

SÄÄTÖTEKNIIKAN LABORATORIO

LD-KG-konvertterin lämpötilamalli

Jari Ruuska ja Kauko Leiviskä

Raportti B No 34, Toukokuu 2001

LD-KG-konvertterin lämpötilamalli

Jari Ruuska ja Kauko Leiviskä

Oulun yliopisto, Säätötekniikan laboratorio

Tiivistelmä: Osaprojekti "LD-KG-konvertterin dynaaminen ohjaus" on osa Oulun yliopiston ja teknillisen korkeakoulun teräskonvertteriprosessin kehittämistä käsittelevää tutkimusprojektia. Oulun yliopiston säätötekniikan laboratorion osuudessa teollisena yhteistyökumppanina on toiminut Rautaruukki Steel, jonka prosessiin tutkimus on keskittynyt. Tutkittavana ongelmana on ollut konvertterin loppupuhalluksen lämpötilahallinta pudotussondia hyödyntäen sekä lisäaineiden vaikutus loppupuhalluksessa.

Rautaruukki Steelillä on otettu käyttöön pudotussondilaitteisto, jonka avulla terässulan lämpötila voidaan mitata sulatuksen aikana. Mallin tulisi ennustaa lämpötilan kehitys pudotussondin jälkeen tiettyjen panosparametrien avulla, esimerkiksi panoskoko ja konvertteri, jolla sulatus tehdään. Pudotussondin pudotuksen jälkeen hiilimalli, jota kehitetään Rautaruukki Steelin toimesta, ilmoittaa tarvittavan puhallusajan, jonka perusteella lämpötilamalli laskee, saavutetaanko tavoitelämpötila ilman lisäainelisäystä. Mikäli sitä ei saavuteta, mallin tulee ilmoittaa tarvittavan lisäaineen laji ja määrä.

Tässä raportissa esitetyt lämpötilamallit on kehitetty data-analyysin avulla hyödyntäen Rautaruukki Steeliltä saatua mittaustietoa. Lisäksi on käytetty Rautaruukki Steelin henkilökunnan asiantuntemusta ja kirjallisuutta. Lisäaineiden vaikutus tullaan raportoimaan myöhemmin; tämän raportin yhteydessä on esitetty ainoastaan asiaan liittyvää pohdintaa.

Hakusanat: LD-KG-konvertteri, dynaaminen ohjaus, lämpötilamalli, pudotussondi

ISBN 951-42-6411-8
ISSN 1238-9404
ISBN 951-42-7539-X (PDF)

YLIOPISTO

Oulun yliopisto
Säätötekniikan laboratorio
PL 4300
FIN-90014 OULUN

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	1
2	PROSESSI- JA JÄRJESTELMÄKUVAUS	2
2.1	Konvertteri	2
2.1.1	Raaka-aineet	2
2.1.2	Tuotteet	2
2.1.3	Lisäaineet	3
2.2	Pudotussondi	3
2.3	Uniformance-tietojärjestelmä	4
3	DATANKERUU	5
4	HIILI- JA LÄMPÖTILAMALLIN YHTEISTOIMINTA	6
5	LÄMPÖTILAMALLI	7
6	LISÄAINEIDEN VAIKUTUS	19
7	YHTEENVETO JA JATKOTUTKIMUKSET	22
	LÄHDELUETTELO	23

1 JOHDANTO

Projektin, teräskonvertteriprosessien laskennallinen ja kokeellinen mallintaminen ja ohjausjärjestelmien kehittäminen (KONVERTO), tavoite on konvertteriprosessien läpimenoaikojen lyhentäminen, tuotantonopeuden nosto, joustavat lajinvaihdot sekä laadun parantaminen ja romutusten eliminointi.

Lisäksi yleistavoitteena on päästä konvertteriprosessien tietämyksessä kansainväliselle huipulle ja kehittää tehokkaat työkalut konvertteriprosessin prosessianalyysiin, staattisten ja dynaamisten prosessinohjausjärjestelmien kehittämiseen ja testaukseen sekä operaattorien koulutukseen.

Konverttereiden ohjaus perustuu yleensä erilaisiin staattisiin ja dynaamisiin malleihin. Panos-, lämpötila- ja lisäainemallien avulla lasketaan konvertteriin panostettavat ainemäärät ja puhallettavan hapen määrä siten, että oikea kaatolämpötila saavutetaan ilman lisäpuhallusta tai ylimääräistä jäädytysainelisäystä. Kaatolämpötilan tavoite määritellään erillisellä mallilla, joka ottaa huomioon kaikki prosessivaiheet konvertterilta jatkuvavaluun. Mallit perustuvat tarkkaan tietoon lähtöaineiden määrästä ja laadusta ja toimivat parhaiten silloin, kun perättäiset sulatukset toistuvat mahdollisimman samanlaisina. Etenkin romun määrän ja laadun arviointi on hankalaa ja vaikuttaa mallien käyttökelpoisuuteen. Muita virhelähteitä ovat mikserikuonan määrä sekä erilaiset pöly- ja roiskehäviöt. Em. tekijöistä johtuen malleja ja/tai niiden laskemia tuloksia joudutaan usein korjaamaan.

Osaprojektissa ”LD-KG-konvertterin dynaaminen ohjaus” on tavoitteena konvertterin dynaamisen säädön kehittäminen sekä mittaus- ja säätöosaamisen kasvattaminen. Projektin tuloksena saadut tulokset testataan Rautaruukki Steelin LD-KG-konverttereilla. Alkuvaiheessa on tehty selvitys konvertteriprosessissa käytettävistä ja potentiaalisista mittausmenetelmistä sekä malleista sekä tutustuttu aiheeseen liittyvään kirjallisuuteen ja Rautaruukki Steelille tehtyihin diplomitöihin. Jatkotutkimuksen kohteeksi valittiin lämpötilamalli ja lisäaineiden vaikutus pudotussondin pudotuksen jälkeen.

Tässä raportissa esitetyt lämpötilamallit on kehitetty data-analyysin avulla käyttäen hyödyksi Rautaruukki Steeliltä saatua mittaustietoa. Lisäksi on käytetty Rautaruukki Steelin henkilökunnan asiantuntemusta ja kirjallisuutta. Lisäaineiden vaikutus tullaan raportoimaan myöhemmin; tämän raportin yhteydessä on esitetty ainoastaan asiaan liittyvää pohdintaa.

2 PROSESSI- JA JÄRJESTELMÄKUVAUS

2.1 Konvertteri /1, s.2/

Konvertteri on raakateräksen valmistukseen käytettävä, tulenkestävällä materiaalilla vuorattu reaktori, jonka tarkoituksena on saada korkeahiilisestä (yli 4%) raakaraudasta matalahiilistä (noin 0.05%) raakaterästä. Perinteisen jaottelun mukaan raaka- tai valuraudoista puhutaan hiilipitoisuuden ollessa yli 1.7% ja hiilipitoisuuden ollessa tätä matalampi puhutaan puolestaan teräksistä. Hiilipitoisuuden alentamisen lisäksi muita konvertterille asetettavia tavoitteita ovat mm. lämpötilan kohottaminen riittävän suureksi, jotta teräs pysyisi sulana konvertteria seuraavien jatkokäsittelyjen ajan, fosfori- ja rikki- pitoisuuksien alentaminen halutulle tasolle, panostettavan romun sulattaminen sekä matalien vety- ja typpipitoisuuksien ja korkean tuotantonopeuden saavuttaminen.

Kuvassa 1 on esitetty yhdistelmäpuhalluskonvertterin periaatekuva.



Kuva 1. Yhdistelmäpuhalluskonvertteri /2/.

2.1.1 Raaka-aineet /1, s. 3 - 7/

Konvertteriin panostettavia raaka-aineita ovat masuunilta rikinpoiston ja mikseroiden kautta tuleva raakarauda, hiilen mellotukseen tarvittava lanssin kautta puhallettava happi, panoksen jäädyttämiseen käytettävä romu sekä erilaiset kuonanmuodostajat ja fluksit, joiden avulla kuonan koostumus saadaan halutunlaisiksi. Lisäksi pohjan kautta sulaan puhalletaan inerttiä kaasua (yleensä argonia) sekoituksen parantamiseksi.

2.1.2 Tuotteet /1, s. 7 - 8/

Ensisijaisen tuotteen, raakateräksen (engl. crude steel), lisäksi konvertterista saadaan konvertterikuonaa sekä -kaasua. Ympäristönsuojelullisten ja kierrätyksellisten tekijöiden arvon noustessa näillekin pyritään etsimään hyödyllisiä käyttökohteita, jolloin prosessista ei kehitykään jätettä, vaan sivutuotteita.

2.1.3 Lisäaineet /3/

Konvertterin lämpötaseeseen voidaan vaikuttaa lisäainelisäyksillä. Lisäaineilla voidaan korjata terässulan loppulämpötilaa myös puhalluksen aikana.

Raahessa sulatuksen lopun lämpötilanhallintaan käytetään ferropiitä ja sintteriä, joiden lisäksi on käytössä pikasiilot. Pikasiilosta annosteltaessa saadaan tonni lisäainetta panostettua konvertteriin alle 40 sekunnissa.

Haluttaessa nostaa panoksen lämpötilaa puhalluksen lopussa lisätään konvertteriin ferropiitä. Ferropii koostuu pääosin piistä ja raudasta. Ferropiin lämpösisältö riippuu pääosin sen piipitoisuudesta.

Sulatuksen loppupuolella 1600°C:n lämpötilassa lisätty 100 kg:a ferropiitä tuottaa energiaa 2206 MJ. Teoriassa tämä nostaisi 120 tonnin teräspanoksen lämpötilaa 25°C. Käytännössä osa lämmöstä kuitenkin kuluu myös kuonan lämmittämiseen ja lämpöhäviöihin. Ferropiin hapettamiseen tarvitaan happea.

Terässulan jäädyttämiseksi voidaan konvertteriin lisätä sintteriä. Sintterin mukana konvertteriin tulee myös happea. Sintteri koostuu Raahessa pääosin rautaoksideoista. Teoriassa 200 kg:n sintterilisäys jäädyttää 120 tonnia terästä 12.5°C:ta. Laineen DI-työssä sintterilisäykselle mainitaan kokeellinen arvo -0.04°C/kg, joka on määritetty muutamien sintterilisäysslulatusten perusteella. Näin ollen 200 kg:n sintterilisäys puhalluksen lopussa laskisi 120 tonnin terässulan lämpötilaa noin 8°C.

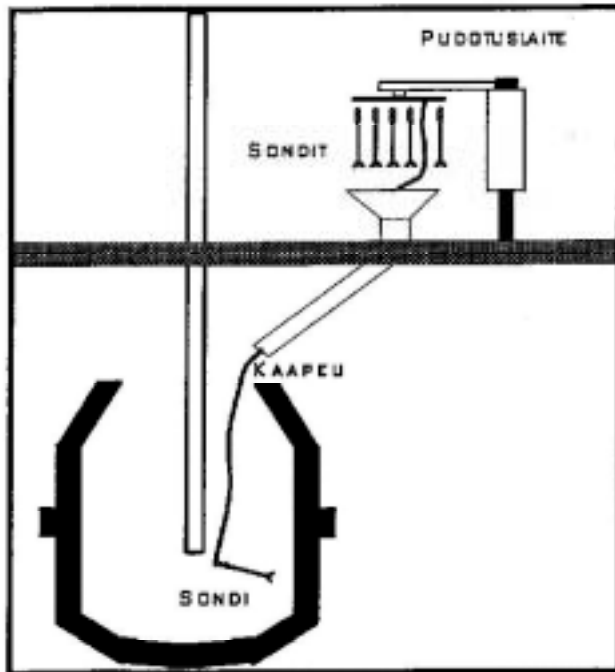
2.2 Pudotussondi /3/

Pudotussondi on toimintaperiaatteeltaan normaali termoelementtiin perustuva lämpötilan mittaussuunnitelma. Pudotussondi koostuu termoelementistä, sondin ulkokuoresta, kuonahatusta, kaapelista ja kosketinosasta. Pudotussondien avulla voidaan mitata sulan lämpötila puhallusta keskeyttämättä. Puhalluksen aikana pudotettavien sondien avulla yhdessä lämpötilannousumallin kanssa puhallus voidaan lopettaa tavoitelämpötilassa. Käytön onnistumiseksi on tärkeää oikea pudotusajankohta, sopiva lämpötilannousumalli ja sopiva kuonan koostumus. Puhalluksen aikainen lämpötilamittaus suoritetaan n. 2 min ennen puhalluksen loppua. Ajankohdan määrää savukaasun lämpötila, puhallusaika tai puhalletun hapen määrä. Lämpötilan nousunopeusmalli voi olla vakio tai se voi riippua savukaasun lämpötilan muutoksesta.

Pudotussondit ripustetaan konvertterin päällä olevaan pudotuslaitteeseen, josta ne voidaan pudottaa konvertteriin. Sondien pudottaminen tapahtuu konvertterin ohjausjärjestelmän avulla. Ohjausjärjestelmä lähettää laitteelle pudotussignaalin, jolloin laite pudottaa sondin putkea myöten konvertteriin. Sondi putoaa kuonakerroksen läpi ja jää teräkseen kellumaan. Terässulaan uponneen sondin termoelementtiin aiheutuu jännite-ero, jota laite mittaa. Mittaustiedot lähetetään sondiin kiinnitettyä kaapelia pitkin eteenpäin. Mittauksen jälkeen laite pudottaa sondin kosketinosan ja lopun kaapelin putkea pitkin konvertteriin ja sondi sulaa.

Pudotussondeilla voidaan mitata teräksen lämpötila puhalluksen aikana ja teräksen lämpötila ja happipitoisuus puhalluksen jälkeen.

Periaatekuva pommisondilaitteistosta on esitetty alla (Kuva 2).



Kuva 2. Periaatekuva pudotussondilaitteistosta. /4/

2.3 Uniformance-tietojärjestelmä /5/

Uniformance on Honeywellin tekemä teollisuuden kokonaisratkaisu yrityksen hallintaan. Se yhdistää tietojärjestelmän, sovellukset ja tehtaan laajat historiatietokannat.

Uniformance koostuu neljästä pääkomponentista: tietokantajärjestelmä, laadun hoito, tuotannon hoito ja käyttötoimintojen hoito. Järjestelmä tarjoaa Excel- ja PowerPoint-tuet.

Lisäksi Uniformance sisältää prosessitrendi-apuohjelman, jonka avulla voi seurata ja analysoida mittauksia tehtaalta. Process Trendin avulla voi näyttää maksimissaan kahdeksan trendiä ja kymmenen analyysiä kerralla. Järjestelmän tietokantaan voi kerätä jopa kahden sekunnin välein saatavaa prosessin mittaustietoa.

3 DATANKERUU

Dataa on kerätty Rautaruukin Neuvo-tietokannasta, johon tallentuu prosessimittaukset ja -analyysit. Tästä tietokannasta on kerätty mittauksia ajalta 5.5.-00 - 22.3.-01 (sulatukset 33000-51697). Tietokannasta on kerätty kaikkiaan 36 eri mittausta. Mittausten valinta on tehty yhteistyössä Rautaruukin asiantuntijoiden kanssa. Taulukossa 1 on lueteltu Neuvo-tietokannasta kerätyt mittaukset selitteineen. Sama mittaustunnus eri kanavissa on mahdollista, koska mittauksia on haettu eri tauluista tietokannassa. Toukokuuta -00 edeltävältä ajalta on ollut käytössä joitakin mittauksia loppuvuodelta -99 ja alkuvuodelta -00.

Uniformance-järjestelmästä on kerätty lyhyeltä jaksolta savukaasun lämpötilaa 2 sekunnin välein sekä mahdolliset sintteri- ja FeSi-lisäykset ja pudotussondimittaukset. Koska tämä järjestelmä on vielä Rautaruukillekin melko uusi, sopivan keruumenetelmän ja sopivien mittausten valinta ja käsittely ovat vielä alkuvaiheessa.

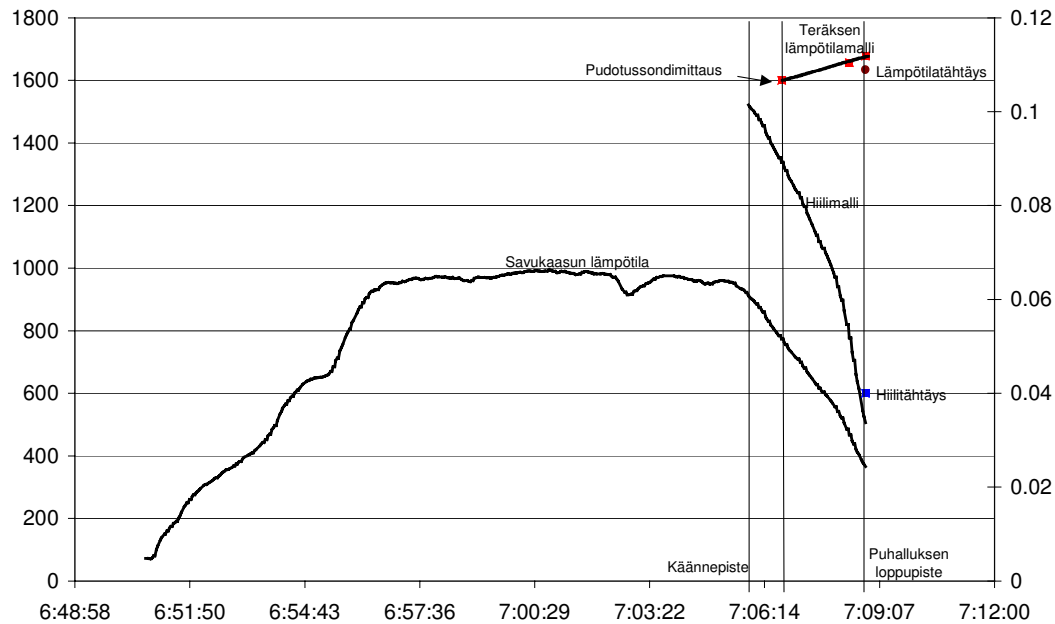
Taulukko 1. Neuvo-tietokannasta kerättyjen mittausten tunnukset ja selitteet.

Kanavatunnus	Selite
SULATUS	Sulatusero
KONV	Konvertterin numero
C_TAVOITE	Tavoitehiilipitoisuus [%]
C	Hiilipitoisuus puhalluksen jälkeen [%]
C_TAH	Hiilipitoisuustavoite seostukselle [%]
HAPPI_TOT	Puhalletun hapen kokonaismäärä [Nm ³]
N	Etunäytteen typpipitoisuus [%]
MN	Etunäytteen mangaanipitoisuus [%]
PUHKESTO	Puhalluksen kokonaiskesto [s]
PUHALKU	Puhalluksen alkuaikajankohta
PUHALLOPPU	Puhalluksen loppuaikajankohta
SINTTERI_TOT	Sulatukseen käytetyn sintterin kokonaismäärä [kg]
KOKSI_TOT	Sulatukseen käytetyn koksen kokonaismäärä [kg]
KALKKI_TOT	Sulatukseen käytetyn kalkin kokonaismäärä [kg]
FESI_TOT	Sulatukseen käytetyn ferropiin kokonaismäärä [kg]
DOLOM_TOT	Sulatukseen käytetyn dolomiittikalkin kokonaismäärä [kg]
RAUTA_PUN	Sulatukseen punnittu raakaraudamäärä [kg]
ROMU_PUN	Sulatukseen punnittu romumäärä [kg]
HARKOT_TOT	Sulatukseen käytetyn harkon kokonaismäärä [kg]
PUDHETKI	Lisäaineen pudotushetki [s puhalluksen alusta]
C	Raakaraudan hiilipitoisuus [%]
MN	Raakaraudan mangaanipitoisuus [%]
SI	Raakaraudan piiipitoisuus [%]
ENNENKAATO	Sulatuksen tavoitelämpötila [C-aste]
LAMPOTILA	Sulatuksen etunäytelämpötila [C-aste]
MITTAUSAIKA	Etunäytteen lämpötilan mittausaika
LISAPUH_ALKOI	Lisäpuhalluksen alkuaikajankohta
LISAPUH_KESTO	Lisäpuhalluksen kesto [s]
LISAPUH_SYY	Lisäpuhalluksen loppuaikajankohta
CELOX_AIKA	Pudotussondin pudotusajankohta
CELOX_LPT	Pudotussondin lämpötila [C-aste]
HAPPI_TOT	Puhalletun hapen kokonaismäärä pudotussondin pudotushetkellä [Nm ³]
O_PIT	Happipitoisuus pudotussondin pudotushetkellä [ppm]
C_PIT	Hiilipitoisuus pudotussondin pudotushetkellä [%]
SAVUKAASU_LPT	Savukaasun lämpötila pudotussondin pudotushetkellä [C-aste]
PUHALLUSAIKA	Puhallusaika pudotussondin pudotushetkellä [s puhalluksen alusta]

4 HIILI- JA LÄMPÖTILAMALLIN YHTEISTOIMINTA

Pudotussondimittauksen jälkeen hiilimalli, jota kehitetään Rautaruukki Steelin toimesta, ilmoittaa tarvittavan puhallusajan (tai mahdollisesti puhallukseen vielä tarvittavan happimäärän, joka hapen virtausnopeuden avulla muutetaan ajaksi lämpötilamallia varten). Lämpötilamalli valitsee sulatuksen alkuarvojen perusteella oikean lämpötilan nousunopeuskertoimen ja laskee, saavutetaanko lämpötilan tavoiteikkuna ilman lisäainelisäystä. Mikäli lämpötilaa ei saavuteta, lisäainetarve lasketaan ja tarvittava lisäaine panostetaan konvertertiin pikasiilojen kautta.

Alla olevassa kuvassa (Kuva 3) esitetään esimerkin omaisesti, miten teräksen hiilipitoisuus ja lämpötila käyttäytyvät sulatuksen loppuvaiheessa. Hiilimalli ilmoittaa, että puhallusta on vielä jatkettava noin kaksi minuuttia. Lämpötila ei tarvitse yhtä kauaa saavuttaakseen tavoitteensa, joten laskennan tulisi ilmoittaa, kuinka paljon sintteriä konvertertiin on panostettava, jotta tavoitelämpötilaikkuna ei ylitä.



Kuva 3. Sulatuksen kulku.

5 LÄMPÖTILAMALLI

Aluksi pohdittavana oli mallin erilaiset matemaattiset toteutusvaihtoehdot. Tavoitteena oli mallin pitäminen mahdollisimman yksinkertaisena. Vaihtoehtoina oli suora, jonka kulmakerroin muuttuu puhalluksen aikana tai suora, jonka kulmakerroin määritellään pelkästään sulatuksen alkuarvojen perusteella. Koska mallinnettava aika on lyhyt, päädyttiin etsimään vakiokulmakerrointa, joka määrätään sulatuksen alkuarvoista. Tämä ratkaisuvaihtoehto on helpompi toteuttaa ja antaa todennäköisesti ainakin yhtä hyvän tuloksen kuin muuttuvan kulmakertoimen malli. Tällä hetkellä käytössä olevassa laskennassa lämpötilaan lisätään sekunnin välein 0.54°C pudotussondin pudotuksen jälkeen.

Kulmakertoimen laskenta toteutetaan seuraavasti: etunäytteen ja pudotussondin lämpötilojen erotus jaettuna sulatuksen kokonaiskeston ja pudotussondin pudotushetken erotuksella eli

$$\frac{LAMPOTILA - CELOX_LPT}{PUHKESTO - PUHALLUSAIKA}$$

Kaavam muodossa on käytetty Rautaruukin Neuvo-tietokannassa olevien kanavien nimiä.

Lämpötilakehityksen ennustaminen koetaan tarpeelliseksi ainoastaan pudotussondin pudotuksen jälkeen, joten seuraavassa keskitytään ainoastaan sulatuksiin, joista on saatavilla pudotussondimittaus. Pudotussondilaitteisto on käytössä konverttereilla yksi ja kaksi, joten sulatukset, jotka on tehty konvertterilla kolme, karsitaan pois. Seuraavassa (Taulukko 2) on listattu joitakin ominaisuuksia datapaketeista taulukkomuodossa.

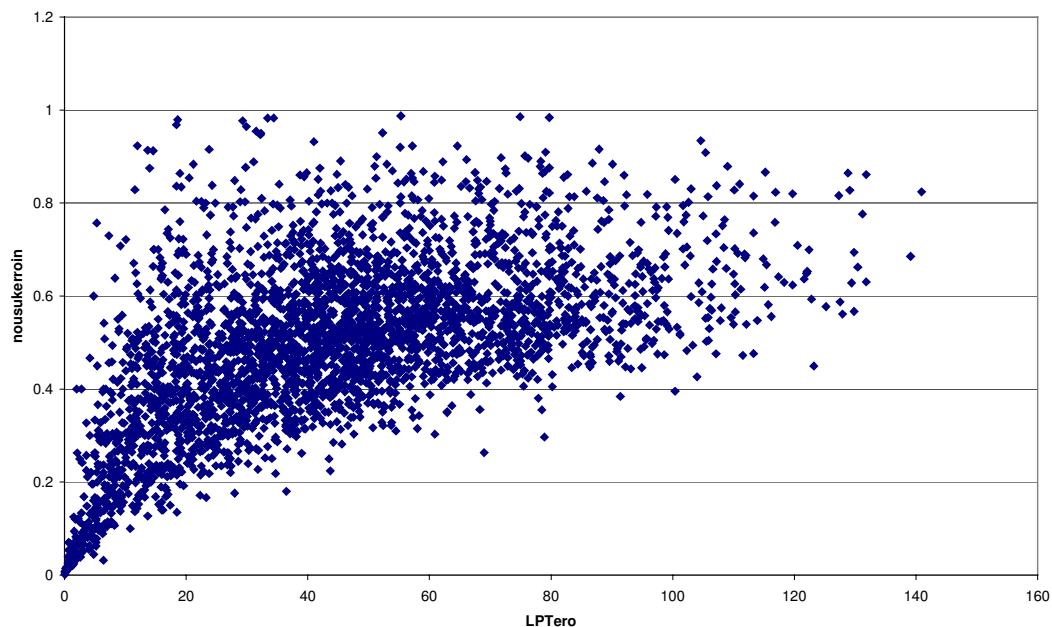
Taulukko 2. Datapakettien sisältö.

	DBsys00	DBtammi01	DBmaal01
Sulatusnumerot ja -lukumäärä	33000 - 40700 (7701)	40701 - 48334 (7634)	48335 - 51697 (3363)
Konvertteri 1	2434	2669	937
Konvertteri 2	2580	2485	1085
Konvertteri 3	2471	2282	1259
Summa konv. 1 -	7485	7436	3281
Osuus sulatuksista	97.2 %	97.4 %	97.6 %
Pudotussondien lukumäärä	6668	7092	2389
Celox_LPT>0	5163 (77.4%)	5638 (79.5%)	1858 (77.8%)
Ei happisondi	4419	5179	2347

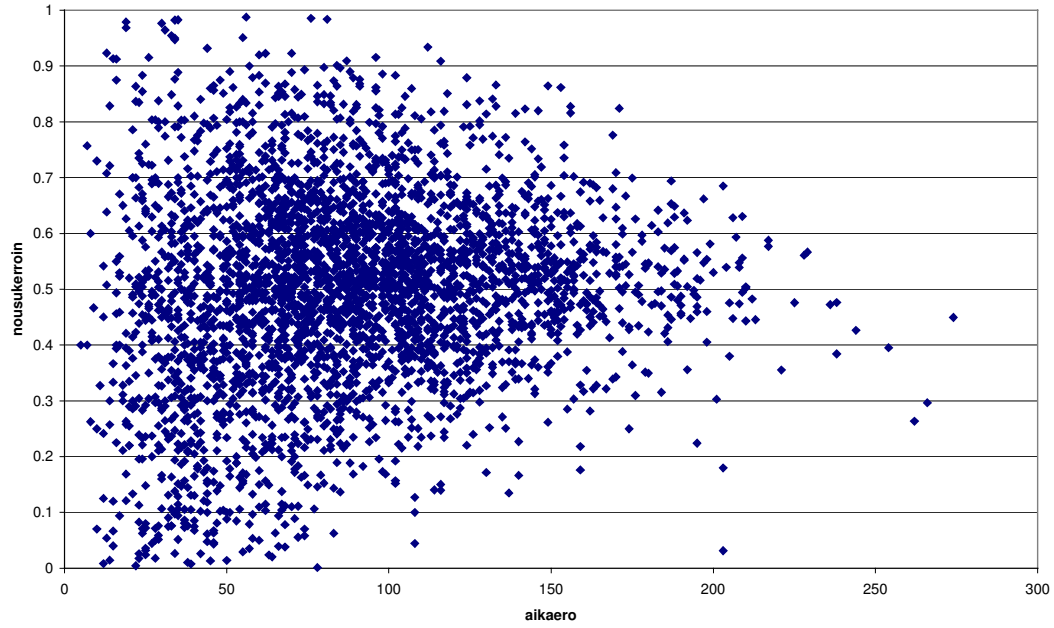
Syitä siihen, ettei kaikkia sulatuksia ole mukana datapaketeissa on varmasti useampia; perussyitä ovat kuitenkin se, että tietokantatoiminta ei ole täydellistä ja osa sulatuksista on suodatettu pois jo datankeruuvaiheessa.

Huomioitavaa on lisäksi se, että joistakin sulatuksista oli käytettävissä jopa viisi pudotussondimittaus ja näistä pyrittiin valitsemaan paras. Valintaperusteina oli mm. pudotushetki tarpeeksi aikaisin ennen sulatuksen loppua (n. 1 - 2½ min) ja savukaasun lämpötila sopivalla välillä (n. 600 - 900°C). Useimmista sulatuksista oli kuitenkin käytössä vain yksi pudotussondimittaus. Pudotussondi on pudotettava tarpeeksi aikaisin ennen sulatuksen loppua, jotta teräksen loppulämpötilaan ehditään vaikuttaa tarvittaessa lisäainelisäyksellä.

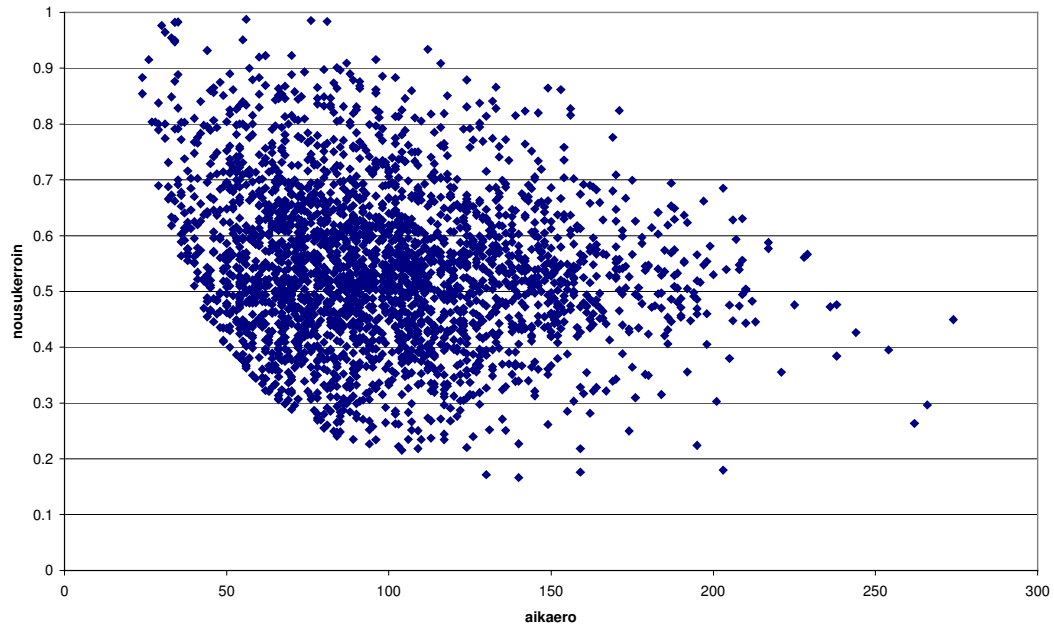
Tutkimuksessa käytettiin tietokantaa DBsyys00 opetusaineistona ja DBtammi01-tietokantaa testausaineistona. Opetusaineisto, DBsyys00, sisälsi 5014 sulatusta, jotka oli tehty ykkös- tai kakkoskonverttereilla. Näistä 3787 sulatuksesta, joihin oli kaikkiaan pudotettu 4979 pudotussondia, oli olemassa pudotussondimittaus sekä muut laskentaan tarvittavat mittaukset. Seuraavassa on kehitetty ja testattu neljä mallia, jotka ovat rakenteeltaan samanlaisia, mutta joiden opetusmateriaalit poikkeavat toisistaan. Joitakin sulatuksia, joista oli pudotussondimittaus, jäi pois sen takia, että niistä ei ollut kirjautunut tietokantaan etunäytteen lämpötilaa tai puhalluksen kokonaiskestoa. Tämä sulatusten joukko nimitettiin kk-ka -malliksi, jota nimitystä siitä käytetään jatkossa. Kk-ka -mallissa käytettiin kaikkia sulatukseen pudotettuja pudotussondeja. Kk-ka:n sulatusten joukosta poistettiin sulatukset, joista oli olemassa vain puhalluksen lopetuksen jälkeen oleva pudotussondimittaus, sulatukset, joissa lämpötila oli laskenut pudotussondin pudotuksen jälkeen, sulatukset, jotka olivat kestäneet alle 700 sekuntia ja sulatukset, joissa nousukertoimen lukuarvo oli yli yksi. Tähän kk-ka mod -malliin jäi jäljelle 3341 sulatusta, joista käytettiin vain parasta pudotussondimittaus. Lisäksi koettiin tarpeelliseksi vielä suodattaa pois pudotussondimittaukset, joissa pudotussondin jälkeinen lämpötilamuutos oli alle 20°C. Tätä ryhmää nimitetään jatkossa nimellä mod>20-malli ja sen ulkopuolelle jäävää ryhmää nimellä mod<20-malli. Seuraavassa esitetään joitakin kuvaajia, joiden perusteella lämpötilasuodatus päätettiin tehdä.



Kuva 4. Lämpötilaeron vaikutus nousukertoimeen pudotussondin pudotuksen jälkeen.



Kuva 5. Aikaeron vaikutus nousukertoimeen pudotussondin pudotuksen jälkeen.



Kuva 6. Aikaeron vaikutus nousukertoimeen lämpötilamuutoksen ollessa yli 20°C pudotussondin pudotuksen jälkeen.

Kuvaajista voidaan havaita, että suorittamalla suodatus lämpötilan suhteen saadaan nousukertoimen pieniä arvoja suodatettua pois menettämättä kuitenkaan liian suurta määrää sulatuksista. Mikäli suodatus olisi tehty aikaeron suhteen, suodatetut nousukertoimen arvot olisivat olleet koko nousukerroinalueelta ja tällöin

suodatuksella ei olisi saavutettu sille asetettua tavoitetta eli poistaa mahdollisimman suurta määrää väärällä alueella olevia nousukertoimen arvoja. Lämpötilan suhteen suodatetusta kuvaajasta voidaan havaita, että joukkoon jäi joitakin sulatuksia, joissa puhallus on jatkunut sondin pudotuksen jälkeen yli 3 minuuttia ja toisaalta, että aikaeron ollessa lyhyt nousukertoimen arvot ovat keskimäärin suurempia. Tämä luonnollisesti tapahtui, koska sulatuksissa, joissa pudotussondin jälkeinen puhallusaika oli lyhyt, lämpötilan kasvu oli oltava keskimääräistä nopeampaa, jotta ne mahtuisivat joukkoon. Tämän seikan ei oletettu vääristävän opetusaineistoa liiaksi suhteessa suodatuksen tuomaan hyötyyn. Seuraavassa esitetään eri aineistojen keskiarvot, varianssit, keskipoikkeamat ja pisteiden lukumäärät. Aika30-180 on aineisto, joka saatiin suodattamalla kk-ka mod ajan suhteen siten, että aineistoon sisällytettiin sulatukset, joissa pudotussondin jälkeen kulunut aika on välillä 30 ja 180 sekuntia. LPT+aika taas on aineisto, joka saadaan suodattamalla mod>20 lisäksi ajan suhteen välille 30 ja 180 sekuntia. Taulukosta 3 on havaittavissa, että pelkkä ajan suhteen suodatus ei keskipoikkeamaa juuri pienennä ja että keskipoikkeama on pienin mod>20 -aineistossa ja tähän lisäsuodatus ajan suhteen ei tuo parannusta, joten opetusaineistoksi valittiin mod>20. Laskennassa on nousukertoimesta käytetty kahden desimaalin tarkkuutta, kuten nykyisessäkin nousukertoimen arvossa on.

Taulukko 3. Aineistojen tilastollisia ominaisuuksia.

	kk-ka	kk-ka mod	mod>20	mod<20	aika30-180	LPT+aika
keskiarvo	0.37187	0.49967	0.54323	0.31617	0.50379	0.54380
varianssi	1.69142	0.03011	0.01916	0.03463	0.02857	0.01923
keskipoikkeama	1.30055	0.17353	0.13842	0.18608	0.16902	0.13866
sulatuslkm	3787	3341	2700	641	3043	2599
sondilkm	4979	3341	2700	641	3043	2599

Testausaineisto, DBtammi01, sisälsi 5154 sulatusta, jotka oli tehty ykkös- tai kakkoskonverttereilla. Näistä 4364 sulatuksesta, joihin oli kaikkiaan pudotettu 5457 pudotussondia, oli olemassa pudotussondimittaus sekä muut laskentaan tarvittavat mittaukset. Joitakin sulatuksia, joista oli pudotussondimittaus, jäi pois sen takia, että niistä ei ollut kirjautunut tietokantaan etunäytteen lämpötilaa tai puhalluksen kokonaiskestoa. Testausaineistosta poistettiin sulatukset, joista oli olemassa vain puhalluksen lopetuksen jälkeen oleva pudotussondimittaus ja lisäksi käytettiin vain parasta pudotussondimittauksista. Näin muodostui kaksi testausaineistoa, 4364m, jossa m ilmoittaa olevan mahdollista, että yhdestä sulatuksesta on käytössä enemmän kuin yksi pudotussondimittaus, sekä 4284. Kolmanneksi testausaineistoksi muodostettiin 4284LPT, joka saatiin suodattamalla aineistosta 4284 sulatukset, joissa lämpötilamuutos pudotussondin pudotuksen jälkeen on alle 20°C. Tähän ryhmään jäi 3364 sulatusta.

Näillä kolmella testausaineistolla testattiin opetusaineiston eri menetelmien antaman keskimääräisen nousukertoimen toimivuutta. Laskettu lämpötila saatiin lisäämällä pudotussondin lämpötilaan sulatuksen kokonaiskeston ja pudotussondin pudotushetken erotus kerrottuna ko. nousukertoimella ja virhe laskettiin lasketun lämpötilan ja etunäytteen lämpötilan erotuksena (laskennassa varmistettiin, että käytetään aina aikaisempaa etunäytteen lämpötilaa) eli

$$LaskettuLPT = CELOX_LPT + kk * (PUHKESTO - PUHALLUSAIKA)$$

$$Virhe = LaskettuLPT - LAMPOTILA$$

Kaavam muodossa on käytetty Rautaruukin Neuvo-tietokannassa olevien kanavien nimiä.

Seuraavassa taulukoituna (Taulukot 4, 5 ja 6) virheet kullakin menetelmällä sekä joitakin tilastollisia ominaisuuksia virheistä. Virheen prosenttiosuus on laskettu kunkin testausaineiston keskimääräisen lämpötilanousun suhteen, esim. aineiston 4284LPT keskimääräinen lämpötilanousu oli 53.3°C ja nykyisen ja mod>20:n virheen prosenttiosuus on -4.45% eli $(-2.37^{\circ}\text{C}/53.3^{\circ}\text{C}) * 100\%$.

Taulukko 4. Testausaineiston 4364m virhetaulukko ja tilastollisia ominaisuuksia.

	<i>virhe(nyk)</i>	<i>virhe(kk-ka)</i>	<i>virhe(kk-kamod)</i>	<i>virhe(mod>20)</i>	<i>virhe(mod<20)</i>
Keskiarvo	1.04	-11.44	-1.89	1.04	-15.11
Prosenttiosuus	2.70 %	-29.63 %	-4.91 %	2.70 %	-39.14 %
Keskivirhe	0.25	0.28	0.25	0.25	0.29
Keskipoikkeama	18.46	20.58	18.65	18.46	21.78
Varianssi	340.92	423.48	347.83	340.92	474.23
Alue	564.00	524.90	554.80	564.00	514.16
Minimi	-379.16	-392.08	-382.20	-379.16	-395.88
Maksimi	184.84	132.82	172.60	184.84	118.28
Summa	5682	-62413	-10341	5682	-82441
Lukumäärä	5457	5457	5457	5457	5457

Taulukko 5. Testausaineiston 4284 virhetaulukko ja tilastollisia ominaisuuksia.

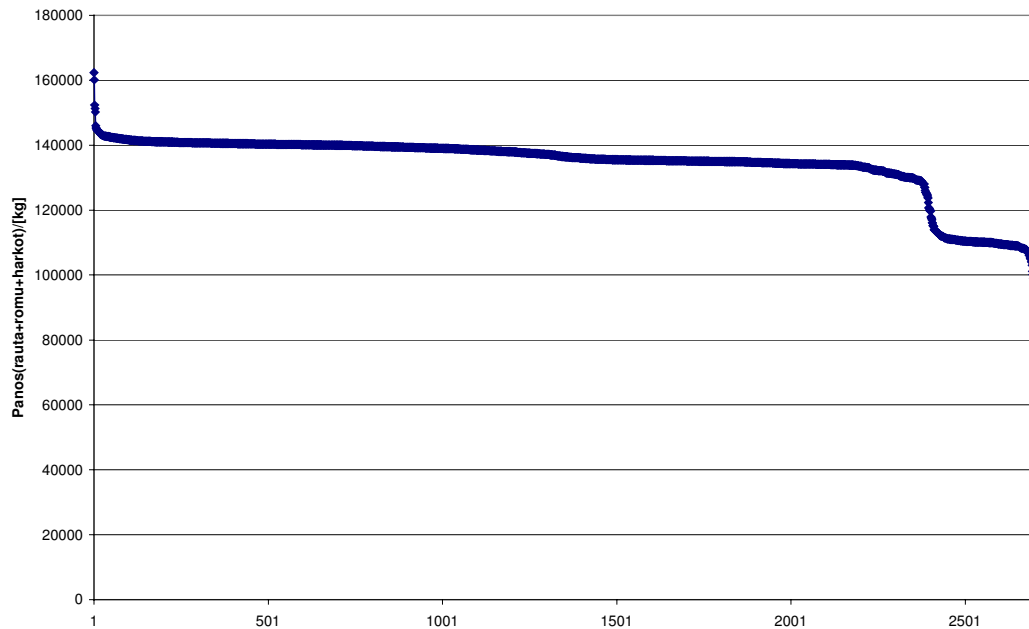
	<i>virhe(nyk)</i>	<i>virhe(kk-ka)</i>	<i>virhe(kk-kamod)</i>	<i>virhe(mod>20)</i>	<i>virhe(mod<20)</i>
Keskiarvo	1.26	-12.74	-2.04	1.26	-16.85
Prosenttiosuus	2.91 %	-29.49 %	-4.71 %	2.91 %	-39.02 %
Keskivirhe	0.23	0.26	0.23	0.23	0.28
Keskipoikkeama	15.03	17.33	15.34	15.03	18.42
Varianssi	225.76	300.36	235.27	225.76	339.32
Alue	153.94	157.36	148.10	153.94	161.96
Minimi	-63.00	-89.63	-67.40	-63.00	-98.18
Maksimi	90.94	67.73	80.70	90.94	63.78
Summa	5382	-54563	-8723	5382	-72194
Lukumäärä	4284	4284	4284	4284	4284

Taulukko 6. Testausaineiston 4284LPT virhetaulukko ja tilastollisia ominaisuuksia.

	<i>virhe(nyk)</i>	<i>virhe(kk-ka)</i>	<i>virhe(kk-kamod)</i>	<i>virhe(mod>20)</i>	<i>virhe(mod<20)</i>
Keskiarvo	-2.37	-18.41	-6.15	-2.37	-23.12
Prosenttiosuus	-4.45 %	-34.53 %	-11.53 %	-4.45 %	-43.38 %
Keskivirhe	0.23	0.24	0.23	0.23	0.25
Keskipoikkeama	13.46	14.10	13.39	13.46	14.73
Varianssi	181.25	198.88	179.27	181.25	217.01
Alue	153.94	137.05	148.10	153.94	132.80
Minimi	-63.00	-89.63	-67.40	-63.00	-98.18
Maksimi	90.94	47.42	80.70	90.94	34.62
Summa	-7987	-61917	-20676	-7987	-77779
Lukumäärä	3364	3364	3364	3364	3364

Huomioitavaa eri aineistojen välillä on se, että keskipoikkeama pienenee siirryttäessä pienempään testausaineistoon, joka osoittaa, että tehty suodatus on oikeansuuntaista, virheen alueen pieneneminen osoittaa, että aineistosta on poistunut suurin osa ns. mahdottomista tapauksista ja virheen keskiarvon kasvu osoittaa sen, että opetusaineistoa on pyrittävä jakamaan osiin. Virheen prosentuaalisen osuuden kasvu johtuu siitä, että suodatetuissa aineistoissa lämpötilan keskimääräinen nousu on suurempi ja se sinällään on mallinnuksen kannalta hyvä asia.

Opetusaineisto (panoskoon jakauma esitetty Kuvassa 7) jaettiin ryhmiin konvertterin ja panoskoon mukaan; panoskoon suhteen aineisto jaettiin kahteen osaan, yli 120 tonnin panokseen ja 105 - 120 tonnin panokseen (panos = punnittu rauta, romu ja harkot). Suurimmat viisi sulatusta olivat jakauman ulkopuolella, mutta ne otettiin mukaan, koska niiden prosentuaalinen osuus aineistossa oli pieni. Pienimmät kaksitoista sulatusta jätettiin tarkastelun ulkopuolella, koska niiden prosentuaalinen osuus pienemmässä panoskoossa olisi ollut huomattava.



Kuva 7. Opetusaineiston jakauma panoskoon mukaan.

Rautaruukki Steelillä Raahessa on käytössä kolme panoskokoa, mutta tässä vaiheessa ei katsottu tarpeelliseksi käyttää kuin kahta panoskokoa mallinnuksessa. Jatkossa joudutaan pohtimaan panosjakauman sovittamista mallinnukseen; tarvitaanko mahdollisesti kolmas panoskoko tai miten panosrajat tulisi joustavasti sijoittaa. Tällä hetkellä käytössä on ryhmät 120k1, 105k1, 120k2 ja 105k2 (nimeäminen panoskoon ja konvertterin mukaan). Seuraavassa taulukossa (Taulukko 7) esitetään opetusaineistojen ominaisuuksia.

Taulukko 7. Mallinnusryhmien ominaisuuksia.

	120k1	105k1	120k2	105k2
keskiarvo	0.54017	0.65669	0.52105	0.63479
varianssi	0.01799	0.01657	0.01752	0.01863
keskipoikkeama	0.13412	0.12872	0.13234	0.13649
sulatuslkm	1181	153	1218	136

Testausaineisto jaettiin myös edellä esitetyllä tavalla neljään ryhmään ja seuraavassa esitetään taulukoituna (Taulukot 8, 9, 10 ja 11) testaustulokset ryhmittäin. Virheitä menetelmällä $\text{mod} < 20$ ei esitetä, koska se oli hylätty tässä vaiheessa huonona menetelmänä.

Taulukko 8. Testausaineiston 120k1 virhetaulukko ja tilastollisia ominaisuuksia.

120k1

	<i>virhe(nyk)</i>	<i>virhe(kk-ka)</i>	<i>virhe(kk-kamod)</i>	<i>virhe(mod>20)</i>	<i>virhe(LPT120k1)</i>
Keskiarvo	-2.65	-18.49	-6.38	-2.65	-2.65
Prosenttiosuus	-5.00 %	-34.91 %	-12.04 %	-5.00 %	-5.00 %
Keskivirhe	0.30	0.32	0.30	0.30	0.30
Keskipoikkeama	11.78	12.58	11.73	11.78	11.78
Varianssi	138.83	158.14	137.53	138.83	138.83
Alue	70.26	75.58	67.00	70.26	70.26
Minimi	-36.68	-61.85	-39.80	-36.68	-36.68
Maksimi	33.58	13.73	27.20	33.58	33.58
Summa	-4158	-29025	-10009	-4158	-4158
Lukumäärä	1570	1570	1570	1570	1570

Taulukko 9. Testausaineiston 105k1 virhetaulukko ja tilastollisia ominaisuuksia.

105k1

	<i>virhe(nyk)</i>	<i>virhe(kk-ka)</i>	<i>virhe(kk-kamod)</i>	<i>virhe(mod>20)</i>	<i>virhe(LPT120k1)</i>
Keskiarvo	-15.19	-30.24	-18.73	-15.19	-4.56
Prosenttiosuus	-24.11 %	-48.00 %	-29.73 %	-24.11 %	-7.24 %
Keskivirhe	0.77	0.99	0.81	0.77	0.73
Keskipoikkeama	11.24	14.37	11.79	11.24	10.60
Varianssi	126.43	206.62	138.94	126.43	112.39
Alue	56.40	65.38	58.20	56.40	53.68
Minimi	-42.96	-66.56	-48.20	-42.96	-29.42
Maksimi	13.44	-1.18	10.00	13.44	24.26
Summa	-3220	-6412	-3971	-3220	-967
Lukumäärä	212	212	212	212	212

Taulukko 10. Testausaineiston 120k2 virhetaulukko ja tilastollisia ominaisuuksia.

120k2

	<i>virhe(nyk)</i>	<i>virhe(kk-ka)</i>	<i>virhe(kk-kamod)</i>	<i>virhe(mod>20)</i>	<i>virhe(LPT120k1)</i>
Keskiarvo	0.98	-15.34	-2.86	0.98	-0.94
Prosenttiosuus	1.93 %	-30.16 %	-5.62 %	1.93 %	-1.85 %
Keskivirhe	0.32	0.34	0.32	0.32	0.32
Keskipoikkeama	11.91	12.59	11.83	11.91	11.86
Varianssi	141.96	158.53	140.02	141.96	140.54
Alue	70.52	70.00	68.40	70.52	68.94
Minimi	-32.16	-52.29	-35.70	-32.16	-33.46
Maksimi	38.36	17.71	32.70	38.36	35.48
Summa	1339	-20955	-3907	1339	-1284
Lukumäärä	1366	1366	1366	1366	1366

Taulukko 11. Testausaineiston 105k2 virhetaulukko ja tilastollisia ominaisuuksia.

105k2

	<i>virhe(nyk)</i>	<i>virhe(kk-ka)</i>	<i>virhe(kk-kamod)</i>	<i>virhe(mod>20)</i>	<i>virhe(LPT120k1)</i>
Keskiarvo	-11.58	-26.89	-15.18	-11.58	-3.47
Prosenttiosuus	-19.23 %	-44.66 %	-25.21 %	-19.23 %	-5.76 %
Keskivirhe	1.09	1.26	1.12	1.09	1.07
Keskipoikkeama	13.13	15.23	13.45	13.13	12.84
Varianssi	172.34	231.86	180.98	172.34	164.95
Alue	55.16	70.81	58.20	55.16	56.31
Minimi	-40.76	-68.13	-47.20	-40.76	-33.32
Maksimi	14.40	2.68	11.00	14.40	22.99
Summa	-1678	-3898	-2201	-1678	-503
Lukumäärä	145	145	145	145	145

Huomioitavaa eri ryhmien välillä on se, että ryhmiin jakaminen ei juurikaan tuo parannusta suurien panoskokojen ryhmiin. Pienien panoksien ryhmiin parannus on huomattava. Pienien panoksien prosentuaalinen virhe on suurempi kuin suurilla, mutta tapauksien lukumäärä on pienempi ja panoskoon rajojen asettamisen onnistuminen korostuu näissä ryhmissä. Huomioitavaa on myös se, että keskipoikkeama on pienentynyt edelleen kuten aluekin. Silmiinpistävää on se, että kaikkien ryhmien virheiden keskiarvo on negatiivinen eli nousukerroin on keskimääräisesti liian pieni. Eräs tähän oikeansuuntaisesti vaikuttava korjaus havaittiin: sekä opetus- että testausaineistosta oli epähuomiossa unohdettu suodattaa pois sulatukset, joissa on tehty lisäpuhallus. Lisäpuhallushan hapen syötöstä johtuen polttaa panoksen ainesosia ja täten nostaa teräksen lämpötilaa. Seuraavassa (Taulukko 12) esitetään korjatun opetusaineiston ominaisuudet kokonaisaineiston suhteen ja ryhmiin jaettuihin aineistoihin vaikutus raportoidaan myöhemmin.

Taulukko 12. Korjatun opetusaineiston ominaisuuksia.

	mod>20	ei lisäpuh	lisäpuh	mod<20	ei lisäpuh
keskiarvo	0.54323	0.55013	0.49906	0.31617	0.32229
varianssi	0.01916	0.01865	0.02023	0.03463	0.03573
keskipoikkeama	0.13842	0.13656	0.14222	0.18608	0.18903
sulatuslkm	2700	2335	365	641	554

Koska virhe oli tapahtunut, pyrittiin hyödyntämään sitä jollakin tapaa. Kokonaisaineistoon lisäpuhallettujen sulatusten poistolla ei ollut suurta vaikutusta; nousukertoimen toinen desimaali kasvoi yhdellä, mutta muutos oli oikeansuuntainen ja keskipoikkeama laski hieman. Opetusaineistossa oli 13.5% lisäpuhallettuja sulatuksia, joten osuus on huomattava, mutta alkuperäisen opetusaineiston ollessa suuri erot tasaantuvat. Jaettaessa tämä virhe ryhmiin vaikutus varsinkin pienien panoskokojen ryhmissä saattaa olla huomattava, esim. ryhmässä 105k1 on 153 sulatuksesta 12 lisäpuhallettua. Jatkossa onkin tarkoitus yhdistää opetus- ja testausaineistot, jotta myös pienien panoskokojen ryhmiin saadaan enemmän sulatusesimerkkejä. Nousukertoimen keskipoikkeama on edelleen suuri. Arvioidaan yksittäistä sattumanvaraisesti valittua sulatusta ja sen lämpötilakehitystä pudotussondin pudotuksen jälkeen ja nousukertoimen sallitaan muuttua yhden hajonnan rajoissa (nousukertoimen keskiarvon ollessa 0.55 ja keskipoikkeaman ollessa n. 0.135 saadaan nousukertoimen yhden sigman rajoiksi 0.415 ja 0.685). Valitaan sulatus 40417 (Taulukko 13), jonka laskettu nousukerroin on lähellä keskimääräistä nousukerrointa. Ko. taulukossa esitetään Neuvo-tietokannasta poimitut mittausarvot ja lasketut arvot.

Taulukko 13. Sulatuksen 40417 tiedot.

SULATUS	CELOX_LPT	PUH.AIKA	ENNENKAATOA	LAMPOTILA	PUHKESTO	nousukerroin
40417	1651.8	1016	1666	1702	1107	0.55165

nousukerroin=0.415

laskettuLPT=1651.8+0.415*(1107-1016)=1689.6

nousukerroin=0.685

laskettuLPT=1651.8+0.685*(1107-1016)=1714.1

Ko. esimerkissä lämpötila ei pysynyt asetetun tavoitteen $\pm 10^{\circ}\text{C}$ rajoissa; aikaero 91 sekuntia edustaa normaalia aikaeroa pudotussondin pudotushetken ja hapen syötön lopetushetken välillä opetusaineistossa. Nousukertoimen keskipoikkeaman pientymiselle edelleen on selkeä tarve todennäköisesti senkin jälkeen, kun ryhmiin jaetuista aineistoista on poistettu lisäpuhalletut sulatukset. Edellytyksenä sille, että sulatuksen mahdollinen lämpötilakorjaus voidaan tehdä tehokkaasti on pudotussondimittauksen tekeminen mahdollisimman aikaisin. Pudotussondimittaus on järkevää tehdä vasta, kun hiilen palamisnopeus on alkanut hidastua, joka havaitaan savukaasun lämpötilan selkeänä laskemisena. Tehtäessä pudotussondimittaus aikaisemmin aikaero on suurempi ja näin nousukertoimen arvossa oleva virhe kertaantuu ajan pidentyessä. Lisäainelisyksen huomiointia sulatuksen loppuvaiheessa pohditaan hieman jäljempänä.

Lisäksi arvioitiin mallinnuksella saatujen nousukertoimien toimivuutta toteutuneeseen lämpötilaan verrattuna eli kuinka suuri osuus sulatuksista osuu tavoiteikkunaan. Testauksessa ei voitu käyttää tavoitelämpötilaa, koska nousukertoimien opetusaineistossa oli käytetty etunäytteen lämpötilaa. Testauksessa siis tavoitelämpötilaikkuna asetetaan toteutuneen etunäytteen lämpötilan ympärille. Aluksi esitetään taulukko (Taulukko 14) käytetyn aineiston osumisesta asetettuun tavoitteeseen. Negatiiviset arvot tarkoittavat, että lämpötila on jäänyt tavoitteen alapuolelle ja positiiviset taas, että tavoite on ylitetty. Tavoiteikkunaan $\pm 10^{\circ}\text{C}$ osui kohtuullisen pieni osuus sulatuksista, joten laskettiin, kuinka suureksi tavoiteikkunaa olisi venytettävä yläpuolelle, jotta siihen sisältyisi 70% sulatuksista. Yleisesti ottaen on vähemmän haitallista, jos teräksen lämpötila on korkea kuin matala.

Taulukko 14. Käytetyn aineiston osuminen lämpötilatavoiteikkunaan.

Tavoiteikkuna	DBtammi01	DBsyys00	DBsyys00+DBtammi01
-10<LPT<10	1744 (40.2%)	1271 (33.8%)	
>10	2189 (50.5%)	2246 (59.7%)	
<-10	400 (9.2%)	243 (6.5%)	
-10<LPT<25			5744 (71.0%)
Määrä	4333	3760	8093

Laskennallisesti todettiin, että 70% sulatuksista osuu tavoiteikkunaan -10°C - 25°C opetusaineistossa. Seuraavassa taulukoituna (Taulukko 15) ryhmiin jakamattomien testausryhmien osuminen lämpötilatavoiteikkunaan. Testausaineisto 2929 saatiin poistamalla aineistosta 4284LPT lisäpuhalletut sulatukset. Taulukoihin on sisällytetty myös tavoiteikkuna -25°C - 10°C, jonka avulla pyrittiin arvioimaan lämpötilakertoimen oikean arvon suuntaa. Nollan suhteen epäsymmetrisen tavoitelämpötilaikkunan avulla voidaan selvittää ko. nousukertoimella toteutuvien sulatusten painottuminen.

Taulukko 15. Testausaineistojen osuminen lämpötilatavoiteikkunaan.

4284

	nykyinen	kk-ka	kk-kamod	mod>20	mod<20
-10<x<25					
Lkm tav.	3152	1798	2901	3152	1443
Osuus tav.	73.58 %	41.97 %	67.72 %	73.58 %	33.68 %
-25<x<10	3040			3040	
-10<x<25					
Lkm tav.	2317	1481	2228	2317	1216
Osuus tav.	54.08 %	34.57 %	52.01 %	54.08 %	28.38 %

4284LPT (3364 kpl)

	nykyinen	kk-ka	kk-kamod	mod>20	mod<20
-10<x<25					
Lkm tav.	2409	960	2133	2409	600
Osuus tav.	71.61 %	28.54 %	63.41 %	71.61 %	17.84 %
-25<x<10	3122			3122	
-10<x<10					
Lkm tav.	1958	923	1822	1958	591
Osuus tav.	58.20 %	27.44 %	54.16 %	58.20 %	17.57 %

2929

	nykyinen	kk-ka	kk-kamod	mod>20	mod<20
-10<x<25	2096	765	1822	2161	469
Lkm tav.	71.56 %	26.12 %	62.21 %	73.78 %	16.01 %
Osuus tav.					
-25<x<10	2400			2365	
-10<x<10					
Lkm tav.	1755	742	1600	1779	465
Osuus tav.	59.92 %	25.33 %	54.63 %	60.74 %	15.88 %

Huomioitavaa taulukossa on se, että koska nousukertoimessa on käytetty kahden desimaalin tarkkuutta, nykyisen ja parhaan kilpailevan menetelmän nousukertoimet ovat samat ja niiden osumiset tavoiteikkunaan ovat vastaavanlaiset.

Lämpötilasuodatetusta aineistosta lisäpuhallettujen poisto muutti sen suorituskyvyn hieman paremmaksi ja myös tavoiteikkunaan $-25^{\circ}\text{C} - 10^{\circ}\text{C}$ vähempien sulatusten osuminen tukee sitä, että nousukertoimen arvo 0.55°C/s on oikeampi kuin nykyinen 0.54°C/s .

Seuraavassa taulukoituna (Taulukot 16, 17, 18 ja 19) panoskoon ja konvertterin mukaan ryhmiteltyjen aineistojen osuminen lämpötilatavoiteikkunaan. Tässä esityksessä ei ole vielä poistettu lisäpuhallettuja sulatuksia ryhmistä.

Taulukko 16. Ryhmän 120k1 testausaineiston osuminen lämpötilatavoiteikkunaan.

120k1 (1570 kpl)

	nykyinen	kk-ka	kk-kamod	mod>20	120k1
-10<x<25					
Lkm tav.	1142	392	991	1142	1142
Osuus tav.	72.74 %	24.97 %	63.12 %	72.74 %	72.74 %
-25<x<10	1310				1310
-10<x<10					
Lkm tav.	954	386	858	954	954
Osuus tav.	60.76 %	24.59 %	54.65 %	60.76 %	60.76 %

Taulukko 17. Ryhmän 105k1 testausaineiston osuminen lämpötilatavoiteikkunaan.

105k1 (212 kpl)

	nykyinen	kk-ka	kk-kamod	mod>20	105k1
-10<x<25					
Lkm tav.	73	13	57	73	150
Osuus tav.	34.43 %	6.13 %	26.89 %	34.43 %	70.75 %
-25<x<10	169				186
-10<x<10					
Lkm tav.	72	13	57	72	134
Osuus tav.	33.96 %	6.13 %	26.89 %	33.96 %	63.21 %

Taulukko 18. Ryhmän 120k2 testausaineiston osuminen lämpötilatavoiteikkunaan.

120k2 (1366 kpl)

	nykyinen	kk-ka	kk-kamod	mod>20	120k2
-10<x<25					
Lkm tav.	1094	505	1004	1094	1057
Osuus tav.	80.09 %	36.97 %	73.50 %	80.09 %	77.38 %
-25<x<10	1051				1097
-10<x<10					
Lkm tav.	844	485	838	844	847
Osuus tav.	61.79 %	35.51 %	61.35 %	61.79 %	62.01 %

Taulukko 19. Ryhmän 105k2 testausaineiston osuminen lämpötilatavoiteikkunaan.

105k2	(145 kpl)				
	nykyinen	kk-ka	kk-kamod	mod>20	105k2
-10<x<25					
Lkm tav.	74	24	56	74	104
Osuus tav.	51.03 %	16.55 %	38.62 %	51.03 %	71.72 %
-25<x<10	115				114
-10<x<10					
Lkm tav.	70	24	54	70	82
Osuus tav.	48.28 %	16.55 %	37.24 %	48.28 %	56.55 %

Huomioitavaa taulukoissa on se, että konvertterilla yksi suurempi panoskoko saa saman nousukertoimen arvon kuin kokonaisaineisto. Näin ollen tässä ryhmässä suorituskky on vastaavanlainen nykyisellä ja parhaalla kilpailevalla nousukertoimella. Muissa ryhmissä uuden nousukertoimen suorituskky on parempi, paitsi konvertterilla kaksi suuremman panoskoon laajempi lämpötilan tavoiteikkuna tavoittaa suuremman määrän sulatuksia. Pienissä panoskoissa molemmilla konverttereilla suorituskky on huomattavasti parempi. Kaikissa testausaineistoissa tavoiteikkunaan -25°C - 10°C osuu enemmän sulatuksia, mikä tukee sitä, että nousukertoimen arvot olisivat edelleen liian pieniä, vaikka ne ovat pienissä panoskoissa jo huomattavasti nousseet. Tähän toivottua parannusta tuonee lisäpuhallettujen sulatusten poistaminen ryhmistä.

6 LISÄAINEIDEN VAIKUTUS

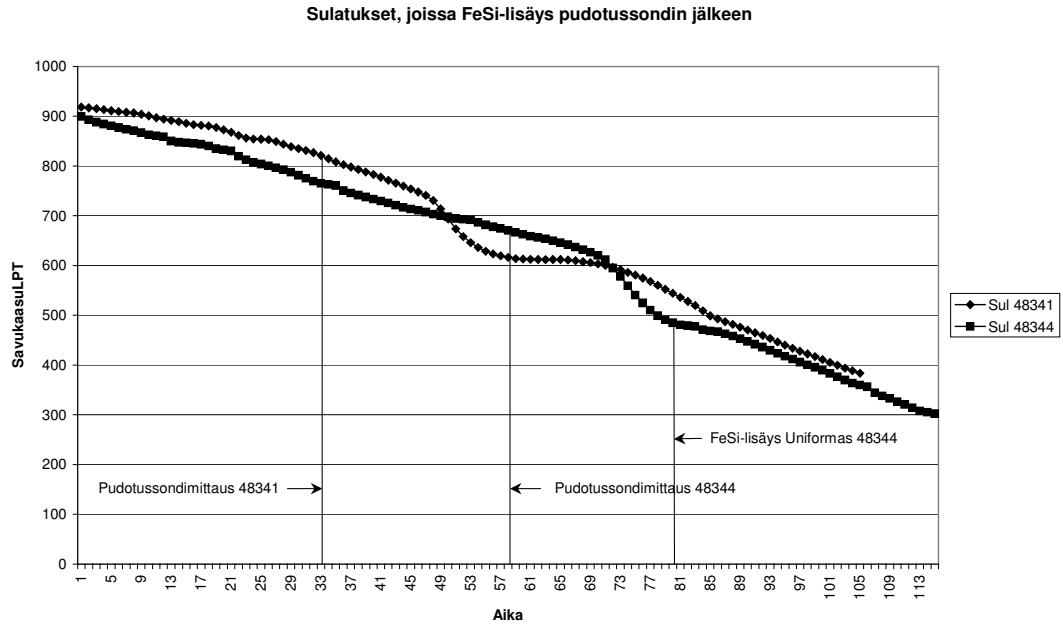
Lisäaineiden vaikutuksen arviointi on vielä alkuvaiheessa. Seuraavassa esitetään joitakin asiaan liittyviä pohdintoja.

Nykyisessä Neuvo-tietokannassa on saatavilla lisäaineen lisäykseen liittyen ainakin seuraavat kanavat: lisäaineen nimi, määrä ja pudotushetki suhteutettuna puhalluksen alkuun, esimerkiksi 100 kg FeSi:ä on pudotettu hetkellä 1008 s laskettuna puhalluksen alusta. Uudessa Uniformance-tietokannassa on saatavilla esimerkiksi savukaasun lämpötilaa kahden sekunnin välein ja lisäksi tietokantaan rekisteröity pudotussondien ja lisäaineiden pudotushetket. Lisäksi Uniformancesta löytyy mm. hapen syötön lopetus, pohjapuhalluksen tila ja useita muita mittauksia, joita Neuvo-tietokannasta ei löytynyt.

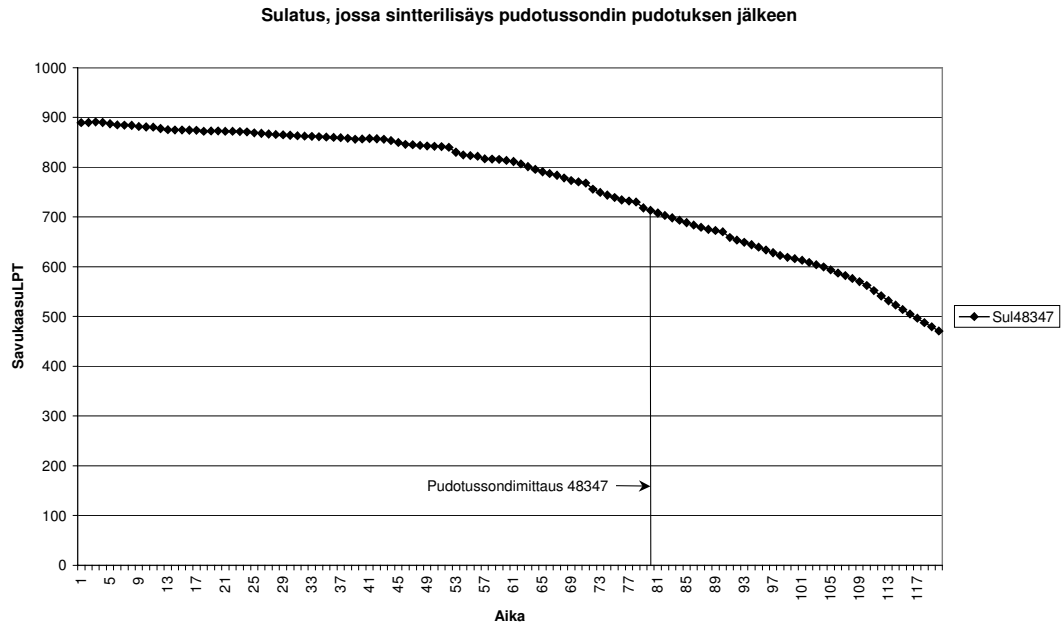
Ongelmia tulee aiheuttamaan se, että tällä hetkellä Neuvon ja Uniformancen tietoja ei pysty kohdentamaan onnistuneesti, esimerkiksi sondin pudotusajankohta rekisteröity noin kymmenen sekuntia eri aikaan Neuvoon ja Uniformanceen, lisäainelisäyksen ajankohdan välillä eroa noin kolme minuuttia Neuvosta sulatuksen alun ajankohdan avulla laskettuna ja Uniformancesta aikaleima ja lisäainelisäys rekisteröity Uniformanceen vasta lisäaineen vaikutuksen alettua (esimerkkinä merkitty sulatuksen 48344 ferropii-lisäys). Ko. ongelmiin etsitään ratkaisu Rautaruukki Steelin asiantuntijoiden kanssa.

Alustavina ideoina on ajateltu savukaasun lämpötilan erisuuruista laskunopeutta eri tapauksissa (FeSi-lisäys, sintterilisäys ja ei lisäystä). Alustavissa tarkasteluissa huomattavaa eroa ei ollut havaittavissa (muutamien sulatusten perusteella) keskimäärin pudotussondin pudotuksen jälkeen. Lisäksi ongelmana on se, ettei tällä hetkellä ole tiedossa korrelaatiota sulan lämpötilan ja savukaasun lämpötilan muutosten välillä. Toisaalta ainakin FeSi-lisäyksestä voi savukaasulämpötilakäyrän perusteella suunnilleen arvioida vaikutusajan ja tälle ajalle voisi määrittää tietynsuuruisen kulmakertoimen lisätyn kilomäärän perusteella. Käyttömieheltä kuullun nyökkisäännön mukaan sadan kilon ferropiin palaminen kestää noin 40 sekuntia ja sulatuksesta 48341 savukaasun lämpötilan avulla määritetty aika oli noin 48 sekuntia. Kolmas potentiaalinen vaihtoehto on etsiä Neuvo-tietokannoista sulatuksia, joihin on lisätty sintteriä tai ferropiitä sondin pudotuksen jälkeen ja pyrkiä näiden perusteella määrittämään keskimääräinen lisäaineen vaikutus. Lopullinen ratkaisumalli tulee olemaan edellä esitettyjen yhdiste ja mahdollisesti muista ideoista. Tavoitteena on määrittää kertoimet, jotka ilmoittavat, kuinka paljon kilon lisäaineen lisäys vaikuttaa sulan lämpötilaan terästönä kohti sekunnissa.

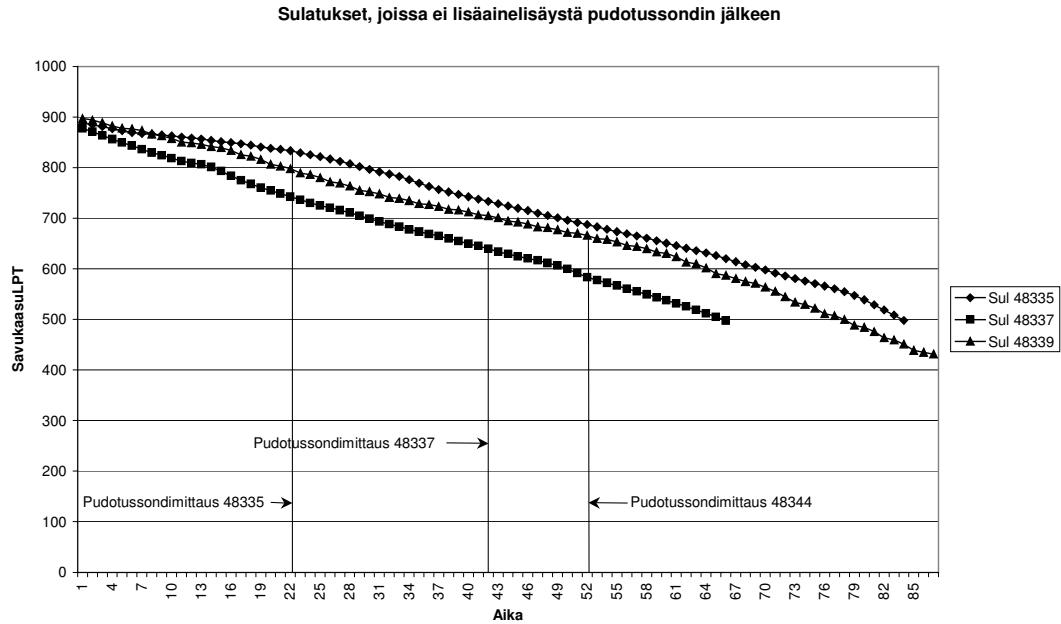
Seuraavassa (Kuvat 8, 9 ja 10) esitetään muutamien sulatusten savukaasulämpötilan kehitys puhalluksen loppuvaiheessa. Sulatuksiin on merkitty sulatuksen aikana pudotetut pudotussondit ja sulatukseen 48344 lisätyn ferropiin Uniformanceen rekisteröitynyt pudotusaika. Aika-akseli on kahden sekunnin monikertoja.



Kuva 8. Sulatukset 48341 ja 48344, joissa ferropii-lisäys pudotussondin pudotuksen jälkeen.



Kuva 9. Sulatus 48347, jossa sintterilisäys pudotussondin pudotuksen jälkeen.



Kuva 10. Sulatukset 48335, 48337 ja 48339, joissa ei lisäainelisäystä pudotussondin pudotuksen jälkeen.

Lisäainelisäysten vaikutuksista mainittakoon, että ferropiin lisäys nostaa sulan lämpötilaa jyrkemmin kuin ilman ferropiin lisäystä. Savukaasun lämpötilaan ferropii vaikuttaa laskevasti, koska pii palaa ennen hiiltä ja näin ollen hiilimonoksidia muodostuu vähemmän ja hiilimonoksidin jälkipalaminen hiilidioksidiksi, joka pääosin nostaa savukaasun lämpötilaa, vähenee. Tämä ilmiö on havaittavissa myös savukaasukäyristä. Sintterin lisäys hidastaa sulan lämpötilan nousua. Sintterilisäys tuo konvertertiin happea, joten periaatteessa tämä kiihdyttää hiilen palamista ja näin ollen savukaasun lämpötila laskisi hitaammin kuin ilman sintterin lisäystä. Tämä ilmiö ei ole selvästi havaittavissa savukaasun lämpötilakäyrästä.

Lisäainelisäyksen vaikutus on tärkeää selvittää myös siksi, että se vaikuttaa hiilimalliin (ferropiin lisäys keskeyttää hiilen palamisen vaikutus ajakseen ja sintterin lisäys ehkä hieman kiihdyttää hiilen palamista prosessiin tuomastaan hapesta johtuen).

7 YHTEENVETO JA JATKOTUTKIMUKSET

7.1 Lämpötilamalli

Tutkimuksessa on havaittu, että lämpötilan kehitys pudotussondin pudotuksen jälkeen on riippuvainen monesta asiasta. Tutkimus vahvistaa edelleen sitä useasti määritettyä seikkaa, että lämpötilan keskimääräinen nousunopeus on $0.54^{\circ}\text{C}/\text{s}$ -luokkaa pudotussondin pudotuksen jälkeen, mutta tämän keskiarvon soveltuvuus yksittäiseen sulatukseen ei ole riittävä. Sulatukset on tarpeen jakaa vähintäänkin panoskoon ja konvertterin suhteen. Lisäksi opetusaineiston, kuten aina historiatietokantaan perustuvassa mallinnuksessa, hyvä laatu on ensisijaisen tärkeässä asemassa. Lisäpuhalletut sulatukset tulee poistaa käsittelystä ja sulatukset, joihin on tehty lisäainelisäys pudotussondimittauksen jälkeen tai juuri ennen sitä sekä mahdollisesti myös sulatukset, joihin on tehty lisäainelisäys puhalluksen alkuvaiheessa. Tämä opetukseen vain lisäaineettomien sulatusten hyväksyminen on kuitenkin hieman arveluttavaa, sillä nykyisellään on melko yleistä varsinkin sintterin käyttö sulatuksen alkuvaiheessa jäädytykseen. Keskustelua aineiston jakamisesta myös hiilipitoisuuden suhteen on käyty; lämpötilan kehityshän on nopeampaa mentäessä mataliin hiilipitoisuuksiin (alle 0.05%) raudan palaessa hiilen ohella. Selkeää muutosta tämän seikan suhteen ei ole vielä havaittu. Nousukertoimien jakautumista pudotussondin pudotushetken savukaasulämpötilan suhteen on tarkoitus myös tutkia (tämä tuonee apua myös pudotussondimittauksen standardointiin). Tutkimuksessa vaihteittain tuleva tarkennus tuo tietoa arvioitaessa jatkossa eri muuttujien vaikutusta nousukertoimen arvoon. Lämpötilan nousukertoimen keskipoikkeamaa on vielä pyrittävä pienentämään ja tämä aiheuttaa pieniä muutoksia nousukertoimen arvoon.

Pudotussondin antama lämpötilamittaus on primäärinen mittaus, joka saadaan sulatuksen aikana. Tämän mittauksen suoritusajankohdan kriteerien standardointi on ensisijaisen tärkeää onnistuneen lämpötilamallin muodostamiseen. Kriteerien asetus voidaan suorittaa esimerkiksi savukaasun lämpötilan, kuluneen puhallusajan ja puhalletun hapen suhteen. Myös mittauksen edustavuus (sondin jännitekäyrän luokka olisi tarpeen saada Neuvo-tietokantaan, jotta mittauksen onnistumista voisi arvioida myös jälkikäteen), konvertterin panostuksesta alkaen tasainen laatu (kuonan laatu tärkeä sondin läpäisevyydelle); Rautaruukki Steelillä on samanaikaisesti käynnissä projekti, jossa kehitetään myös käytössä olevaa panoslaskentaa ja vastaavuus muiden mittausten kanssa varmennettava; yli 600 pudotussondimittauksen, jotka oli tehty puhalluksen lopetuksen jälkeen, ja ensimmäisen etunäytteen lämpötilojen standardipoikkeama oli yli 11.5°C (sulatukset eivät olleet lisäpuhallettuja).

7.2 Lisäainemalli

Lisäaineiden vaikutuksen arviointi on vielä alkuvaiheessa, mutta tutkimusta tullaan painottamaan tähän jatkossa. Ferropiin ja sintterin vaikutuksille pudotussondin pudotuksen jälkeen pyritään määrittämään kertoimet, jotka ilmoittavat, kuinka paljon kilon lisäaineen lisäys vaikuttaa sulan lämpötilaan terästönä kohti sekunnissa. Lisäaineiden vaikutuksen selvittämiseen panostetaan jatkossa enemmän kuin lämpötilamallin kehitykseen, johon toistaiseksi on keskitytty lähes täysin.

LÄHDELUETTELO

/1/ Heikkinen Eetu-Pekka, Paananen Timo METALLURGIN HYVÄ TIETÄÄ/ LD-KG-konvertteri, Oulun yliopisto, 19 s.

/2/ Turkdogan, E. T. Fundamentals of steelmaking. Cambridge, The Institute of Materials. 1996. 331 s.

/3/ Laine, Kim, Pudotussondien käyttö konvertterin lämpötilan hallinnassa, diplomityö, Oulun yliopisto, prosessiosasto, 1998, 94 s.

/4/ Pyykkö, Pekka, Konvertterin ohjaus, kirjallisuusselvitys, Oulun yliopisto, prosessitekniikan osasto, 1997, 29 s.

/5/ Uniformance 150, Product overview, Excel Companion, User Guide, Process Trend, User Guide ja PowerPoint Companion, User Guide, Honeywell, USA, 1999, yht. 265 s.

ISSN 1238-9404

Oulun yliopisto
Säätötekniikan laboratorio – Sarja B
Toimittaja: Leena Yliniemi

1. **Yliniemi L & Koskinen J**, Rumpukuivaimen sumea säätö. Joulukuu 1995. 17 s. 6 liitettä. ISBN 951-42-4301-3.
2. **Leiviskä K, Rauma T, Ahola T, Juuso E, Myllyneva J & Alahuhta P**, Sumea mallintaminen, viritys ja säätö. Tammikuu 1996. 44 s. 951-42-4348-X.
3. **Altavilla M, Koskinen J & Yliniemi L**, Rumpukuivaimen säätö neuroverkolla. Tammikuu 1996. 12 s. ISBN 951-42-4373-0.
4. **Myllyneva J, Leiviskä K, Heikkinen M, Kortelainen J & Komulainen K**, Sumean säädön käyttömahdollisuudet hiertämön ohjauksessa. Huhtikuu 1997. 52 s. ISBN 951-42-4647-0.
5. **Leiviskä K & Heikkinen M**, TMP-prosessin mallintaminen ja mallipohjainen säätö. Huhtikuu 1997. 68 s. ISBN 951-42-4646-2.
6. **Jaako J**, Nopeusyhtälön parametrien sovittaminen. Huhtikuu 1998. 25 s. ISBN 951-42-4961-5.
7. **Myllyneva J, Kortelainen J, Latva-Käyrä K, Nystedt H & Leiviskä K**, Hiertämön laatusäädöt. Syyskuu 1998. ISBN 951-42-5023-0.
8. **Lähteenmäki M & Leiviskä K**, Tilastollinen prosessinohjaus: perusteet ja menetelmät. Lokakuu 1998. ISBN 951-42-5064-8.
9. **Tervahartiala P & Leiviskä K**, Tilastollinen prosessinohjaus: ohjelmistovertailu. Elokuu 1999. ISBN 951-42-5343-4.
10. **Jaako J**, Eräitä optimointitehtäviä. Syyskuu 1999. 39 s. ISBN 951-42-5352-3.
11. **Jaako J**, Yksinkertaisia prosessimalleja. Syyskuu 1999. 73 s. ISBN 951-42-5353-1.
12. **Jaako J**, MATLAB-ohjelman käyttö eräissä prosessiteknisissä laskuissa. Syyskuu 1999. 61 s. ISBN 951-42-5354-X.
13. **Jaako J**, Säätötekniikan laboratorion opetuskokeiluja I – Portfoliomuotoisen kurssin toteutus ja tulokset. Helmikuu 2000. 28 s. ISBN 951-42-5544-5.
14. **Ahola T, Ruuska J, Juuso E & Leiviskä K**, Paperikoneen katkoherkkyysindikaattori. Helmikuu 2000. 33 s. ISBN 951-42-5563-1.
15. **Ylikunnari J**, InTouch valvomo-ohjelmiston implementointi lämmönsiirron identifiointiprosessiin (PS II:n harjoitustyölaitteisto). Maaliskuu 2000. ISBN 951-42-5568-2.
16. **Mäki T & Juuso E**, Tapahtumapohjainen sumea lingvistinen yhtälöjärjestelmä lääkevalmisteiden koostumusten ja valmistusprosessien tutkimuksessa. Kesäkuu 2000. ISBN 951-42-5678-6.
17. **Jaako J**, Säätötekniikan laboratorion opetuskokeiluja II – Apuopettaja opettajan apuna. Elokuu 2000. 22 s. ISBN 951-42-5742-1.
18. **Sivonen J**, Johdatus säätötekniikkaan, opetuslaitteiston suunnittelu ja toteutus. Syyskuu 2000. 20 s. ISBN 951-42-5795-2.
19. **Mutka P**, Neuraalilaskenta ja epälineaarinen dynamiikka komponenttien kulutus- ja myyntiennusteiden laatimisessa. Joulukuu 2000. 41 s. ISBN 951-42-5873-8.
20. **Komulainen K & Juuso E**, Vikatietojen hyödyntäminen funktionaalisessa testauksessa. Joulukuu 2000. 22 s. ISBN 951-42-5874-6.

21. **Ikäheimonen J, Juuso E, Leiviskä K & Murtovaara S**, Sulfaatisellun menetelmät, keiton ohjaus ja massan pesu. Joulukuu 2000. 48 s. ISBN 951-42-5875-4.
22. **Ikäheimonen J, Juuso E, Leiviskä K, Murtovaara S & Sutinen R**, Keittoliipeä- ja massa-analyysi sellun keitossa ja pesussa. Joulukuu 2000. 35 s. ISBN 951-42-5876-2.

25. **Rahikka L & Juuso E**, Sulfaatisellun eräkeittoprosessin jatkuvatoiminen analysointi. Joulukuu 2000. 36 s. ISBN 951-42-5879-7.
26. **Pirttimaa M & Leiviskä K**, Tilastollinen prosessinohjaus: Pastapainoprosessin tehdaskokeet. Joulukuu 2000. ISBN 951-42-5884-3.
27. **Jaako J & Nelo S**, Prosessi- ja ympäristötekniikan opetuksen tulevaisuuden haasteita. Tammikuu 2001. ISBN 951-42-5889-4.
28. **Näsi J, Isokangas A & Juuso E**, Klusterointi kuorimon puuhäviöiden mallintamisessa. Tammikuu 2001. ISBN 951-42-5894-0.
29. **Mäki T & Juuso E**, Lingvistinen yhtälöjärjestelmä lääkevalmisteiden rakeistusprosessin dynaamisessa simuloinnissa. Tammikuu 2001. ISBN 951-42-5895-9.

31. **Joensuu P**, Vikadiagnostiikka sulatuksen laadunohjauksessa: Syherön syntyminen ja siihen vaikuttavat tekijät. Tammikuu 2001. ISBN 951-42-5893-2.
32. **Ikäheimonen J., Leiviskä K. & Ruuska J.**, Jatketiilen tukkeentumisen mallintaminen neuroverkoilla. Helmikuu 2001. ISBN 951-42-5906-8.
33. **Ikäheimonen J., Leiviskä K. & Ruuska J.**, Sulkutangon asennon ja valunopeuden käyttö jatketiilen tukkeentumisen ennustamisessa. Maaliskuu 2001. ISBN 951-42-5946-7.
34. **Ruuska J. & Leiviskä K.**, LD-KG-konverterterin lämpötilamalli. Toukokuu 2001. ISBN 951-42-6411-8.

ISSN 1238-9404
Säätötekniikan laboratorio
– Sarja B