

## Voimalaitosten reaaliaikainen ympäristövaikutusten monitorointi

*Yrjö Majanne, Timo Korpela*

Tampereen Teknillinen Yliopisto, Systemiteknikan laitos  
Puh. +358 3 3115 11, [yrjo.majanne@tut.fi](mailto:yrjo.majanne@tut.fi), [timo.korpela@tut.fi](mailto:timo.korpela@tut.fi), [www.tut.fi](http://www.tut.fi)

*Jachym Judl, Sirkka Koskela*

Suomen Ympäristökeskus, Puh. 0295 251 000,  
[jachym.judl@ymparisto.fi](mailto:jachym.judl@ymparisto.fi), [sirkka.koskela@ymparisto.fi](mailto:sirkka.koskela@ymparisto.fi), [www.ymparisto.fi](http://www.ymparisto.fi)

*Ville Laukkanen*

IndMeas Oy, Puh. +358 40 550 7317,  
[ville.laukkanen@indmeas.com](mailto:ville.laukkanen@indmeas.com), [www.indmeas.com](http://www.indmeas.com)

*Anna Häyrinen, Olli Salminen*

Helen, Puh. 09 6171,  
[anna.hayrinen@helen.fi](mailto:anna.hayrinen@helen.fi), [olli.salminen@helen.fi](mailto:olli.salminen@helen.fi), [www.helen.fi](http://www.helen.fi)

AVAINSANAT: voimalaitos, ympäristötehokkuus, monitorointi, elinkaarianalyysi

### TIIVISTELMÄ

Voimalaitosten ympäristövaikutukset koostuvat suorista ja välillisistä vaikutuksista. Suorat vaikutukset koostuvat laitoksen käytöstä aiheutuvista päästöistä ympäristöön ja välilliset vaikutukset mm. polttoaineiden tuotannosta ja kuljetuksesta sekä toiminnasta syntyvien jätteiden käsittelystä. Laitosten suoria päästöjä valvotaan jatkuvatoimisilla mittauksilla, mutta epäsuoria elinkaarivaikutuksia arvioidaan tyypillisesti kertaluonteisesti laitoksia suunniteltaessa, esim. valittaessa sovellettavaa polttotekniikkaa, käytettäviä polttoaineita ja niiden hankintaa. Haluttaessa arvioida toiminnan kokonaisvaikutuksia ympäristöön sekä esim. käytettävien polttoaineiden vaikutusta laitoksen käyttöalouteen, on tärkeää huomioida kaikki toiminnasta aiheutuvat vaikutukset. Esiteltävässä monitorointijärjestelmässä yhdistetään voimalaitosten käyttöön ja toimintaan liittyvät suorat ja välilliset ympäristövaikutukset reaaliaikaisesti voimalaitoksen toiminnan ympäristötehokkuutta kuvaaviksi tunnusuureiksi. Monitorointijärjestelmää on kehitetty Helenin Salmisaaren voimalaitokselle osana Cleen Oy:n koordinoimaa ja TEKES:in rahoittamaa MMEA-tutkimusohjelmaa.

### 1 JOHDANTO

Viranomaiset, voimalaitosten käyttäjät sekä energian kuluttajat haluavat yhä tarkempaa tietoa energiantuotannon ympäristövaikutuksista. Hinnan ohella kuluttajien kasvava mielenkiinto tuotetun energian ympäristövaikutuksista ohjaa ostokäyttäytymistä. Vuonna 2016 voimaan astuva Euroopan komission IE-direktiivi (Industrial Emissions) sekä vuonna 2013 käynnistynyt EU:n kolmas hiilidioksidin päästökauppaus edellyttävät yhä tarkempaa ja luotettavampaa päästöjen seuranta samalla kun haitallisten päästöjen päästöraajat tiukkenevat ja valvottavat keskiarvostusjaksot lyhenevät vuorokausitasolta tuntitasolle. [European Commission. 2010, 2012a, 2012b, 2012c]

Viranomaisvalvonta kohdistuu laitosten suoriin päästöihin, joita seurataan pitoisuusmittausten ja laitosten käyttötiedoista laskettujen kokonaispäästömäärien perusteella. Laitosten käyttäjiä kiinnostaa prosessien käytön aiheuttamat ominaispäästöt tuotettua energiayksikköä kohden ja miten näitä voitaisiin pienentää kehittämällä ajostrategioita, konversioprosesseja sekä haitallisten päästöjen vähennysmenetelmiä. Ajotapoihin liittyvät pienentyneet ominaisvaikutukset liittyvät usein prosessien tehostuneeseen toimintaan, esim. primäärienergian kulutukseen, joka näkyy myös parantuneena taloudellisena tuloksena.

Suorat päästöt ovat kuitenkin vain osa energian tuotannon aiheuttamista ympäristövaikutuksista. Polttoaineiden valmistaminen ja kuljetus aiheuttavat päästöjä ympäristöön samoin kuin laitosten toiminnasta aiheutuvien jätteiden käsittely ja loppukäyttö. Näiden välillisten vaikutusten arviointi tapahtuu perinteisesti elinkaarianalyysin avulla. Tuotantoprosessista laaditaan elinkaarimalli, joka kuvaa laajasti kaikki prosessin tuotannolliseen toimintaan liittyvät aine- ja energiavirrat. Tapauskohtaisesti malliin voidaan sisällyttää myös tuotantoprosessin rakentamisesta ja käytöstäpoistosta aiheutuvat vaikutukset. Elinkaarivaikutusten arviointia varten on kehitetty mallinnus- ja laskentatyökaluja sekä tietokantoja, joiden avulla voidaan määrittää polttoaineiden tuotannosta, kuljetustavoista ja –etäisyyksistä aiheutuvia ympäristövaikutuksia. [PRé 2011, Ecoinvent 2011, VTT. LIPASTO 2012]. Elinkaarianalyysi tehdään yleensä kertaluonteisesti haluttaessa selvittää jonkin suunniteltavan tai

olemassa olevan järjestelmän vuotuisia kokonaisvaikutuksia ympäristöön tai vertailtaessa erilaisia laite-, tuotanto-, raaka-aine yms. ratkaisuja.

Pyrittäessä mahdollisimman tehokkaaseen ja ympäristön kannalta vähiten kuormittavaan toimintaan ympäristövaikutusten arvioinnissa tulee huomioida kaikki energiantuotantoon liittyvät ympäristövaikutukset, ei ainoastaan suoria päästöjä. Esiteltävässä monitorointisovelluksessa yhdistetään prosessimittauksiin perustuva reaaliaikainen monitorointi ja kertaluonteinen elinkaarianalyysi tuottamaan jatkuva-aikaista tietoa voimalaitoksen toiminnan ympäristövaikutuksista ja -tehokkuudesta. Hanke on osa energian ja ympäristön strategisen huippuosaamisen keskittymän CLEEN Oy:n koordinoimaa MMEA - tutkimusohjelmaa. Kohdelaitoksena on Helenin Salmisaaren voimalaitos. Monitoroinnin tavoitteena on tuottaa informaatiota prosessien suunnittelun ja käytön tehostamisen tarpeisiin sekä laitoksilta vaadittavaan viranomaisraportointiin.

Seuraavassa luvussa esitellään suorien ja epäsuorien päästöjen monitoroinnin periaatteet. Kolmannessa luvussa esitellään kehitetyn järjestelmän toiminnat. Neljännessä luvussa esitellään miten monitorointia voidaan hyödyntää laitoksen käyttöstrategian suunnittelussa sekä toiminnan tehokkuuden seurannassa. Viidennessä luvussa esitetään yhteenveto ja tulevaisuuden näkymät voimalaitoksen ympäristötehokkuuden seurannan kehittämisestä.

## 2 SUORIEN JA VÄLILLISTEN PÄÄSTÖJEN MONITOROINTI

Tässä luvussa esitellään voimalaitoksen suorien päästöjen reaaliaikaisen monitoroinnin periaatteet sekä elinkaarimallinnukseen perustuvan välillisten vaikutusten analysoinnin menetelmät.

### 2.1 Suorat päästöt

Voimalaitosten toimintaan liittyviä suoria päästöjä ovat savukaasupäästöt, tuhkista ja rikinpoistoprosessin lopputuotteesta syntyvät kiintoainepäästöt sekä lauhdutuslämpö. Tavallisilla höyryvoimalaitoksilla savukaasuista valvotaan hiilidioksidia CO<sub>2</sub>, rikkidioksidia SO<sub>2</sub>, typen oksideja NO<sub>x</sub> sekä pölypäästöjä. Prosessin rakenteesta riippuen voidaan edellyttää lisämittauksia, esim. kaasukäyttöisillä laitoksilla hiilimonoksidi CO, ammoniakkin ruiskutukseen perustuvia NO<sub>x</sub>:ien vähennysmenetelmiä (SCR, SNCR) käytettäessä savukaasujen NH<sub>3</sub> pitoisuus ja kivihiililaitoksilta kerran vuodessa elohopeapäästöt. Lisäksi jätevoimalaitoksilla on omat IE-direktiivissä mainitut lisämittausvaatimuksensa.

CO<sub>2</sub>:n osalta seurantavelvoite liittyy EU:n päästökauppaan, ja monitoroinnin kohteena on vuotuinen kumulatiivinen päästömäärä. Monitorointiin on käytössä kolme hyväksyttyä menetelmää; mitattuun polttoaineenkulutukseen perustuva ns. standardimenetelmä, kattilan energiataseesta laskettuun polttoaineen kulutukseen perustuva menetelmä sekä CO<sub>2</sub>:n suoraan mittaukseen savukaasuvirrasta perustuva menetelmä. Standardimenetelmässä vuoden aikana mitatut polttoainemäärät kerrotaan polttoainekohtaisilla päästökertoimilla, minkä tuloksena saadaan vuotuinen päästömäärä. Energiataseeseen perustuvassa menetelmässä käytetty polttoainemäärä määritetään laskennallisesti kattilan energiataseesta, ja tämän jälkeen päästömäärä lasketaan päästökertoimien avulla vastaavasti kuin standardimenetelmässä. Suorassa mittausmenetelmässä savukanavasta mitatun CO<sub>2</sub> pitoisuuden sekä savukaasun määrämittauksen perusteella lasketaan kumulatiivinen päästömäärä. Uusi päästökauppadirektiivi edellyttää, että laitosten on seurattava CO<sub>2</sub> päästöjään vähintään kahdella toisistaan riippumattomalla menetelmällä. Näin siksi, että ensisijaisen määrittämenetelmän pettäessä päästöt voidaan selvittää sekundäärimenetelmän avulla. Standardimenetelmälle sekä energiataseeseen perustuvalle menetelmälle ongelmia aiheuttaa monipolttoainekäytössä eri polttoaineiden erilaiset päästökertoimet. Suoraan mittaukseen perustuvassa menetelmässä puolestaan hiilineutraaleja polttoaineita käytettäessä niistä syntyvän CO<sub>2</sub>:n osuus tulee vähentää kokonaispäästömäärästä. Laitosten erilaisista polttoainekäsittelyjärjestelmistä riippuen näiden ongelman ratkaiseminen saattaa olla vaikeaa. Päästökauppadirektiivi asettaa vaatimukset eri määrittämenetelmien mittaustarkkuuksille. Majanne et al. [Majanne 2014] on verrannut todellisissa olosuhteissa saavutettavia mittaustarkkuuksia direktiivin vaatimuksiin ja todennut, että direktiivissä asetettuja tarkkuusvaatimuksia on erittäin vaikea saavuttaa. Myös päästökauppaa valvovassa Energiamarkkinavirastossa ollaan tietoisia tästä ongelmasta, mistä johtuen näiden määrittämenetelmien osalta ollaan vielä siirtymävaiheessa, eikä loppukäyttäjiltä edellytetä tarkkoja mittausketjun luotettavuusanalysejä.

SO<sub>2</sub>:lle, NO<sub>x</sub>:lle ja hiukkasille on asetettu maksimipitoisuusrajat, jotka riippuvat laitoksen nimellistehosta sekä käytetyistä polttoaineista. 1.1.2016 voimaan astuvan IE-direktiivin mukaisesti valvottavan päästön kuukausikeskiarvo ei saa ylittää päästöraja-arvoa. Vuorokausikeskiarvojen tulee olla alle 110% raja-arvosta ja tuntitasolla 95% vuotuisista tuntikeskiarvoista tulee olla alle 200% raja-arvosta. Päästöraja-arvojen valvonnassa ei oteta huomioon käynnistys- ja pysäytysjaksoja eikä häiriötilanteita, mutta normaaleissa kuormanmuutostilanteissa

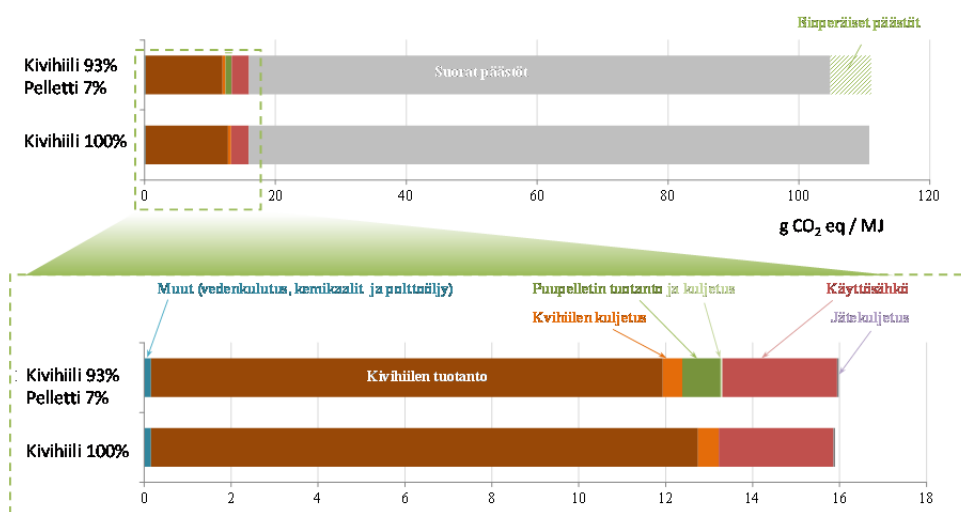
päästöjen tulee pysyä sallituissa rajoissa. Kosteista savukaasuista mitattujen pitoisuuksien tilavuusyksikössä muuntaminen milligrammoiksi normikuutiossa vaatii apumittauksia. Pitoisuuksien lisäksi savukaasuista on mitattava paine, lämpötila, kosteus ja happipitoisuus. Myös näiden mittausten mittaustarkkuuden ylläpidosta on huolehdittava vastaavasti kuin itse analysointilaitosten kalibroinnista.

## 2.2 Välillisten päästöjen arviointi

Voimalaitosten käyttöön liittyvien välillisten ympäristövaikutusten arviointiin käytetään elinkaarimallinnusta ja siihen perustuvaa elinkaarivaikutusten analyysiä. Elinkaarivaikutusten arvioinnissa (Life Cycle Assessment, LCA) analysoidaan erilaisten tuotteiden ja palveluiden aiheuttamia määrällisiä ympäristövaikutuksia, kuten esim. hiilijalanjälkeä ja erilaisia päästöjä. [Judl et al., 2014]. Elinkaarimalli sisältää tuotannollisesta toiminnasta aiheutuvat suorat vaikutukset sekä toiminnassa tarvittavien materiaalien tuotannossa ja kuljetuksessa sekä tuotannossa syntyvien jätteiden käsittelystä aiheutuvat ympäristövaikutukset. Polttoaineiden valmistukseen ja kuljetukseen liittyvien ympäristövaikutusten mallinnukseen käytetään tietokantoja ja laskentajärjestelmiä kuten esim. Ecoinvent Database [Ecoinvent, 2011], VTT:ssä toteutettu Suomen liikenteen pakokaasupäästöjen ja energiankulutuksen laskentajärjestelmä LIPASTO [VTT.Lipasto 2012] sekä Suomen ympäristökeskuksen tekemä ilman laatuun vaikuttavien pienhiukkasten leviämismalli FRES (Finnish Regional Emission Scenario) [Karvosenoja 2008].

Elinkaarimalli sisältää toimintaan liittyvät materiaali- ja energiavirrat. Elinkaarilaskennan inventaariotiedot saadaan laskettua yhdistämällä näihin virtoihin kohdistuvat päästötiedot materiaalien toimittajilta tai tietokannoista. Ympäristövaikutukset saadaan kertomalla inventaariotiedot ympäristövaikutuskertoimilla (karakterisointikertoimet). Seurattaviksi ympäristövaikutuksiksi on valittu ilmastonmuutos, happamoituminen sekä pienhiukkaset. Projektissa elinkaarimalli on rakennettu käyttäen SimaPro ohjelmistoa [PRé 2011]. Ohjelmistolla tehty mallinnus perustuu ns. ReCiPe metodiin, jossa elinkaarimalliin liittyvät lukuisat materiaali- ja energiavarannot muunnetaan muutamaksi ympäristövaikutuksen suhteellista merkittävyyttä kuvaavaksi indikaattoriksi.

Kuvassa 1 on esitetty tuloksia Salmisaaren voimalaitokselle tehdystä selvityksestä, missä on tutkittu kivihiilipolton (100%) sekä kivihiilen ja puupellettien (93% + 7%) seospolton ympäristövaikutuksia [Judl et al. 2014]. Kuvassa on esitetty näiden eri tapausten tuottamat hiilidioksidipäästöt. Kuvasta nähdään suorien päästöjen dominoivan kokonaispäästömääriä polttoaineen valmistuksesta ja kuljetuksesta muodostuvan päästön ollessa n. 15% (n. 16 g CO<sub>2</sub> eq/MJ) kokonaispäästöistä. Kuvasta nähdään myös kuljetusten vaikutuksen pienuus suhteessa polttoaineen tuotantoon niin kivihiilellä kuin puupelleteillä. Pellettien tuotannon vaikutuksia arvioitaessa puun oletettiin olevan peräisin mekaanisen puunjalostuksen kuivasta jätteestä (puru ja hiomapöly), jolloin pellettien valmistukseen ei ole kohdistunut puun keruusta eikä kuivauksesta syntyviä vaikutuksia. Esimerkkilaskennassa kivihiili oli valittu puolalaiseksi ja pelletti tuli n. 100 km etäisyydeltä voimalaitoksesta.



**Kuva 1.** Kivihiilen polton sekä kivihiilen ja puupellettien seospolton aiheuttamat suorat ja välilliset CO<sub>2</sub> päästöt [Judl et al. 2014].

### 3 REAALIAIKAINEN MONITOROINTI

Monitoroinnin ja raportoinnin perustuksena tulee olla lähtötietojen laadun varmennus. Mikäli lähtötietojen luotettavuutta ei tiedetä, monitoroinnista ei ole käytännössä mitään hyötyä, koska ei tiedetä johtuuko havaittu käyttäytyminen prosessin toiminnasta vai mittausvirheistä. Päästövalvonnassa käytettyjen analysaattoreiden käytönaikainen laadussapito on määritetty standardissa EN 1418, jonka osassa QAL3 määritellään kalibrointiin ja datan korjaukseen liittyvät käytännöt. Laitoksen toiminnan seurantaan liittyy kuitenkin lukuisia muita mittauksia, joiden laadussapidosta ei ole säädetty viranomaistaholta. Kehitetystä järjestelmässä tärkeimpien prosessimittausten laadunvalvonta on toteutettu tasemalleihin perustuvalla diagnostiikalla, joka paljastaa massa- ja energiataseita mittaavien antureiden tasovirheet. Höyryvoimalaitosprosessissa esim. ilma-, savukaasu- ja polttoainemäärämittaukset sekä höyryteho kytkeytyvät toisiinsa taseyhtälöiden kautta. Mittausten luotettavuutta voidaan arvioida sen perusteella kuinka tarkasti massa- ja energiataseet mittausten perusteella sulkeutuvat. Vianpaljastuksen lisäksi järjestelmä korvaa virheelliset mittausarvot estimaateilla, jotka perustuvat muihin mittauksiin ja tasemallien tuottamaan informaatioon. Tässä hyödynnetään olemassa olevaa tietoa käytettyjen mittausten menetelmien luotettavuudesta. Esimerkiksi ilmamäärämittaukset voimalaitosten suurista ja mutkittelevista kanavista tiedetään epäluotettaviksi, jolloin puolestaan luotettavamiksi tiedetyn höyrytehon määrittämisen kautta voidaan laskea ilmamäärälle estimaatti prosessin termisen hyötysuhteen, polttoaineen koostumuksen ja niin ikään luotettavaksi tiedetyn savukaasun jäännöshappimittauksen avulla. [Huovinen et al. 2013, Korpela et al. 2014, Laukkanen 2014]

Välillisten ympäristövaikutusten reaaliaikaisessa monitoroinnissa suurimmat haasteet kiinteän polttoaineen laitoksissa tulevat tulipesään syötettävän polttoaineen laadun ja määrän hallinnasta. Hiilidioksidipäästöjen valvonnassa käytetyt tarkkuusvaatit sijaitsevat usein ennen päiväsiiloja, eli tarkan massamittauksen kautta kulkeva polttoainevirta menee polttoon vasta usean tunnin viiveellä mittauksesta. Lisäksi monipolttoainekattiloissa eri polttoaineita voidaan syöttää samoihin päiväsiiloihin, jolloin polttoon menevän polttoaineen koostumusta voi vain arvailla. Hetkellinen polttoainetehto on kuitenkin mahdollista määrittää laitoksen termisen hyötysuhteen kautta. Kehitetystä järjestelmästä laitoksen termisen hyötysuhteen monitorointi perustuu vesikiertokattiloiden häviöiden kautta tehtävään epäsuoraan määrittämiseen (SFS EN 12952-15). Tuorehöyryn määrästä, paineesta ja lämpötilasta laskettuun höyrytehoon lisätään mitatut ja laskennallisesti määritellyt häviöt ja tuloksena saadaan kattilaan syötetty primääriteho. Häviöiden laskennassa tärkeimmässä roolissa on savukaasuhäviö, jonka määrittämiseksi on tiedettävä savukaasun massavirta, lämpötila sekä ominaislämpökapasiteetti.

Mikäli käytettyjen polttoaineiden koostumukset poikkeavat toisistaan merkittävästi on mahdollista laskennallisesti selvittää fossiilisen ja bioperäisen polttoaineen osuudet syötetystä polttoainemäärästä. Biopolttoaineet sisältävät merkittävästi suuremman määrän happea kuin fossiiliset polttoaineet, jolloin syötettyä polttoainekiloa kohden fossiiliset polttoaineet vaativat enemmän palamisilmaa. Esim. kosteudeltaan 50% puukilon polttaminen vaatii 3,4 kg ilmaa ja kosteudeltaan 10% kivihiihikilon polttaminen 6,74 kg ilmaa [Huhtinen et al.]. Erityyppisten polttoaineiden toistaan poikkeavat lämpöarvot mahdollistavat myös eri polttoaineiden suhteellisten osuuksien määrittämisen poltossa, mikäli käytettävissä on mittaus/estimaatti kattilaan syötettävän polttoaineen massavirrasta. Myös savukaasujen kosteutta voidaan käyttää polttoaineosuuksien määrittämiseen, mikäli syötettyjen polttoaineiden kosteudet poikkeavat toisistaan merkittävästi.

Termisen hyötysuhteen lisäksi seurataan laitoksen sähköntuotannon hyötysuhdetta (brutto ja netto), jolloin tarkasteluun otetaan mukaan turbiini-generaattoriproessin hyötysuhde ja laitoksen omakäyttöteho. Sähköntuotannon hyötysuhteen seurannan avulla voidaan havaita esim. syöttöveden esilämmitysprosessin toimintaan liittyviä vaikutuksia. Myös palamisilman höyryllä tapahtuvan esilämmityksen vaikutukset hyötysuhteeseen näkyvät selvästi. Niin ikään jos laitos on varustettu savukaasujen rikinpoistoprosessilla, niin sen toiminnalla on erittäin suuri vaikutus laitoksen omakäyttötehon kulutukseen.

Epäsuorien ympäristövaikutusten reaaliaikainen seuranta toteutetaan yhdistämällä hyötysuhdelaskennasta saataviin polttoaineen kulutustietoihin niihin liittyvät epäsuorat ympäristövaikutukset, jotka on selvitetty elinkaarimallinnuksen avulla. Monitoroinnin kautta saataviin hetkellisiin polttoaineiden käyttötietoihin liitetään niiden valmistuksesta ja kuljetuksesta syntyvät ympäristövaikutukset. Summaamalla välilliset vaikutukset mitattuihin suoriin vaikutuksiin saadaan selville laitoksen käytöstä aiheutuvat kokonaisvaikutukset. Mikäli laitoksen polttoaineenkäsittelyjärjestelmästä on saatavissa tietoa, mistä kunakin ajan hetkenä käytetty polttoaine on peräisin, voidaan välilliset vaikutukset määrittää hyvällä tarkkuudella. Mikäli tätä tietoa ei ole käytettävissä, välillisten vaikutusten arvioinnissa käytetään eri paikoista tulevien polttoaineiden käyttömäärillä painotettuja keskimääräisiä vaikutuksia.

Prosessin toiminnan analysointia sekä viranomaisraportointia varten suorien ja epäsuorien ympäristövaikutusten lisäksi tarvitaan tietoa prosessin tilasta. Päästörajojen valvonnassa käytettävien tunti-, vuorokausi- ja kuukausikeskiarvojen laskennassa on huomioitava laitoksen ylös- ja alasajotilanteet sekä mahdolliset häiriötilanteet. Näinä aikoina tuotettuja päästöjä ei huomioida päästörajojen valvonnassa. Laitoksen suorituskyvyn ja toiminnan kehittämisen kannalta on tärkeää voida seurata laitoksen toimintaa sen toimintapisteen funktiona. Reunaehdot laitoksen toiminnalle määräytyvät laitoksen höyrytehon, polttoaineen koostumuksen ja savukaasun puhdistusjärjestelmien toiminnan perusteella. Polttoaineiden ominaisuuksilla on merkittävä vaikutus laitoksen suorituskykyyn sekä savukaasuhäviöiden että tarvittavan omakäyttötehon kautta. Käytetyt polttoaineet vaikuttavat myös polttoprosessissa syntyvän tuhkan määrään ja ominaisuuksiin. Esim. tuhkan hiilipitoisuus vaikuttaa sen hyödynnettävyyteen. Jos palamattoman hiilen osuus tuhkassa nousee liian korkeaksi, sitä ei voi hyödyntää, vaan se täytyy sijoittaa kaatopaikalle.

Raportoinnissa seurattavia suureita ovat: CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> ja hiukkaspäästöt (suorat ja välilliset), polttoaineiden kulutukset (fossiiliset, uusiutuvat), osaprosessien energia- ja materiaalihyötysuhteet (konversiotehokkuus, omakäyttötehon kulutus, savukaasujen puhdistuksessa käytettyjen kemikaalien kulutus) sekä laitoksen toimintatila (teho, käyntitiedot, polttoaineseoksen koostumus). Raja-arvovalvonnan alaisista suureista lasketaan tunti-, vuorokausi ja kuukausikeskiarvot ja niitä verrataan raja-arvoihin viranomaisraportointia varten. Reaaliaikaisen seurannan etuna on, että se pystyy seuraamaan keskiarvojen muodostumista ja ohjeistamaan käyttöhenkilökuntaa miten laitosta tulee ajaa lähitulevaisuudessa, jotta tuntitaso, päivätason ja kuukausitason arvot pysyvät sallittujen rajojen puitteissa. Haluttaessa tämän tiedon voi kytkeä suoraan NO<sub>x</sub> ja SO<sub>x</sub> vähennysprosessien säätöjen asetusarvoihin, jolloin automaatio pitää huolen siitä, että pysytään sallituissa toimintarajoissa.

## 4 MONITOROINNIN HYÖDYNTÄMINEN

Voimalaitoksen ympäristötehokkuuden monitorointia voi hyödyntää monella eri tavalla prosessien, ajotapojen ja toimintastrategioiden kehittämisessä sekä viranomaisvalvontaan liittyvien velvoitteiden täyttämässä. Ympäristötehokkuuden monitorointi tuottaa havainnollista tietoa laitoksen toiminnan suorista ja välillisistä ympäristövaikutuksista. Esimerkiksi Salmisaaren laitoksen tapauksessa, missä on äskettäin käynnistynyt kivihiihen ja puupellettien seospolttokokeilu, monitoroinnilla voidaan konkreettisesti seurata seospolton vaikutuksia laitoksen toiminnan tehokkuuteen ja päästöihin.

Kivihiihen osittaisella korvaamisella uusiutuvalla puupelletillä on monenlaisia vaikutuksia laitoksen toimintaan ja siitä aiheutuviin ympäristövaikutuksiin. Ensisijainen tavoite on tietenkin laitoksen CO<sub>2</sub> päästöjen pienentäminen. Kuinka suuri nettovaikutus pellettien käytöllä saavutetaan, on kuitenkin monen muuttujan summa. Arvioitaessa laskennallisesti CO<sub>2</sub> päästöjen muutosta korvattaessa fossiilista polttoainetta biopohjaisella polttoaineella, merkittävässä roolissa on ns. korvaavuuskerroin (displacement factor). Korvattaessa sähköntuotannossa hiiltä biomassalla (hakkeella) korvaavuuskertoimenä käytetään yleisesti arvoa 0,6 [Schlamadinger & Marland], eli yksi kilo hakkeeseen sitoutunutta hiiltä (C) korvaa 0,6 kg kivihiiheen sitoutunutta hiiltä. Korvauskertoimen arvo on määritelty sillä perusteella, että puun hiilipitoisuus tuotettua energiayksikköä kohden [C/J] on suurempi kuin kivihiihellä ja sen lisäksi biomassan polton hyötysuhde on arvioitu kivihiihen polttoa huomommaksi mm. suurempien savukaasuhäviöiden, pienemmän laitokseen ja tehottomamman polttotekniikan johdosta. Moderneissa CHP laitoksissa ja seospoltossa oletus huomommasta polton hyötysuhteesta ei välttämättä pidä paikkaansa, joten elinkaarilaskelmissa käytetty korvaavuuskerroin ei ehkä olekaan oikea, vaan käytännössä korvaavuuskerroin on jotain muuta. Esitetystä monitorointimenetelmässä ei käytetä korvaavuuskertoimia, vaan tulokset perustuvat mitattuun toimintaan, jolloin tulokset kuvaavat toiminnasta aiheutuvia todellisia päästöjä.

Pellettien käytön vaikutukseen CO<sub>2</sub>:n kokonaispäästöihin liittyy pellettien tuotannosta ja kuljetuksesta aiheutuvat välilliset päästöt. Mikäli pellettien tuotannossa esim. puun kuivaus ja pelletöinnissä käytettävä höyry tuotetaan fossiilisella energialla, on sillä suuri merkitys koko toiminnan hiilitaseeseen. Myös puun ja pellettien kuljetuksessa käytettävän fossiilisen energian merkitys kasvaa etäisyyksien kasvaessa. Kuvan 1 esimerkissä pellettien kuljetuksesta aiheutuvien päästöjen osuus kokonaispäästöistä oli häviävän pieni (kuljetusetäisyys n. 100 km) mutta pellettien valmistuksesta aiheutuneet päästöt olivat jo merkitykselliset. Näin siitä huolimatta että esimerkissä oletettiin puuaineksen olevan valmiiksi kuivattua sahanpurua, eli pelletöitävän puun keruuta, kuljetusta eikä kuivausta ole huomioita laskelmissa. Ympäristötehokkaaseen toimintaan tähdätessä tuleekin kiinnittää erityisen suurta huomiota polttoaineen hankintaan, eli missä ja miten se on tuotettu. Tämäkin asia selviää monitoroinnin avulla.

Erialaisten polttoaineiden käytöllä on vaikutus myös kattilaprosessin toimintaan ja sitä kautta toiminnan aiheuttamiin ympäristövaikutuksiin. Eri toimintastrategioiden ympäristövaikutusten arviointi ilman esitetynkal-

taista monitorointijärjestelmää ei ole mahdollista. Polttoaineiden ominaisuudet vaikuttavat polttoaineen käsittelytarpeeseen, suorien päästöjen muodostumiseen, palamisprosessin toimintaan sekä prosessissa syntyvien jätteiden määrään ja laatuun. Näillä puolestaan on vaikutuksia mm. laitoksen omakäyttötehon tarpeeseen ja savukaasujen puhdistusprosessien toimintaan. Periaatteessa ympäristöystävällisemmän polttoaineen käyttö voi johtaa laitoksen toiminnan nettohyötysuhteen putoamiseen niin, että odotettuja päästövähennyksiä ei käytännössä saavutetakaan kasvaneen primäärienergian kulutuksen johdosta. Esimerkiksi kivihiilen korvaaminen puupelleteillä lisää savukaasujen kosteutta ja palamisprosessin kautta syntyneen savukaasun määrää, mutta toisaalta biomassan käyttö vähentää palamisilman tarvetta jolloin ilman mukana tulevan typen määrä vähenee pienentäen savukaasumäärää. Savukaasun määrän ja koostumuksen muutokset vaikuttavat tarvittaviin puhallinteihin sekä mahdollisesti rikin- ja typenpoistoprosessien toimintaan. Pellettien käyttö pienentää savukaasujen rikkipitoisuutta ennen puhdistusta, mutta toisaalta mahdollisesti kasvanut savukaasumäärä lisää puhdistusprosessin kuormaa. Lopulliset vaikutukset selviävät vasta käyttökokemusten kertymisen myötä, ja tähän tarvitaan luotettavaa monitorointia.

## 5 YHTEENVETO

Reaaliaikainen ympäristövaikutusten monitorointi tuottaa arvokasta tietoa prosessien toiminnasta ja erilaisten toimintavaihtoehtojen todellisista vaikutuksista. Järjestelmän tuottaman tiedon perusteella on mahdollista verrata eri toimintatapojen vaikutuksia laitoksen toimintaan. Järjestelmä ottaa huomioon sekä prosessin toiminnasta aiheutuvat suorat päästöt että polttoaineiden valmistuksesta ja kuljetuksesta aiheutuvat välilliset päästöt. Reaaliaikainen monitorointi mahdollistaa myös prosessin toiminnan optimoinnin ohjaamalla savukaasujen puhdistusprosesseja (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>) niin, että tunti- vuorokausi- ja kuukausijaksoille määritetyt päästöraajat eivät ylity. Järjestelmä on testausvaiheessa ja sen toimintaa tullaan seuraamaan keväällä 2015 Salmisaaren voimalaitoksella. Hanke on osa TEKESin rahoittamaa ja Cleen Oy:n koordinoimaa MMEA tutkimushanketta.

## 6 LÄHTEET

- Ecoinvent 2011. Ecoinvent database v.2.2, Swiss Centre for life cycle inventories. 2011 [WWW Document], [www.ecoinvent.ch](http://www.ecoinvent.ch).
- European Commission, 2010. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control).
- European Commission, 2012a. Monitoring and Reporting Regulation No 601/2012: Commission Regulation on the monitoring and reporting of greenhouse gas emissions pursuant to Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council
- European Commission, 2012b. Accreditation and Validation Regulation: Commission Regulation No. 600/2012 of 21 June 2012 on the verification of greenhouse gas emission reports and tonne-kilometre reports and the accreditation of verifiers pursuant to Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council.
- European Commission, 2012c. The Monitoring and Reporting Regulation – Guidance on Uncertainty Assessment. European Commission. Guidance document No. 4 MRR Guidance document No. 4, Final Version of 5 October 2012.
- Huhtinen M., Kettunen A., Nurminen P., Pakkanen H.: Höyrykattilatekniikka. Edita Oy. ISBN 951-37- 3360-2, Helsinki 2004.
- Huovinen M., Laukkanen V., Korpela T.: On-line data reconciliation as a tool to improve the environmental efficiency assessment in power plant environment. Proceedings of the 8<sup>th</sup> IFAC Symposium on Power Plant & Power System Control. Toulouse 2 – 5. 8. 2013.
- IndMeas, Savukaasun määramittaus. [WWW Document], [www.indmeas.com/300](http://www.indmeas.com/300)
- Judl J., Koskela S., Korpela T., Karvosenoja N., Häyrinen A., Rantsi J. Net environmental impacts of low-share wood pellet co-combustion in an existing coal-fired CHP (combined heat and power) production in Helsinki, Finland. *Energy* **77** (2014), pp. 844 – 851
- Karvosenoja N, Tainio M, Kupiainen K, Tuomisto JT, Kukkonen J, Johansson M. Evaluation of the emissions and uncertainties of PM2.5 originated from vehicular traffic and domestic wood combustion in Finland. *BOREAL Environ Res* 2008;13:465e74.
- Korpela T., Björkqvist T., Majanne Y., Lautala P.: Online Monitoring of Flue Gas Emissions in Power Plants Having Multiple Fuels. Proceedings of the 19th World Congress of the International Federation of Automatic Control Cape Town, South Africa. 24-29 August 2014
- Laukkanen V.: Mittauslaadun valvonta yleistyy. *Automaatioväylä* 3, 2014.
- PRé 2011. SimaPro. LCA software. PRé International; 2011.
- Schlamadinger & Marland: The Role of Forest and Bioenergy Strategies in the Global Carbon Cycle. *Biomass and Bioenergy* Vol. 10, Nos 5/6, pp. 275-300. 1996
- VTT. LIPASTO. 2012 [WWW Document], <http://lipasto.vtt.fi/>