

Savukaasun NO_x-päästöjen epäsuora monitorointi maakaasukäyttöisissä polttolaitoksissa

Timo Korpela¹, Pekka Kumpulainen, Yrjö Majanne
Tampereen teknillinen yliopisto, Systeemiteknikan laitos, PL 692, 33101 Tampere
¹ Puh. 040 849 0063, S-posti: timo.korpela@tut.fi

Anna Häyrinen
Helen Oy, 00090 Helen. Puh. 040 56 34225, anna.hayrinen@helen.fi

AVAINSANAT mallinnus, estimointi, päästöt, maakaasu

TIIVISTELMÄ

Tämän työn tavoitteena oli kehittää matemaattinen malli, jolla voidaan estimoida kaasukäyttöisten huippukuormalaitosten NO_x-päästöjä prosessista mitattujen sekundääristen suureiden avulla. Kiinnostus NO_x-estimoinnille nousi esiin EU:n teollisuuspäästädirektiivin (IED) uusien monitorointivelvoitteiden myötä, jotka astuvat voimaan vanhoilla kattiloilla vuoden 2016 alusta. Kiristyneiden päästövaatimusten lisäksi uutta on myös ns. piippusääntö, joka tuo IE-direktiivin piiriin uusia alle 50 MW energiantuotantoyksiköitä.

NO_x-estimoinnin esimerkkiprosessi oli Helsingin Energian Patolan lämpökeskus, jossa on kuusi 43 MW kuuma-vesikattilaa muodostaen yhteensä 258 MW polttoainetehokapasiteetin. Kattiloista kolme on kaasu-/öljy- ja kolme öljykäyttöisiä. Kattiloiden savukaasut ohjataan yhteen piippuun, joten kapasiteettien yhteenlaskusäännön mukaan kattilat kuuluvat jatkossa IE-direktiivin piiriin. Patolan voimalaitos toimii Helsingin kaukolämpöverkon tukiasemana ja huippukuormalaitoksena.

Tutkimushankkeen osana Patolassa tehtiin koeajoja käyttäen polttoaineena maakaasua. Kokeiden tarkoituksena oli selvittää eri prosessisuureiden vaikutukset syntyneisiin NO_x päästöihin. Mittausten pohjalta laadittiin päästöjä ennustava malli ja tutkittiin sen tarkkuutta ja herkkyyttä eri muuttujien suhteen. Lisäksi tutkittiin miten mallin identifiointi ja validointi voidaan toteuttaa mahdollisimman kustannustehokkailla mittausjaksoilla. Tulosten perusteella testikattilalla voidaan päästä alle IED:n edellyttämän NO_x-päästörajan nykyisellä laitteistorakenteella, erityisesti alhaisilla teho- ja jäännöshappitasoilla. Koeajodatojen perusteella identifiointiin lineaarisia ja epälineaarisia malleja (lineaarinen regressio ja MLP-neuroverkko) eri tavoin valituilla datajoukoilla. Tulosten perusteella lineaariset ja epälineaariset mallit antavat käytännössä samanlaiset estimointivirheet. Analyysin perusteella validointidatan maksimivirhe oli alle 4 % ja keskimääräinen (RMSE) alle 3 % käytettäessä kahden muuttujan lineaarista regressiomallia.

1 JOHDANTO

Ihmisen ja ympäristön ja suojeleminen päästöiltä nähdään nykyään yhä tärkeämmäksi. Ilmansaasteiden keskeisiä lähteitä ovat erilaiset poltto prosessit, joista vapautuu merkittävimpinä päästöinä rikkioksideja (SO_x), hiukkasia, hiilimonoksidia, palamattomia hiilivetyjä ja typen oksideita (NO_x). NO_x-päästöt aiheuttavat terveysvaikutusten lisäksi ympäristöhaittoja, joita ovat mm. savusumu, happosade, alailmakehän otsoni ja otsonikato /6/.

Koska energiantuotanto on merkittävä päästölähde, ovat viranomaiset määränneet voimalaitoksille yhä kiristyviä päästörajoja ja monitorointivelvoitteita. Euroopan Unionissa savukaasupäästöjä, esim. SO_x-, NO_x- ja hiukkaspäästöjä, rajoittavat mm. suurten polttolaitosten direktiivi (LCP) /2/, ympäristön pilaantumisen ja ehkäisemisen direktiivi (IPCC) /3/ ja niiden korvaaja teollisuuden päästädirektiivi (Industrial Emission Directive, IED; 2010/75/EU) /4/. Teollisuuspäästädirektiivi hyväksyttiin vuonna 2010, ja se astui voimaan vuonna 2013 uusille ja vuonna 2016 olemassa oleville polttolaitoksille. IE-direktiivin keskeisinä tavoitteina on ympäristönsuojelun tason kustannustehokas parantaminen ja uusien teknisten ratkaisujen synnyn edistäminen.

IED koskee polttoaineteholtaan yli 50 MW_{pa} polttolaitoksia. Jos kahden tai useamman erillisen energiantuotantoyksikön (=kattilan) savukaasut poistetaan yhteisen piipun kautta, pidetään tällaisten laitosten yhdistelmää yhtenä polttolaitoksena ja niiden kapasiteetit summataan laskettaessa nimellistä kokonaislämpötehoa. Laskennassa huomioidaan kaikki yli 15 MW_{pa} energiantuotantoyksiköt. Tämä ns. piippusääntö on uutta LCP:hen verrattuna ja

se tuo IED:n piiriin uusia alle 50 MW energiantuotantoyksiköitä, mm. kaukolämpöverkkojen huippu- ja varavoimalaitoksia, kuten tässä artikkelissa tarkasteltavan Patolan voimalaitoksen.

IE-direktiivin mukaiset kaasukäyttöisten polttolaitosten (ei koske kaasumoottoreita eikä kaasuturbiineita) NO_x - ja CO päästöraajat ovat 100 mg/Nm^3 . NO_x - arvot esitetään mitattuna NO_2 -pitoisuutena yksiköissä mg/Nm^3 , kun $T = 273,15 \text{ K}$, $p = 101,3 \text{ kPa}$, $\text{O}_2 = 3 \%$ ja $\text{H}_2\text{O} = 0 \%$. LCP-direktiivissä vastaavat päästöraajat ovat NO_x -päästöille 300 mg/Nm^3 (50–500 MW_{th}) ja 200 mg/Nm^3 (>500 MW_{th}). IED:n mukaan päästömittaustuloksen 95 prosentin luottamusvälin arvo ei saa ylittää seuraavia päästöjen raja-arvon prosenttiosuuksia: CO 10 %, SO_2 20 %, NO_x 20 % ja hiukkaset 30 %. Vahvistetut päivittäiset keskiarvot ja tuntikeskiarvot on määritettävä mitatuista vahvistetuista tuntikeskiarvoista sen jälkeen, kun niistä on vähennetty edellä mainittu luottamusvälin arvo.

IED:n mukainen päästöraja-arvo ei kuitenkaan astu välttämättä voimaan vuoden 2016 alusta, sillä Euroopan komissio hyväksyi 10.3.2014 IED:n 32:n artiklan mukaisen Suomen kansallisen siirtymäsuunnitelman, joka on voimassa 1.7.2020 asti ja joka käsittää Suomessa 73 polttolaitosta. Sen mukaisesti kansalliseen siirtymäsuunnitelmaan kuuluvien laitosten SO_2 -, NO_x - (sis. poikkeuksen) ja hiukkaspäästöjen enimmäismäärien (tonnia vuodessa) on vähennyttävä 2016–2019 lineaarisesti alittaen IED:n asettamat maksimipäästöraajat 2019. Siirtymäsuunnitelmassa mainittu päästövähennysvelvoite voi kohdistua yritysten tai yritysyhmiä koko tuotantokapasiteettiin, joten toisilla laitoksilla voi kompensoida toisten laitosten päästöjä. Siirtymäsuunnitelma mahdollistaa investointien jakautumisen usealle vuodelle, mutta lopputuloksena kaikki käytössä jatkavat laitokset siirtyvät uusien määräysten piiriin tietyistä poikkeuksista huolimatta viimeistään 2020-luvun alussa.

IE-direktiivi sisältää päästörajojen lisäksi myös päästöjen monitorointivelvoitteita. Savukaasujen SO_x -, NO_x - ja hiukkaspitoisuudet sekä CO-pitoisuus kaasua polttavissa laitoksissa on mitattava jatkuvasti kaikissa nimelliseltä kokonaislämpötehoaan vähintään 100 MW_{th} :n energiantuotantoyksiköissä. Muissa tapauksissa nämä pitoisuudet pitää mitata vähintään joka kuudes kuukausi, mutta laitoksia ei tarvitse käynnistää pelkästään päästömittausten takia. Lisäksi IED:n mukaan jatkuvasti on mitattava myös savukaasun happipitoisuutta, lämpötilaa, painetta ja tarvittaessa kosteuspitoisuutta.

IED:n mukaan toimivaltainen viranomainen voi päättää, että jatkuvia mittauksia ei edellytetä maakaasua käyttävistä laitoksista peräisin olevan SO_2 :n ja hiukkasten osalta. Lisäksi IED:n mukaan NO_x -päästöjen määrittäminen voidaan suorien mittausten sijaan todeta myös muilla toimivaltaisen viranomaisen todentamalla ja hyväksymillä mittauksilla. Näissä menetelmissä on käytettävä soveltuvia Euroopan standardointikomitean (CEN) standardeja tai sen puutteessa muita vastaavia standardeja, joilla varmistetaan vastaavan tieteellisen arvon omaavien tietojen toimittaminen. Tällä hetkellä ei ole voimassa NO_x :n epäsuoraan määrittämiseen soveltuvaa CEN- tai ISO-standardia. CEN standardi on kuitenkin valmisteilla CEN/TC 264/WG 37 Predictive Emission Monitoring systems (PEMS) –työryhmän toimesta, mutta standardin valmistumiseen kuluu oletettavasti useita vuosia.

IED:n jatkuva NO_x -monitorointivelvoite on siis voimassa vasta yli 100 MW kattiloilla, ja sitä pienemmillä kattiloilla riittää kuuden kuukauden välein suoritettava kertamittaus. IED:n piiriin liittyi piippusääntöön mukaan lukuisia kaukolämpöverkon huippukuorma- ja varavoimakattiloita, joiden käyttötunnit ovat alhaisia ja joissa erillisten päästömittausten suorittaminen osana normaalia toimintaa on käytännössä haastavaa. Sen vuoksi tässä projektissa selvitettiin NO_x -pitoisuuden epäsuoraa monitorointia ja siihen liittyviä näkökulmia, kuten NO_x -pitoisuuteen vaikuttavia muuttujia, estimoinnin onnistumista, tarvittavan mallinnus- ja validointidatan kattilakohtaisen tarpeen arviointia ja siten koeajojaksojen suunnittelua sekä olosuhteiden ja mittausten vaikutusten arviointia. Tämä artikkeli ottaa kantaa näistä ensimmäisiin, ja loput näkökulmat selviävät vuoden 2015 aikana.

2 NO_x -PÄÄSTÖJEN MUODOSTUMINEN MAAKAASUN POLTINPOLTOSSA

NO_x -päästöjen muodostumisessa tarvittava elementaarityyppi tulee poltossa joko polttoaineesta tai ilmasta. Poltossa muodostuvat tyypin oksidipäästöt syntyvät näistä tyypilähteistä neljän mekanismin kautta: 1) polttoaine- NO_x 2) terminen NO_x , 3) nopea NO_x ja 4) NO_x dityppioksidin kautta. Polton NO_x -päästön muodostumiseen vaikuttavat mm. polttolaitoksen rakenne, polttoaine, prosessin ajotapa sekä mahdolliset NO_x -päästöjen polttotekniset eli primääriset vähennystekniikat. Tarkasteltaessa tietyn kattilan NO_x -päästöjä ja sen epäsuoraa monitorointia kohdistuu päähuomio dominoivaan NO_x -muodostumismenetelmään. Maakaasukäyttöisissä kattiloissa nopean ja N_2O -mekanismin kautta tapahtuvan NO_x -muodostumisen vaikutus on n. 5 % kummallakin /5/. Maakaasun sisältämä tyyppi on pääasiassa elementaarimuodossa, joten se käyttäytyy poltossa ilmassa esiintyvän tyypin tavoin. Tämän vuoksi dominoiva muodostumismekanismi on terminen mekanismi. Termisen NO_x -muodostumismekanismin päämuuttujia ovat viipymäaika, lämpötila ja happirikkaat vyöhykkeet liekissä /7/. Dominoiva vaikutusmekanismi voi kuitenkin muuttua toimintapisteen mukaan, esim. ilmaylimäärän ja tehon mukaan. Sen vuoksi vaikuttavia parametreja pitää tarkastella koko prosessin toiminta-alueella.

3 KOEPROSESSI JA MITTAUSJÄRJESTELMÄ

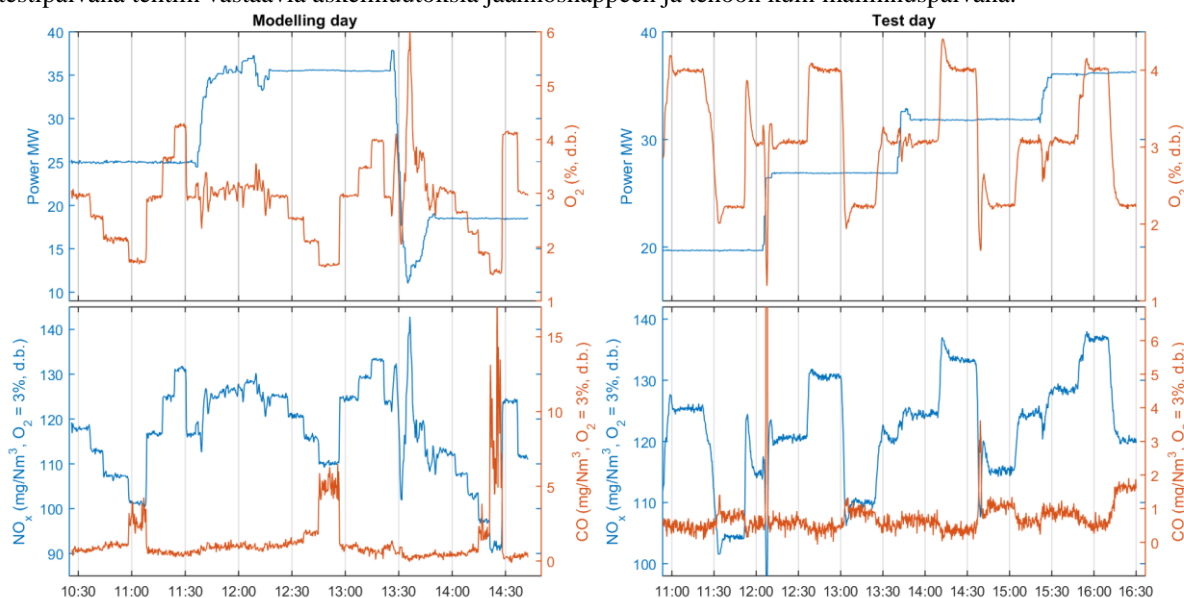
NO_x-estimoinnin esimerkkiprosessi oli Helsingin Energian Patolan voimalaitos, jossa on kuusi 43 MW kuuma-vesikattilaa muodostaen yhteensä 258 MW polttoainetehokapasiteetin. Kattiloista kolme on kaasu-/raskasöljy- ja kolme raskasöljykäyttöisiä. Kattiloiden savukaasut ohjataan yhteen piippuun. Patolan voimalaitos toimii Helsingin kaukolämpöverkon tukiasemana ja huippukuormalaitoksena. Laitosta hallitaan tyypillisesti etäyhteyden kautta Helenin Sähkötalon keskusvalvomosta. Laitosta operoidaan tyypillisesti siten, että yksittäisiä kattiloita käynnistetään tarpeen mukaan tukemaan kaukolämpöverkkoa. Vuosina 2001–2010 Patolan vuosittainen keskimääräinen käyttö on ollut yhteensä 1211 tuntia kaikille kattiloille (Kansallinen siirtymäsuunnitelma, Liite 1).

Kokeet suoritettiin Kattila 3:lla. Käytetty maakaasupoltin oli v. 2007 hankitun polttimen kehitysversio, jossa on parannettu erityisesti liekin pyörteilyä. Kokeissa käytetty maakaasu tuli Venäjältä maakaasuverkon kautta. Polttoainetoimittajan Gasumin mukaan maakaasussa on tyyppiä (N₂) alle 1 %. Mittausjärjestelmä koostui laitoksen omista mittauksista (polttoainevirtaus, savukaasun (kosteaa) jäännöshappipitoisuus, savukaasun lämpötila, kattilan syöttö- ja paluuveden lämpötilat, kattilahuoneen lämpötila, sekä tulipesän, ilmansyötön ja kattilahallin paineet) sekä erillisestä kannettavasta savukaasuanalysointilaitteesta (Horiba PG-350 SRM kannettava savukaasuanalysointilaitte, joka oli varustettu NO_x, SO₂, CO, CO₂ and O₂- mittauksilla sekä kaasun käsittely- ja näytteenottojärjestelmällä PSS-5, sekä mittapöydällä PSP4000-H). Datatallennus tapahtui prosessimittauksen osalta Siemensin automaatiojärjestelmään ja analysointilaitteen osalta erilliseen mittauslaitteeseen. Mittauksen näytteenottoväli oli 15 sekuntia.

4 KOEAJOT JA MALLIT

NO_x-mallinnusta varten suoritettiin Patolan lämpökeskuksessa kaksipäiväiset koeajot. Mallinnuspäivänä suoritettiin askelkoesarjoja mallin identifiointia varten (Kuvan 1a). Koeajo suoritettiin siten, että vakiopolttoainetehoilla (25 MW_{pa}, 35,5 MW_{pa} ja 18,5 MW_{pa}) kattilan säädöt asetettiin manuaalille kaukolämpötehon säätöpiiriä lukuun ottamatta, ja palamisilmapuhaltimen nopeus asetettiin manuaaliohjauksella sellaiseksi että haluttu jäännöshappi toteutui. Jokaisella kolmella vakioteholla toteutettiin ilmansyötön askelkoe, joka näkyy Kuvassa 1 muuttuneina O₂-, NO_x- ja CO-tasoina. Jatkossa esitetyt NO_x-mallit on opetettu pelkästään näiden kolmen vakio- ja koeajon datojen pohjalta. Tehotasojen muutokset toteutettiin laitoksen omalla automaatiolla tavanomaisina tehonmuutoksina, ja säätöpiirit kytkettiin jälleen manuaalille prosessin vakiinnuttua. Nämä tehonmuutostilanteet toimivat testidatana, jolloin voi arvioida mallin toimivuutta.

Testipäivänä suoritetuissa koeajoissa tehon ja jäännöshapen askelkoe toteutettiin säätöpiirien asetusarvo- ja koeajon muutoksilla säätöpiirin ollessa aktiivisena. Kuvassa 1b on esitetty testipäivän koeajojakso. Siitä käy ilmi, että testipäivänä tehtiin vastaavia askelmuutoksia jäännöshapen ja tehoon kuin mallinnuspäivänä.



Kuva 1. Ylemmissä kuvissa on esitetty polttoaineteho ja savukaasuanalysointilaitteella mitattu kuiva jäännöshappipitoisuus. Alemmissä kuvissa on esitetty mitatut NO_x- ja CO-pitoisuudet. Vasemmanpuoleiset kuvat liittyvät mallinnuspäivään (Kuva 1a) ja oikeanpuoleiset testipäivään (Kuva 1b).

Lisäksi toteutettiin koesarja kattilan menoveden lämpötilalle, mutta säädön aiheuttamat happi- ja tehovaihtelut estävät suorien johtopäätösten tekemisen datoista. Näiden muuttujien vaikutusten arviointi ei täysin onnistu suoritettujen kokeiden perusteella.

4.1 Lineaarisen mallin laatiminen ja verifiointi

NO_x -malli identifioitiin sekä lineaarisella regressiomallilla [1] että epälineaarilla neuroverkkomallilla. Lineaarinen regressiomalli on identifioitu mallinnuspäivän koeajon datasta käyttäen kolmea jaksoa, joissa polttoainetehto oli vakio: 25, 35 ja n. 18.5 MW. Mallinnusdata sisälsi yhteensä 743 näytettä. Mallinnuksen kohdesuurena oli IED:n määrittelyn mukainen NO_x -arvo yksikössä mg/Nm^3 ($O_2 = 3\%$, d.b.). Selittävinä suureina olivat prosessimittauksista happi (O_2 , % kosteasta savukaasusta) ja kaasumäärä kattilalle (\dot{V}_{pa} , Nm^3/s)

$$NO_{x,est} = 13.78 \cdot O_2 + 29.57 \cdot \dot{V}_{pa} + 66.6. \quad (1)$$

Estimaatin hyvyttä voidaan tarkastella vertaamalla absoluuttista ϵ_i ja suhteellista virhettä δ_i sekä RMSE- (Root Mean Squared Error) kokonaisvirhettä, jotka voidaan esittää seuraavilla yhtälöillä:

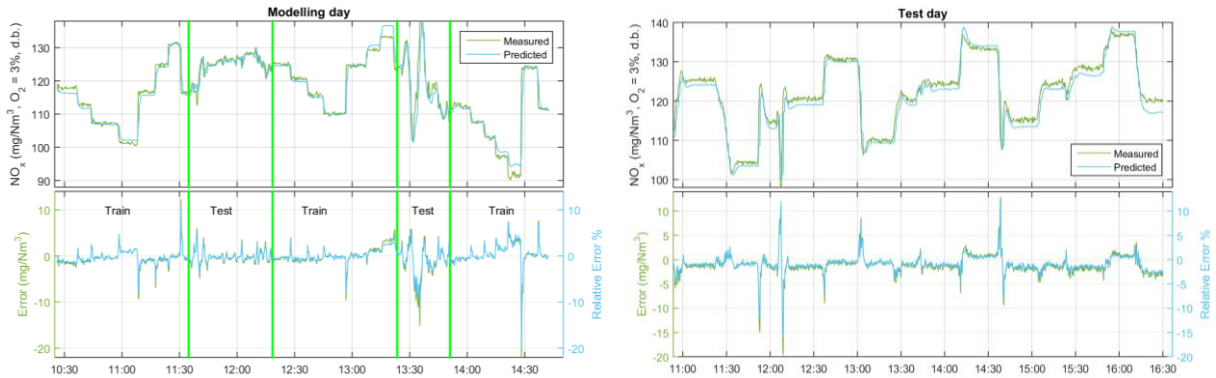
$$\epsilon_i [mg/Nm^3] = NO_{x,est,i} - NO_{x,meas,i} \quad (2)$$

$$\delta_i [\%] = 100 \cdot \epsilon_i / NO_{x,meas,i} \quad (3)$$

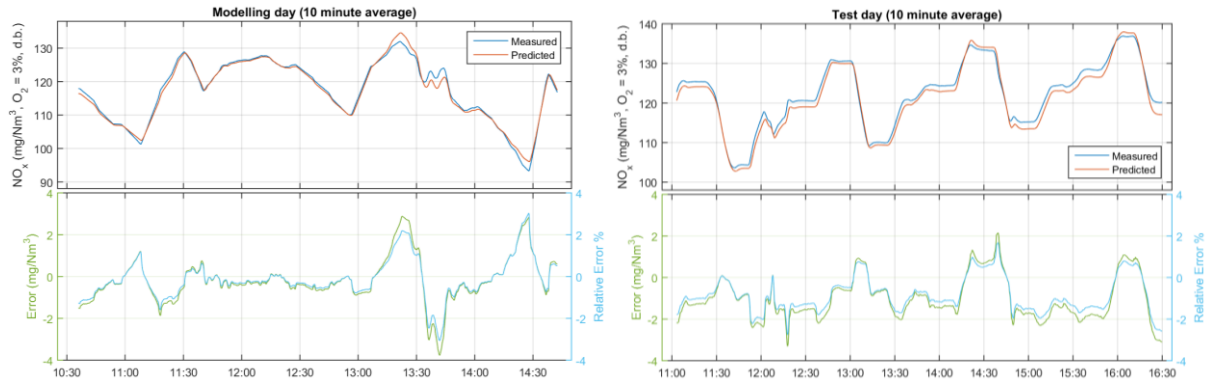
$$RMSE [mg/Nm^3] = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \epsilon_i^2}, \quad (4)$$

missä N tarkoittaa näytteiden lukumäärää.

Kuvassa 2 on esitetty kohdesuureen ja ennusteen lisäksi ennustevirhe absoluuttisena ja suhteellisenä mallinnus- (a) ja testipäivänä (b). Kuvista nähdään, että lineaarinen regressiomalli ennustaa savukaasujen NO_x -pitoisuuden silmämääräisesti kohtuullisen hyvin, myös testipäivänä jolloin prosessin ajotapa poikkesi mallinnuspäivästä. NO_x -estimaatissa on testipäivänä kuitenkin pieni mutta selvästi havaittava tasapainovirhe. Suurimmat ennustevirheet tapahtuvat molemmissa dataseiteissä kuitenkin nopeissa transientti- eli muutostilanteissa, joissa analysoijan ja prosessimittauksen erilaiset dynamiikat alkavat erottua. Kuvassa 3 on esitetty vastaavat mittausjaksot laskemalla hetkellisten mittausten ja estimaattien liukuva 10 minuutin keskiarvo. Kuvasta nähdään että tällä laskentatavalla ennustevirhe on mallinnuspäivänä alle 4 % ja testipäivänä alle 3 %. Absoluuttinen virhe vaihtelee nollan molemmilla puolilla, joten pitempi liukuva keskiarvo parantaisi tulosta entisestään. IED:n mukainen estimaatti lasketaan tuntikeskiarvoista, mutta niitä ei tässä laskettu datan vähäisestä määrästä johtuen. Oletettavasti niissä virheen maksimiarvot ovat Kuvan 3 virheitä pienemmät.



Kuva 2. Ylemmissä kuvissa on NO_x -mittaus ja Kaavan 1 mukainen NO_x -estimaatti. Alemmissä kuvissa on esitetty absoluuttiset (Kaava 2) ja suhteelliset (Kaava 3) mallinnusvirheet vastaavissa tilanteissa. Vasemmanpuoleiset kuvat liittyvät mallinnuspäivään (Kuva 1a) ja oikeanpuoleiset testipäivään (Kuva 1b).



Kuva 3. Kuvan 2 toteutus laskettuna 10 minuutin liukuvilla keskiarvoilla.

Koko mallinnuspäivän NO_x -estimaatin RMSE-virhe on 2.22 mg/Nm^3 . Mallinnuspäivän identifiointijaksojen ajalta RMSE-virhe on 2.03 mg/Nm^3 ja tehomuutoksissa tapahtuvissa testijaksoissa RMSE-virhe on 2.65 mg/Nm^3 . Testipäivän RMSE on sen sijaan 2.27 mg/Nm^3 , joten keskiarvojen perusteella mallinnusvirhe ei oleellisesti kasva päivästä ja ajotavasta toiseen. Testipäivänä ilmenevä tasapainovirhe kuitenkin indikoi että polttoainetehosta ja jäännöshapesta riippumaton ulkoinen muuttuja vaikuttaa ennusteeseen. Ilmatieteenlaitoksen Kumpulan mittaustietojen perusteella säätyyppi pysyi samana eri päivinä, joten se tuskin selittää hienoista muutosta. Uudet koeajojaksot antavat aiheesta toivottavasti lisätietoa.

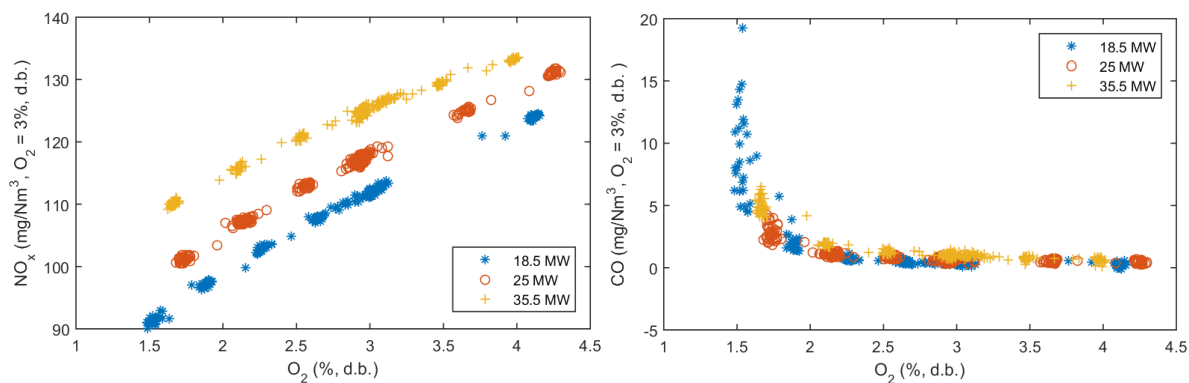
4.2 Epälineaarisen mallin laatiminen ja verifiointi

Edellisen osuuden koeajojaksojen dataa mallinnettiin myös epälineaarisilla neuroverkkomalleilla, sillä kirjallisuusselvityksen perusteella epälineaariset neuroverkkomallit dominoivat NO_x -estimoinnissa. Tässä työssä epälineaarisen mallina toimi MLP (multilayer perceptron), joka on esitetty mm. teoksessa (Haykin, 1994). MLP-malliin sisällytettiin kaksi neuronin piilokerrokseen ja yksi ulostulokerrokseen. Piilokerroksen aktivointifunktiona käytettiin hyperbolista tangenttifunktiota, ja ulostulokerroksessa käytettiin lineaarista aktivointifunktiota. Taulukossa 1 on esitetty NO_x -estimoinnin RMSE-virheet edellisen luvun lineaarisella mallilla ja epälineaarilla MLP-mallilla. Mallinnusdatalla epälineaarisen MLP-mallin RMSE-arvo oli ymmärrettävästi pienempi kuin lineaarisella mallilla, mutta testijaksoissa RMSE-tulokset olivat käytännössä samoja. Tämän vuoksi samaan suorituskäyttöön omaavaa yksinkertaista lineaarista mallia voidaan pitää epälineaarista parempana.

Taulukko 1. NO_x -estimoinnin RMSE-virheet

Malli	Mallinnuspäivän identifiointijakso	Mallinnuspäivän testijakso	Testipäivä
Lineaarinen	2.03	2.65	2.27
MLP	1.73	2.67	2.22

Taulukossa 1 esitetty lineaarisen ja epälineaarisen mallin vastaavat tulokset selittyvät osaltaan prosessin varsin johdonmukaisella käyttäytymisellä. Kuvassa 4a on esitetty NO_x -mittaus jäännöshapen funktiona eri tehotasoilla. Kuvassa on selvästi nähtävissä lähes ensimmäisen kertaluvun NO_x -vasteet jäännöshapen funktiona eri tehotasoilla. NO_x -vasteet eivät ole täysin suoria, sillä NO_x -pitoisuuden kasvu tasoittuu hieman ylemmillä jäännöshappitasoilla. Tästä huolimatta lineaarinen malli kuvaa hyvin prosessin käyttäytymistä näiden muuttujien suhteen jäännöshapen tyypillisellä vaihteluvälillä 1,5–2,5 % (d.b.). Kuvasta 4a nähdään myös, että kattila alittaa IED:n 100 mg/Nm^3 NO_x -päästörajan kun huomioi 20 % vähennyksen. Rajan 120 mg/Nm^3 alitus toteutuu erityisesti alhaisilla teho- ja jäännöshappitasoilla. Lisäksi Kuva 5a myös osoittaa, että NO_x päästöjä voidaan vähentää jäännöshapen määrää pienentämällä. Kuvassa 5b kuvattu vastaava CO-käyrä, joka kuitenkin osoittaa että häkäpäästöt alkavat kasvaa jäännöshapen laskiessa. Tämän vuoksi polton toimintapiste eri tehotasoille pitää asettaa mm. huomioiden hyötysuhde, NO_x - ja CO-pitoisuudet sekä robustisuus häiriöille.



Kuva 4. Vasemmalla (a) NO_x-mittaus ja oikealla (b) CO-mittaus jäännöshapen funktiona kolmella eri teho-
tasolla.

5 YHTEENVETO

Tässä artikkelissa tarkastellaan NO_x-päästöjen epäsuoraa monitorointia maakaasukäyttöisissä huippukuormalaitoksissa hyödyntäen olemassa olevia prosessimittauksia. Asian selvittämiseksi suoritettiin Patolan lämpökeskuksessa kaksipäiväiset koeajot, joissa suoritettiin erilaisia askelkoesarjoja keskeisiin prosessisuureisiin, joita ovat polttoaineteho, savukaasun jäännöshappipitoisuus sekä kattilaveden lämpötila. Tulosten perusteella Patolassa voidaan päästä alle IED:n edellyttämän NO_x-päästörajan nykyisellä laitteistorakenteella, erityisesti alhaisilla teho- ja jäännöshappitasolla. Koeajodatojen perusteella identifioitiin lineaarisia ja epälineaarisia malleja eri tavoin valituilla datajoukoilla. Alustavien tulosten perusteella lineaariset ja epälineaariset mallit antavat käytännössä samanlaiset estimointivirheet. Analyysin perusteella validointidatan maksimivirhe 10 minuutin liukuvalla kesiarvolla oli alle 4 % ja keskimääräinen virhe (RMSE) alle 3 % käytettäessä kahden muuttujan lineaarista regressiomallia. Tulokset täsmenevät uusilla koeajoilla, joissa arvioidaan olosuhteiden vaikutusta NO_x-estimaattiin sekä eri poltinten vaikutuksia.

IED mahdollistaa periaatteessa epäsuoran monitorointitavan, joten aika näyttää hyväksytäänkö se viralliseksi NO_x-päästöjen monitorointitavaksi. Jos estimoinnin tulokset voidaan arvioida luotettaviksi tyypillisissä kattilan ajotilanteissa, tarjoaa estimaatti paremman arvion syntyneistä NO_x-päästöistä kahdesti vuodessa suoritettaviin erillismittauksiin nähden. Siten estimaatti parhaillaan täydentää erillismittausten informaationsisältöä ja antaa myös mahdollisuuden NO_x-päästöjen vaikutuksen huomioimiseen kattilan normaalissa toiminnassa.

6 KIITOKSET

Tämä työ tehtiin osana CLEEN:in MMEA (Measurement, Monitoring and Environmental Assessment) –ohjelmaa yhdessä Helen Oy:n kanssa. Projektin päärahoittajana olivat Tekes ja Helen. Kirjoittajat haluavat kiittää lämpimästi projektin rahoittajia ja yhteistyökumppaneita sekä Patolan lämpökeskuksen henkilökuntaa.

7 VIITTAUKSET

- /1/ Draper NR, Smith H. Applied regression analysis. 3. ed. ed. New York: Wiley, 1998.
- /2/ European Commission. Large Combustion Plants Directive (2001/80/EC). 2001.
- /3/ European Commission. Integrated Pollution Prevention and Control (96/61/EC). 1996.
- /4/ European Union. Industrial Emissions Directive (2010/75/EU). 2010.
- /5/ Haykin S. Neural networks: a comprehensive foundation. New York: Macmillan College Publishing Company, 1994.
- /6/ Kilpinen P. Typen oksidien muodostaminen ja hajoaminen. In: Raiko R, Saastamoinen J, Hupa M, Kurki-Suonio I, editors. Poltto ja palaminen, Helsinki: IFRF - Suomen kansallinen osasto; 2002, p. 300-342.
- /7/ Skalska K, Miller JS, Ledakowicz S. Trends in NO_x abatement: A review. Sci Total Environ 2010;408:3976-89.
- /8/ Turns SR. An introduction to combustion: concepts and applications. 2nd ed. Boston: McGraw-Hill, 2000.