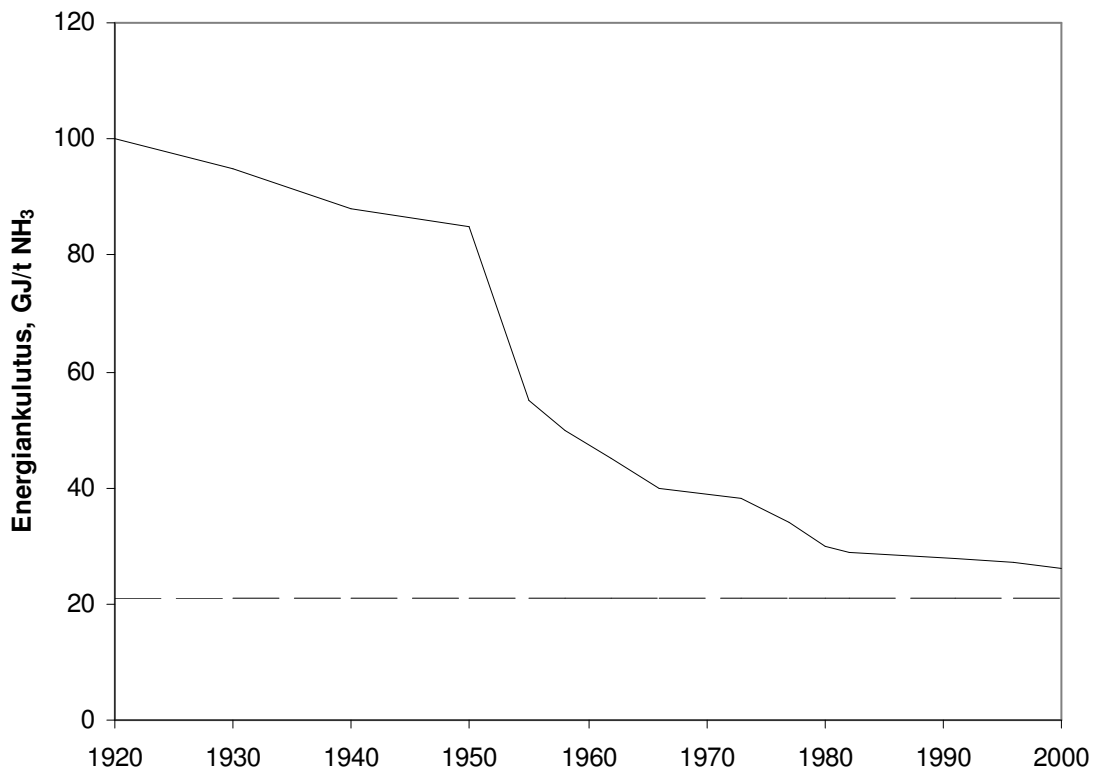
²⁶ Northrop Michael, Päästövähennykset tuottoisia, Helsingin Sanomat, 02.04.2005.

²⁷ Varchaver Nicholas, Lustgarten Abraham, Mero Jenny, How to kick the oil habit, Fortune, Vol. 150, No. 4, August 23, 2004.

²⁸ Vilenius Esa, Finnsementin uunista tulee Lappeenrannan uusin maamerkki, Etelä-Saimaa, 20.08.2005.

onnistui vuonna 1909 syntetisoimaan ilman typestä (N_2) ja fossiilisista raaka-aineista saatavasta vedystä (H_2) lannoitteiden valmistamiseen tarvittavaa ammoniakkia (NH_3), ja BASFin kemisti Carl Bosch kehitti ammoniakkiprosessin teolliseen mittakaavaan. Ensimmäinen tehdas käynnistyi Saksan Oppaussa vuonna 1920. Vuonna 1920 Haber–Bosch-prosessin osuus keinolannoitteiden typestä oli 16 %. Haber–Bosch-prosessilla tuotettiin tuolloin noin miljoona tonnia ammoniakkia. Vuonna 2000 yli 99 % ammoniakista tuotettiin Haber–Bosch-prosessilla ja tuotantomäärä oli noin 100 miljoonaa tonnia.

Oheinen kuva näyttää, kuinka ammoniakkisynteesin energiatehokkuus on parantunut vajaan sadan vuoden aikana. Parantuneella energiatehokkuudella on suuri merkitys, sillä noin prosentti maailman hiilidioksidipäästöistä syntyy Haber–Bosch-prosessista.



Haber–Bosch-ammoniakkiprosessin vaatima energia (kokoviiva) lähestyy termodynaamista minimiä (katkoviiva). Ammoniakin tuotannossa siirryttiin 1950-luvulla laajasti maakaasuun, mistä johtuu silloinen voimakas tuotannon tehostuminen. (Smil²⁹ 2001)

Haber–Bosch-prosessin kehittänyt, nykyään maailman suurin kemianteollisuuden yritys, saksalainen BASF teki vuonna 2008 ensimmäisenä maailmassa kokonaisanalyysin yhtiön tuotteiden ja toimintojen ilmastovaikutuksista. Tulosten mukaan BASFin tuotteet vähentävät hiilidioksidipäästöjä kolme kertaa enemmän kuin niiden valmistamisesta ja hävittämisestä syntyy.

BASFin aiheuttamat hiilidioksidipäästöt (CO₂-ekvivalentteina laskettuna) vuonna 2006 olivat 87 miljoonaa tonnia (Suomen CO₂-päästöt ovat noin 70 miljoonaa ton-

²⁹ Smil Vaclav, *Enriching the Earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the Transformation of World Food Production*, MIT Press, Cambridge, MA, 2001.

nia), mutta BASFin tuotteet vähensivät hiilidioksidipäästöjä 252 miljoonalla tonnilla (McKoy^{30,31} 2008, Ord³² 2008). Tällaisia tuotteita ovat rakennusten eristämateriaalit (140 miljoonan hiilidioksiditonin vähennys), autoteollisuuden käyttämät kevyet komposiittimateriaalit (30 miljoonan hiilidioksiditonin vähennys), polttoaineiden lisäaineet ja nitrifikaatioinhibiittorit (pelkästään Kiinassa 10 miljoonan hiilidioksiditonin vähennys), jotka hidastavat lannoitetypen hajoamista typenoksideiksi.

BASF on periaatteessa oikeassa laskelmissaan. Tällaisen laskentatavan ongelma on kuitenkin se, että hiilidioksidipäästövähennyksistä voivat yhtä hyvin ottaa hyödyn BASFin eristeitä käyttävät rakennusliikkeet, rakennuksen ostaneet yritykset, rakennuksen rahoittaneet pankit jne.

Esimerkiksi rakennusten energiatehokkuudessa on tärkeää, että rakennukset ovat hyvin eristettyjä ja pitkäikäisiä. Kemianteollisuuden tuotteilla on tärkeä rooli näiden tavoitteiden saavuttamisessa. Joitain rakennusmateriaaleja voi kutsua älykkäiksi ja energiatehokkaiksi. Tällaisia ovat esimerkiksi BASFin ja DuPontin kehittämät kipsilevyseinät, joissa on kipsin seassa pieniä vahakapseleita. Päivällä sisäilmasta siirtyy seiniin lämpöä ja vahakapselit sulavat (sulamispiste 23 °C). Lämpö sitoutuu sulaan vahaan, mikä pienentää ilmastoinnin tarvetta. Illalla ja yöllä ilman viileessä vaha kiinteytyy ja sulamislämpö siirtyy takaisin huoneilmaan vähentäen lämmitystarvetta. BASFin laskelmien mukaan energiantarve pienenee 7 %:lla ja asumismukavuus kasvaa.

BASF on suunnitellut jopa edullisen matalaenergiatalon, jossa käytetään mm. BASFin Neopor-eristeitä. Talon lämmitysenergian kulutus on noin viidestoistaosa

³⁰ McCoy Michael, Converging pathways, Chemical & Engineering News, August 18, 2008.

³¹ McCoy Michael, Basf makes bold carbon claim, Chemical & Engineering News, February 18, 2008.

³² Ord David, In the balance?, ICIS Chemical Business Americas, April 21–27, 2008.

tavallisen talon lämmitysenergiasta (O'Driscoll³³ 2008). Tällaisten supereristettyjen ja -energiatehokkaiden talojen sisäilman laadusta on esitetty kuitenkin huolestuneita arvioita.

Prosessiteollisuudessa parempaan energiatehokkuuteen päästään muillakin tavoin kuin itse prosesseja virtaviivaistamalla. Rakennusten lämmitys ja jäähdytys ovat myös teollisuudessa suuri energiankuluttaja. Sähkömoottoreiden taajuusmuuttajien avulla prosessiteollisuuden pumppujen ja puhaltimien energiankulutusta voidaan vähentää merkittävästi. Tietotekniikka, kehittynyt prosessilaskenta ja säätötekniikka ovat oivia työkaluja, jotka mahdollistavat energiatehokkaita ratkaisuja.

LUT:n teknillisen kemian laboratorion energiatehokkuustutkimus

Lappeenrannan teknillisen yliopiston (LUT) teknillisen kemian laboratoriolle on pitkät perinteet kemian-, metsä- ja metallurgiateollisuuden prosessien tehostamisesta. Laboratorio oli jo 1990-luvun alussa kehittämässä Lappeenrannassa Kaukaan kemiantehtaalla tehtyä metsäbiojalostamoon liittyvää sitostanoli-innovaatiota. Sitostanolista edelleen kehitetyt Benecol-tuotteet valittiin vuonna 2009 maailman kymmenen merkittävimmän ravitsemuskeksinnön joukkoon (Katan *et al.*³⁴). Uusissa biorefinery-tutkimushankkeissa sitostanolin kaltaisten arvomolekyylien toivotaan kompensoivan varsin energiatehottoman biomassan prosessoinnin.

Parhaillaan on menossa laaja Tekes-hanke, jonka osana toisen sukupolven bioetanoliprosessin (väkevähappohydrolyysi) energiataloudellisena ja taloudellisena pullonkaulana olevaa hapon ja hydrolyysisokerien erotusta kehitetään huomattavasti energiatehokkaammaksi kromatografisen erotuksen avulla. Kokeellisen tutkimuksen lisäksi tutkimus- ja kehitystyössä käytetään hyödyksi teknillisen kemian laboratoriossa kehitettyjä dynaamisia laskentamalleja.

³³ O'Driscoll Cath, Super efficient eco-house, Chemistry & Industry, February 11, 2008.

³⁴ Katan M.B., Boekschoten M.V., Connor W.E., Mensink R.P., Seidell J, Vessby B, Willett W, Which are the greatest recent discoveries and the greatest future challenges in nutrition?, European Journal of Clinical Nutrition, 63, 2–10, 2009.

Laboratoriossa on meneillään myös kaksi laajaa hydrometallurgiaprojektia (Talvi-vaara ja Outotec). Hydrometallurgiaprosessien tarkoitus on pitkälti korvata energiantensiivisiä pyrometallurgiaprosesseja.

Teknillisen kemian laboratoriossa on myös vuosikausia tutkittu luonnonvarojen energiatehokasta ja kestävästä käyttöä ja niiden järkevää kohdentamista ja prosessointia.

Tulevaisuuden kestäviä energia- ja liiketoimintaratkaisuja varten tulisi selvittää resurssien optimaalinen käyttö. Huomioon tulee ottaa energiatehokkuus sekä lopputuotteen käytössä että raaka-aineiden prosessoinnissa. Tärkeää on myös ymmärtää laajasti ratkaisujen ympäristövaikutukset ja kilpailutilanne raaka-ainevaroista tuotannollisen teollisuuden ja energiateollisuuden välillä.