



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

TERÄSKONVERTTERI, MITTAUKSET JA MALLIT

Samuel Hiltunen

PROSESSITEKNIikka

Kandidaatintyö

Toukokuu 2023

TIIVISTELMÄ

Teräskonvertteri sekä sen mittaukset ja mallit

Samuel Hiltunen

Oulun yliopisto, Prosessitekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2023, 28 s.

Työn ohjaajat yliopistolla: Dos. Jari Ruuska & Dos. Aki Sorsa

Työn tavoitteena on kirjallisuuskatsauksen avulla tutustua teräskonvertteriin ja esitellä teräskonvertteriprosessin mittausmenetelmiä sekä mittaustulosten hyödyntämistä mallinnuksessa. Työssä on keskitytty erityisesti yhdistelmäpuhalluskonverttereihin sekä käytetty esimerkkinä LD-KG-konvertteria. Prosessimallit on jaettu dynaamisiin ja staattisiin malleihin sekä niiden toimintaperiaatteita ja hyödyntämistä teräskonvertterissa on selvitetty. Työssä myös etsitään ja vertaillaan erilaisia mahdollisuuksia epäsuorille ja suorille mittauksille. Konvertterissa vallitsee erittäin haastavat olosuhteet, jotka vaikeuttavat suorien mittausten suorittamista.

Asiasanat: teräskonvertteri, mittaus, dynaaminen malli, staattinen malli

ABSTRACT

Steel converter and its measurements and models

Samuel Hiltunen

University of Oulu, Degree Programme of Process Engineering

Bachelor's thesis 2023 27 s.

Supervisors at the university: Dos. Jari Ruuska & Dos. Aki Sorsa

The aim of the thesis is to make a literature review on the steel converter and to present the measurement methods of the steel converter process and the utilization of the measurement results in modelling. The work has focused especially on combination blowing converters and used the LD-KG converter as an example. The process models are divided into dynamic and static models, and their operating principles and utilization in the steel converter have been explained. The thesis also looks for and compares different possibilities for indirect and direct measurements. The converter has very challenging conditions, which makes direct measurements very challenging.

Keywords: steel converter, measuring, dynamic model, static model

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	4
2 TERÄSKONVERTTERIPROSESSI.....	5
2.1 Panostus.....	6
2.2 Puhallus	7
2.2.1 Päältäpuhallus.....	7
2.2.2 Pohjapuhallus	9
2.3 Kaato.....	10
3 MITTAUKSET	12
3.1 Teräksen lämpötilan mittaus.....	12
3.2 Teräksen happipitoisuuden mittaus	13
3.3 Konvertterin vuorauksen mittaus	13
3.4 Savukaasujen mittaukset	14
4 MALLIT.....	16
4.1 Dynaamiset mallit.....	16
4.2 Staattiset mallit	19
POHDINTA	21
YHTEENVETO	23
LÄHDELUETTELO	

1. JOHDANTO

Terästä on valmistettu maailmanlaajuisesti kauan teräskonverttereilla. Konvertteriprosessi tuottaa kuitenkin paljon päästöjä, joita nykyisin on pyritty vähentämään kehittämällä tarkempia ja energiatehokkaampia prosessinohjausjärjestelmiä. Työssä esitellään konvertteriprosessi yleisesti sekä erilaisia mittaus- ja mallinnumahdollisuuksia, joita voidaan käyttää prosessin ohjauksessa.

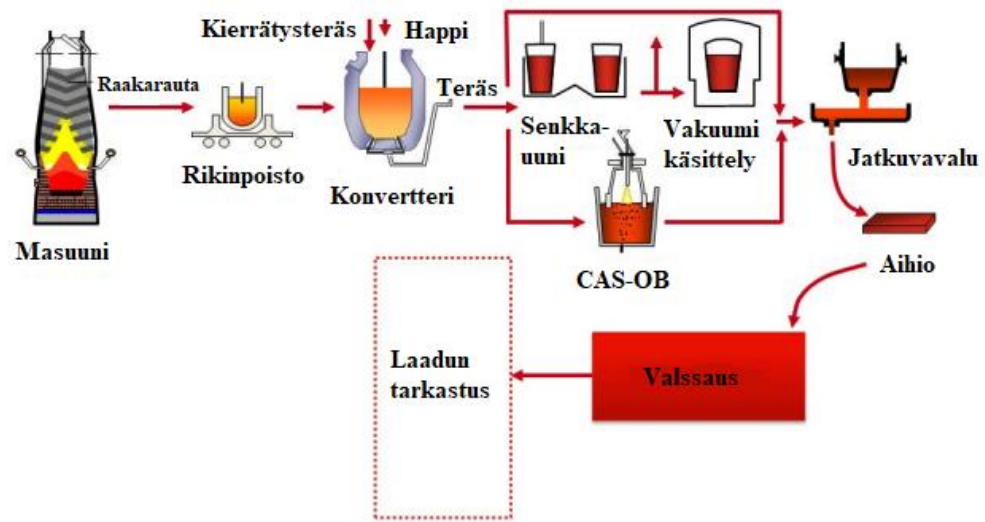
Yhdistelmäpuhalluskonvertterilla valmistetaan raakaraudasta ja kierrätysteräksestä raakaterästä, joka seostetaan karkeasti kaadon yhteydessä konvertterilla. Prosessissa poistetaan hiiltä sekä muita alkuaineita lanssin happipuhalluksella samalla sekoittaen pohjapuhalluksella tehokkaamman mellotuksen saavuttamiseksi. Palamisreaktiot tuottavat suuren määrän lämpöä nostaten raakaraudan lämpötilan 1250 °C:sta raakateräksen noin 1650 °C:een. (Wang et al. 2010)

Mittaukset ovat konvertterissa vallitsevissa olosuhteissa vaikeita toteuttaa sekä kaikkia konvertterissa tapahtuvia ilmiöitä ei tunneta täysin, joten mallien luominen on haastavaa. Tarkemmilla malleilla ja mittauksilla pystytään esimerkiksi panostamaan suurempia romumääriä ja nostamaan lämpötilaa, kun tiedetään hiilimonoksidin ja hiilidioksidin suhde. Näin prosessista saadaan ympäristöystävällisempi sekä taloudellisempi. (Wang et al. 2010)

Tämä kandidaatin tutkielma on rajattu yhdistelmäpuhalluskonverttereihin ja siinä on käytetty esimerkkinä LD-KG-konvertteria (Linz-Donawitz-Kawasaki Gas). Työn tavoitteena on selvittää, mitä teräskonvertteriprosessissa tapahtuu kuvailemalla se yleisesti sekä kartoittaa erilaiset mittaus- ja mallinnumahdollisuudet tehokkaamman prosessin saavuttamiseksi.

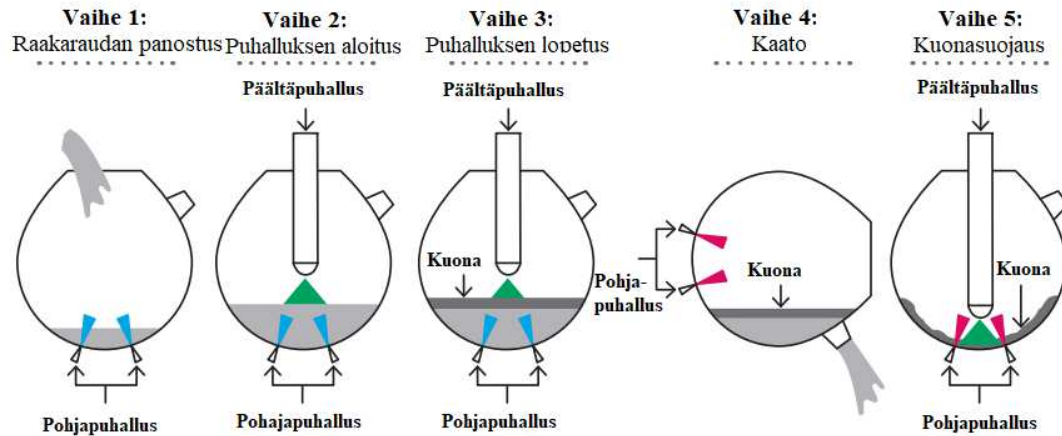
2. TERÄSKONVERTTERIPROSESSI

Konvertteriprosessin päätavoitteina ovat muun muassa sulattaa kierrätysteräs, nostaa teräksen lämpötilaa sekä laskea hiilipitoisuutta happipuhalluksen avulla. Integroidussa terästehtaassa konvertteri sijaitsee masuunin ja senkkäkäsittelyn välissä, kuten kuvasta 1 nähdään. (Díaz et al. 2019; Jalkanen and Holappa 2014)



Kuva 1. SSAB Raahe terästehtaan prosessikaavio. Mukailleen lähteestä (Takalo-Mattila et al. 2022).

Konvertteri on panosreaktori, jossa käytetään panoksena masuunilta tulevaa raakarautaa sekä kierrätysterästä. Ennen puhallusta ja sen aikana konvertteriin annostellaan lisäaineita, joilla voidaan hallita teräksen lämpötilaa sekä kuonan muodostusta ja sen rakennetta. Raakaterästä puhalletaan puhtaalla hapella riippuen panoskoosta ja halutusta hiilipitoisuudesta 15–20 minuuttia. Samalla konvertterin pohjasta puhalletaan inerttiä kaasua (yleensä tyypeä tai argonia), joka tehostaa sekoittumista. Puhalluksen jälkeen teräksestä mitataan lämpötila sekä otetaan tarvittaessa näyte teräksen seostusta varten. Vaadittujen alkuainepitoisuuksien täytyessä, teräs kaadetaan terässenkkään sekä annostellaan seos- ja peitosaineet. Kaatotapahtuman jälkeen terässenikka siirtyy senkkäkäsittelyyn ja konvertteri panostetaan uudelleen. Prosessi kestää yleensä noin puoli tuntia. Konvertteriprosessin vaiheet on esitetty kuvassa 2 ja niitä käsitellään tarkemmin tulevissa alakappaleissa.



Kuva 2. Konvertteriprosessin eri vaiheet. Mukailten lähteestä (Makwana et al. 2021).

2.1 Panostus

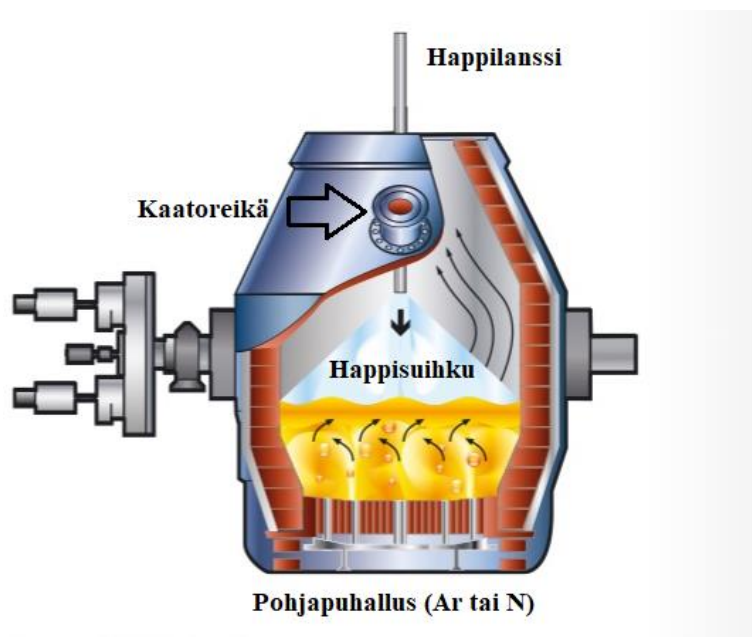
Panostusta voidaan pitää konvertteriprosessin ensimmäisenä vaiheena, kuten kuvan 2 vaiheessa yksi esitetään. Konvertterin panos koostuu pääasiassa raakaraudasta sekä kierrätysteräksestä. Wang et al. (2010) mukaan 85 % konvertterin panoksesta on raakarautaa ja 15 % on kierrätysterästä. Raakarauta tulee masuunilta masuunisenkoissa lämpötilan ollessa noin 1250 °C ja hiilipitoisuuden noin 4 %. Ennen konvertteriin panostusta raakaraudalle tehdään rikinpoisto rikinpoistoasemalla ja kaadetaan mikseriin. Mikseristä annostellaan tarvittava raakarautamäärä panoskoon mukaan. Kierrätysteräksen koostumukseen, määrään ja alkuainepitoisuuksiin voidaan myös vaikuttaa. Kierrätysteräspanos valmistellaan etukäteen ennen panostusta. Panoksen kappaleiden koko ja laatu päätetään teräsladun reseptin mukaan. Haastavammilla laaduilla vältytään yllätyksiltä teräksen seostusvaiheessa, kun tiedetään että kierrätysteräksessä ei pitäisi olla suuria pitoisuuksia alkuaineita, joita ei sieltä voida enää poistaa. (Miller et al. 1998)

Konvertteriin syötetään lisäaineita kuonan muodostamiseksi, vuorauksen suojaamiseksi ja lämpötilan hallinnan vuoksi. Kalkkia lisätään ennen puhallusta ja puhalluksen aikana, jotta kuonan koostumus on oikeanlainen puhallukselle. Kalkki laskee kuonan happamuutta ja muuttaa sen emäksiseksi. Kuonalta vaaditaan kykyä suojata vuorausta ja sitoa epäpuhtauksia, kuten fosforia. (Metallinjalostajat 2014)

Puhalluksen loppulämpötilan nostamiseen voidaan käyttää ferropiitä ja sen laskemiseen sintteriä. J. Ruuska et al. (2003) mukaan 120 tonnin panoskoolla 100 kg:n piilisäys 1600 °C lämpötilassa nostaa teräksen lämpötilaa tehdasdatasta lasketun toteuman mukaan 25 °C ja 200 kg sintterilisäys laskee lämpötilaa 12,5 °C. Näillä lisäyksillä operaattori pystyy varmistamaan, että lämpötila riittää jatko-prosessointiin senkkäkäsittelyssä sekä ennen valua lämpötila on oikea.

2.2 Puhallus

LD-KG-konvertterissa käytetään kahta puhallustapaa yhtä aikaa kuten kuvasta 3 nähdään. Konvertterin päältä laskeutuvalla happilanssilla puhalletaan puhdasta happea teräkseen ja samalla konvertterin pohjasta puhalletaan inerttiä kaasua sekoituksen tehostamiseksi (Makwana et al. 2021). Puhallus tehdään erilaisien mallien ja mittauksien avulla. Keskeisimpiä mittauksia ovat savukaasun lämpötila puhalluksen aikana sekä pudotussondeilla saatavat suuntaa antavat lämpötila ja hiilipitoisuus. (Wang et al. 2010; Ruuska et al. 2005)



Kuva 3. Yhdistelmäpuhalluskonvertteri. Mukailten lähteestä (Metallinjalostajat 2014).

2.2.1 Päältäpuhallus

Raakateräksen puhalluksen tavoitteena on poistaa mellotusreaktiolla raudasta hiiltä ja fosforia hapen avulla sekä nostaa teräksen lämpötila 1250 °C:sta noin 1650 °C:en. (Wang

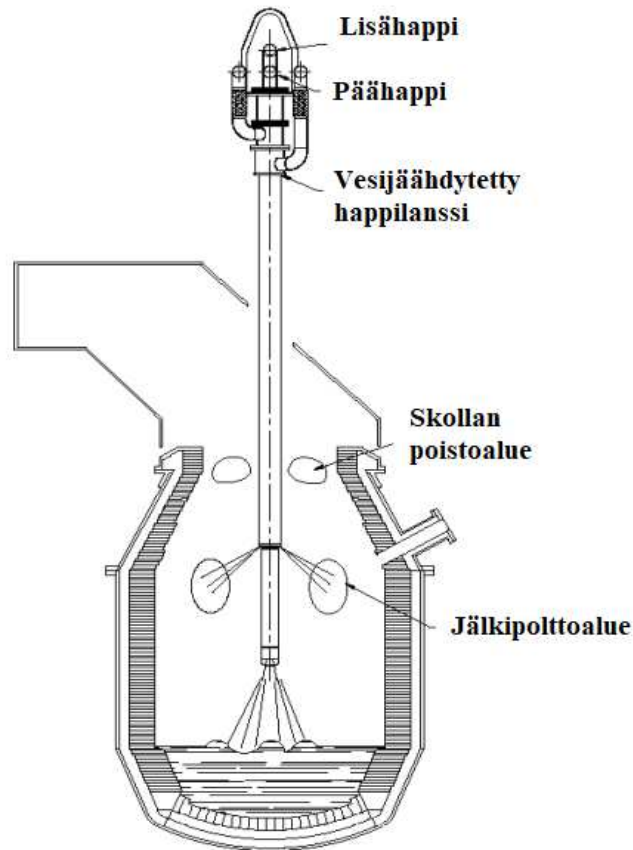
et al. 2010). Keskeisimpiä alkuaineita puhalluksessa ovat mangaani, fosfori, pii, hiili sekä rauta. Nämä muodostavat hapen kanssa erilaisia oksideja. Reaktiot muodostavat teräksen pinnalle nestemäisen kuonan sekä synnyttävät paljon lämpöä. (Miller et al. 1998)

Puhallus tapahtuu konvertterin päältä laskeutuvalla happilanssilla, jossa on vesijäähdytys. Lanssin korkeudella säädellään kuonan koostumusta ja alkuaineiden palamista. Korkeampi lanssi polttaa piitä ja vaikuttaa kuonanmuodostumisen kautta fosforin poistumiseen teräksestä. Lanssia laskemalla tehostetaan hiilen palamista. Hiilen pitoisuus teräksessä laskee puhalluksen aikana noin 4 %:a alle 0,2 %:in teräslaadun mukaan. (Metallinjalostajat 2014)

Lanssissa on kuparista ja teräksestä valmistettu suutin, jolla puhalletaan teräkseen happea ylääänennopeudella (Sumi et al. 2006). Suuttimet ovat kartion muotoisia ja näiden muoto vaikuttaa olennaisesti happisuihkun muotoon. Oikeanlainen suihku parantaa tunkeutumista teräkseen (Yuan et al. 2007). Konvertterin päällä näitä voi olla kaksi, joista toinen on jälkipolttolanssi. Jälkipolttolanssiin on lisätty happisuuttimia, jotka sijaitsevat 1,23 m ja 3,78 m välillä lanssin päästä mitattuna, kuten kuvassa 3 on esitetty.

Suuttimet ovat korkean hiilimonoksidipitoisuuden alueella, ja niistä virtaava happi hapettaa hiilimonoksidin hiilidioksidiksi. Hapetusreaktiossa syntyy lämpöä ja sillä voidaan vaikuttaa konvertterin suualueen skollautumiseen. Se helpottaa myös skollan poistoa mekaanisesti, koska skolla on pehmeämpää. (Valentas et al. 2007)

Jälkipolttoa pitää seurata ja käyttää harkiten, koska savukaasun lämpötila voi nousta niin korkeaksi, että se vahingoittaa vuorausta ja huuvaa. Kaiken hiilimonoksidin hapettaminen hiilidioksidiksi on mahdotonta, koska nestemäinen rauta alkaisi hapettumaan merkittävästi. (Oghbasilasie and Holappa 1997)



Kuva 4. Konvertterin jälkipolttolanssi. Mukailten lähteestä (Valentas et al. 2007).

2.2.2 Pohjapuhallus

Yhdistelmäpuhalluskonvertterin pohjassa on reikätiiliä, joista virtaa kaasua. Pohjapuhallus toimiessaan tuo taloudellisia säästöjä, koska se tehostaa mellotusreaktiota merkittävästi kasvattamalla teräksen pinta-alaa (Makwana et al. 2021). Suurempi määrä pieniä teräspisaroita nostaa todennäköisyyttä törmätä vapaaseen happimolekyyliin (Miller et al. 1998). Kaasu, jota pohjapuhalluksessa käytetään, on inertti eli se ei reagoi teräksen tai kuonan kanssa. Puhalluksen alussa pohjapuhalluksessa käytetään tyypeä taloudellisista syistä, mutta loppupuolella se vaihdetaan argoniin matalamman tyypipitoisuuden saavuttamiseksi teräksessä. Typpi on halvempaa kuin argon, mutta se on samalla epäpuhtaus, jota ei haluta teräkseen. Kuvassa 2 kuvataan tilannetta puhalluksen alussa vaiheessa kaksi ja lopussa vaiheessa kolme. Konvertterin pohjasta on puhallettava kaasua koko ajan, jotta reiät eivät tukkeudu, mutta tämän estäminen

kampanjan loppupuolella on vaikeaa vuorauksen kulumisen tai kuonautumisen vuoksi. Pohjasuuttimien sulkemisen jälkeen mellotus ei ole niin tehokas ja vaativampien teräslaatuojen tekeminen on vaikeaa tai mahdotonta. (Ruuska 2012; Makwana et al. 2021)

2.3 Kaato

Puhalluksen loputtua teräksestä mitataan lämpötila ja otetaan näyte tarvittaessa. Konvertteria kallistetaan taaksepäin, jotta näytteiden ottaminen käsin on mahdollista (Zhou & Tang 2021). Teräsnäyte otetaan näytesondilla, joka lähetetään laboratorioon analysoitavaksi. Lämpötila mitataan lämpösondilla tai Celox-sondilla, joka mittaa teräksen happipitoisuutta (Aula et al. 2014). Nämä mittaukset voidaan tehdä myös pudotussondeilla. Kaatoa havainnollistaa kuvan 2 neljäs vaihe.

Ennen teräksen kaatoa käytetään erilaisia malleja, jotka laskevat seosaineiden määrän haluttuun teräslaatuun laboratorion tuloksien perusteella tai pelkän mallin avulla. Seosaineet punnitaan vaaoilla ja kaato aloitetaan kallistamalla konvertteria eteenpäin ja kaadetaan teräs esilämmitettyyn terässenkkaan. Samaan aikaan seosaineet annostellaan terässenkkaan automaattisesti, jotta seosaineet sekoittuisivat mahdollisimman hyvin. Viimeisenä senkkaan annostellaan erilaisia kalkkeja, kuten dolomiittia ja bauksiittia, eristeeksi. Konvertterilla voidaan tehdä karkea seostus, mutta tarkkuutta vaativat terässeokset seostetaan senkkäkäsittelyssä. Lisäksi helposti palavina seosaineita, kuten titaania, ei kannata konvertterilla seostaa. (Aula et al. 2014; You et al. 2021)

Terässenkkaan ei saa päästää kuonaa, koska se sisältää kaikki epäpuhtaudet eikä niiden haluta liukenevan teräkseen uudelleen. Konvertterikuona vaikeuttaa teräksen jatkokäsittelyä, kuten fosforin poistamista. Kaatoreiän virrasta voidaan infrapunakameralla erottaa, milloin teräs vaihtuu kuonaksi. Kuonan ja teräksen pystyy erottamaan silmämääräisestikin teräksen pinnasta, mutta sitä käytetään yleensä vain vikatilanteissa. Operaattorin tai automaatin huomattessa vaihdoksen laukaistaan kuonanpidätin ja konvertteri nostetaan samaan aikaan pystyasentoon. Kuonanpidättimiä tai stoppareita voi olla erilaisia eri tehtailta. Käytössä on esimerkiksi pneumaattisia stoppareita, liukuvalla portilla toimivia stoppareita ja kuonatikka (engl. slag dart). (Pistorius 2019)

Kaadon jälkeen konvertterin vuoraukselle kuonakerroksen paksuuden mukaan voidaan tehdä kuonasuojaus, kuten kuvan 2 viidennessä vaiheessa esitetään. Kuonanpidättimen lyödessä, kuonaa ei kaadeta kuonapataan, vaan konvertteri nostetaan pystyasentoon ja lanssilla sekä pohjapuhalluksella puhalletaan kuonaa työllä. Tavoitteena on levittää kuona ympäri vuorausta ja vähentää näin tiilien kulumista. (Makwana et al. 2021)

3. MITTAUKSET

Konvertterissa on hyvin haastavat olosuhteet mittauksien kannalta, joten usein käytetään epäsuoria mittauksia sekä malleja prosessin ennustamiseen. Tärinä, korkea lämpötila, pöly sekä kemialliset ja fysikaaliset ilmiöt, joita ei kunnolla tunneta, tekevät suorista mittauksista haastavia. (Ruuska 2012)

3.1 Teräksen lämpötilan mittaus

Yleensä, jos teräksestä on tarpeellista ottaa näyte laboratorioon analysoitavaksi, operaattori samalla mittaa teräksen lämpötilan kertakäyttöisellä lämpöparilla. Tällä tavalla saadaan selville teräksen todellinen lämpötila. (Díaz et al. 2019)

Teräksen lämpötila voidaan mitata myös puhalluksen aikana tai sen loputtua pudotussondilla. Pudotussondi pudotetaan pudotussondilaitteella teräkseen ja jää kellumaan sen pinnalle. Sondi ehtii haastavista olosuhteista huolimatta lähettää signaalin takaisin ohjausjärjestelmälle ennen tuhoutumistaan. Pudotussondia käytetään noin 2 minuuttia ennen puhalluksen loppua, jotta sulan lämpötilaan voidaan vielä vaikuttaa lisäainelisäyksillä. Dynaamisten mallien tueksi tarvitaan pudotussondien mittatietoja, koska konvertterissa on niin paljon tuntemattomia muuttujia. (Ruuska & Leiviskä 2004)

Teräksen lämpötilan epäsuoraan mittaukseen on kehitetty muitakin menetelmiä. Lähteessä (Wang et al. 2012) on kehitetty menetelmä, jossa teräksen ja kuonan pinnalla olevaa liekkiä analysoidaan. Liekin lämpötilan mittaus perustuu eri alkuaineiden, kuten kaliumin ja natriumin, liekin spektreihin sekä niiden intensiteettien suhteeseen. Hieman yleisempi ja vanhempi tapa mitata lämpötilaa on käyttää apulanssia. Apulanssi lasketaan teräkseen puhalluksen loppuun ja lanssin päässä oleva anturi mittaa teräksen lämpötilan. Konvertteria ei tarvitse kallistaa apulanssia käytettäessä, kuten esimerkiksi käsin mitattaessa. Näin lämpötila ei pääse laskemaan kallistuksen vaikutuksesta. Apulanssit ovat väistymässä kuitenkin pudotussondien tieltä taloudellisista syistä pienillä ja keskikokoisilla konverttereilla. (Lu et al. 2014)

3.2 Teräksen happipitoisuuden mittaus

Teräksen happipitoisuuden mittaus on tärkeässä roolissa puhalluksen kannalta. Happipitoisuudesta voidaan päätellä esimerkiksi teräksen hiilipitoisuus ja kuinka paljon teräksen tiivistykseen tarvitaan seosaineita kaadon yhteydessä. Esimerkiksi matala happipitoisuus on ehtona onnistuneelle rikinpoistolle, joten oikea mittaustulos on kriittinen korkealaatuista terästä valmistessa. (Aula et al. 2014)

Teräksen tiivistäminen tarkoittaa ylimääräisen hapen poistamista polttamalla se esimerkiksi piillä tai alumiinilla teräslaadun mukaan (Mochizuki et al. 1990). Etunäytteestä saatavalla hiilipitoisuudella sekä mitatulla teräksen happipitoisuudella on mahdollista laskea hiilen ja hapen suhde teräksessä puhalluksen loputtua. Suhteella voidaan arvioida pohjapuhalluksen tehokkuutta, koska sillä on suora vaikutus hapen määrään teräksessä (Makwana et al. 2021). Matala happipitoisuus on ehtona onnistuneelle rikinpoistolle.

Käsimitoituksessa ja pudotussondeissa laajasti käytössä oleva happipitoisuuden mittausmenetelmä perustuu zirkoniumdioksidi-happisensoreihin. Sensorin toiminta perustuu hapen vakio-osapaineen saavuttamiseen. Varsinainen mitattava arvo saadaan Nernstin jännitteestä platinalla päällystettyjen elektrodien välille muodostuessa jänniteero happi-ionien liikkua. (Harris & Collings 2015)

Teräksen happipitoisuutta voidaan mitata automaattisilla pudotussondeilla samalla tavalla puhalluksen jälkeen kuin lämpötilaa. Lämpötilasondin sijaan pudotussondilaitteisto pudottaa happisondin. Happisondi lähettää signaalin ohjauslaitteelle ja järjestelmä laskee happipitoisuuden signaalista. (Ruuska & Leiviskä 2004)

3.3 Konvertterin vuorauksen mittaus

Konvertterin vuorauksen kulumista pitää seurata kampanjan aikana, jotta vuoraus kuluu halutulla tavalla sekä oikeista kohdista. Suurinta kulutus on konvertterin pohjassa ja panostuskohdalla, johon sula raakarauta ja romupanos osuvat panostuksessa. Jos vuoraus kuluu liikaa jostakin kohdasta, siihen pystytään vaikuttamaan ja reagoimaan tarpeeksi ajoissa mittauksien ansiosta. Konvertterin vuorauksen mittauksia pyritään tekemään

päivittäin ja mieluummin useammin, jos tuotantoon tulee viiveitä. Viimeisintä mittaustulosta vertaamalla edelliseen nähdään suoraan, paljonko vuoraus on kulunut tai kuonautunut eri kohdista. Työturvallisuuden kannalta mittaukset ovat oleellisia, koska mitta-arvojen alittaessa turvalliset rajat konvertteri hylätään puhkeamisvaaran vuoksi. (Hubble et al. 1998)

Konvertterin vuorauksen lasermittaus on yleisin tapa mitata vuorausta. Mittaus perustuu kalibroitujen pisteiden kautta takaisinheijastuvaan lasersäteeseen. Tietokone muodostaa näistä pisteistä kuvan koko konvertterista, jossa näkyy vuorauksen kuluminen eri alueilla. Kuvan perusteella voidaan paikata vuorausta kuluneista kohdista tai poistaa skollaa liian paksuilta alueilta. Näin maksimoidaan vuorauksen kesto ja optimaalinen muoto mellotusreaktiolle. (Hubble et al. 1998)

Infrapunakameran hyödyntämistä konvertterin vuorauksen mittauksessa on tutkittu lähteessä (Kauppinen et al. 1999). Tutkimuksessa huomattiin, että lämpötilan skannaamista on mahdollista hyödyntää terästeollisuudessa. Infrapunamenetelmän etuna laseriin verrattuna on se, että prosessia ei tarvitse keskeyttää vuorauksen mittauksen ajaksi, joka vähentää vuorauksen lämpötilavaihtelua sekä mahdollistaa jatkuvan puhallusprosessin. Tällä saavutetaan huomattavia taloudellisia etuja.

3.4 Savukaasujen mittaukset

Savukaasujen mittaukset ovat hyvin olennaisessa osassa puhalluksen dynaamisen mallin muodostamisessa. Savukaasujen perusteella voidaan tehdä muutoksia esimerkiksi lanssin korkeuteen tai itse lanssiin vaihtamalla se jälkipolttolanssiin. Savukaasuista mitataan pääasiassa lämpötilaa sekä hiilimonoksidin ja hiilidioksidin suhdetta. Muita mitattavia kaasuja, joita käytetään konvertterin hallintaan, ovat happi, typpi, vety ja argon. (Zhi-Gang et al. 2003)

Tarkoilla mittauksilla prosessin mallit paranevat ja syntyy taloudellisia säästöjä, kun saanto paranee sekä lisäpuhalluksien määrä vähenee. Savukaasujen mittauksien perusteella on mahdollista laskea päästöjä sekä käyttää enemmän kierrätysterästä, koska jälkipolttua voidaan ohjata tarkemmin. (Zuliani et al. 2010)

Savukaasun hiilimonoksidin ja hiilidioksidin konsentraatiota sekä lämpötilaa voidaan mitata lähteen (Sandlöbes et al. 2011) mukaan FTIR:ään perustuvalla systeemillä reaaliaikaisesti. Prosessissa syntyvä pöly tuo haasteita mittauksiin yleisesti, mutta tällä menetelmällä pölyn vaikutus voidaan jättää huomioimatta pidettäessä säteet keräävä linssi puhtaana. Etuna massaspektrometriin nähden on hieman lyhyempi viive, joka on lähteen (Schlautmann et al. 2011) mukaan ollut alle yhdeksän sekuntia. Se voi olla tarpeeksi pieni, että sitä ei tarvitse huomioida konvertterin ohjaavassa mallissa.

FTIR-mittauksen nimi tulee mittaustekniikan englanninkielisestä nimestä Fourier transform infrared spectroscopy. Mittaustekniikka perustuu nimensä mukaan infrapunasäteilyyn, josta Fourier-muunnoksella muutetaan data oikeaan muotoon. Laitteella mitataan, näytteen absorboimaa valoa tietyillä aallonpituuksilla (Smith 2011).

Useampi teräksen valmistaja on ottanut lähteen (Zhi-Gang et al. 2003) mukaan käyttöön savukaasujen analyysisysteemin, joka hyödyntää massaspektrometriä savukaasujen analysoinnissa. Systeemissä on kaksi näytteenottoputkea (engl. sample probe) savukaasuputkessa jatkuvan mittauksen varmistamiseksi. Jos toinen putki tukkeutuu, tukkeutunut putki puhdistetaan automaattisesti lyhyillä, korkeapaineisilla typpipurkauksilla. Kaasunäyte puhdistetaan hiukkasista suodattamalla ja lähetetään lämmitettyjä putkia pitkin massaspektrometrille veden kondensoitumisen minimoimiseksi. Massaspektrometri perustuu näytteen ionisointiin ja muodostuneiden ionien massan mittaukseen. Laite sisältää ionilähteen, massa-analysaattorin sekä ionien havaitsimen. Massaspektrometriä käytettäessä tulee ottaa huomioon kuollut aika, joka on lähteen (Schlautmann et al. 2011) mukaan 27 sekuntia. (Gross 2006; Cordova et al. 2007)

4. MALLIT

Teräskonvertteriprosessi on monimutkainen ja olosuhteet ovat ankarat. Prosessin ennustaminen on vaikeaa, koska suorita mittauksia edellä mainituista syistä on vaikea toteuttaa ja mittaukset voivat olla epätarkkoja tai epäonnistua. Konvertterin ohjaukseen on kehitetty malleja, joiden avulla puhalluksen ennustaminen on helpompaa. Nykyisin on käytössä staattisia ja dynaamisia malleja sekä niiden eri variaatioita, jotka hyödyntävät mittauksia, kuten savukaasuanalyysin ja pudotussondien tuloksia puhalluksen ennustuksessa. (Han & Wang 2011)

4.1 Dynaamiset mallit

Teräksen valmistuksessa on yleensä käytetty staattisia prosessimalleja, mutta ne eivät ota huomioon puhallusten aikana tapahtuvia muutoksia. Dynaamiset mallit käyttävät konvertterista saatuja mittausrvoja hyväkseen puhalluksen ennustuksessa. Dynaamisten mallien etuna staattisiin malleihin on juuri mittausten hyväksikäyttö sekä parempi tarkkuus. Mallit tarvitsevat avukseen staattista mallia lähtöpisteekseen. (Schlautmann et al. 2011; Jalkanen & Holappa 2014; Gu et al. 2021)

Lähteessä (Schlautmann et al. 2011) esitellään konvertteriprosessiin suunnitellun dynaamisen mallin rakenteita ja perusteita, joita on käytetty Saksassa Saerstahlin terästehtaalla. Dynaamiset prosessimallit koostuvat massa- ja energiataseista sekä reaktiokinetiikan yhtälöistä. Yhtälöiden lasku suoritetaan sykleissä aika-akselin suhteen, joka ottaa huomioon esimerkiksi lisäaineiden lisäyksen sekä prosessin kaasuvirtaukset, kuten lanssin happivirran ja pohjapuhalluksen. Malli siis koostuu useista eri malleista, jotka on yhdistetty toisiinsa muodostaen yhden monimutkaisen mallin, joka mahdollistaa puhalluksen loppupisteen ennustamisen ja jatkuvan monitoroinnin puhalluksen aikana.

Malliin syötetään kolme erilaista syötettä, jotka sisältävät useita tarkempia arvoja. Panosmäärä sekä sen analyysistä saatavia arvoja ovat esimerkiksi massa, alkuainepitoisuudet ja referenssialpiat. Toisena malliin syötetään kaasuvirtaukset, jotka sisältävät esimerkiksi pohjapuhalluksen inertin kaasuvirran sekä lanssin happivirtauksen. Kolmantena mallin laskennassa käytetään savukaasuvirtausta sekä savukaasujen analyysiä, josta selviää esimerkiksi hiilidioksidin ja hiilimonoksidin suhde. Mallin laskennan ulostulona on teräksen lämpötila, teräksen ja kuonan analyysi sekä

lopullinen teräksen määrä puhalluksen jälkeen. Teräksen määrää ei voi suoraan laskea panostetun kierrätysteräksen ja raakaraudan määrästä, koska puhalluksen aikana panostetusta raudasta osa palaa ja liukenee kuonaan (Schlautmann et al. 2011).

Laskennassa käytettävät mallit voidaan jakaa metallurgisiin malleihin ja lämpötilamalleihin. Metallurgisen lämpötaseen määrittämiseen tarvitaan terässulan ja kuonan massa sekä koostumuksen syklisiä laskentaa. Konvertterissa tapahtuvien reaktioiden, kuten hiilen palaminen, fosforin poisto ja metallien kuonautuminen, sekä panostetun materiaalin syöttöarvot huomioidaan mallissa. Konvertterin happitaseen laskemisella voidaan arvioida teräksen loppulämpötilaa. Hapetusreaktioita tapahtuu konvertterissa useita erilaisia samalla tuottaen paljon lämpöä. Happitaseen määrittämisessä käytetään esimerkiksi edellä mainittuja hiilen ja fosforin palamisreaktioiden reaktiokinetiikkaan sekä termodynamiikkaan perustuvia laskuja, hiilimonoksidin jälkipolttoa hiilidioksidiksi sekä raudan ja muiden metallien, kuten piin ja titaanin, palamisreaktioita. Myös lämpötilamalli hyödyntää palamisreaktioita, mutta se ottaa huomioon energiahäviöt. Prosessista häviää energiaa esimerkiksi lämpösäteilynä, savukaasun ja rautapölyn mukana sekä johtamalla konvertterin seinistä. Teräksen lopullisen lämpötilan ennustus muodostetaan vallitsevan energiasisällön ja tarvittavan energiasisällön eron perusteella. Tarvittava energiasisältö lasketaan panostetun materiaalin entalpioista (Schlautmann et al. 2011).

Kaupallinen esimerkki samaa tekniikkaa hyödyntävästä dynaamisesta ohjausmallista on Ruotsissa kehitetty MEFCON-systeemi, joka niin ikään perustuu lämpö- ja massataseiden ennustukseen ja käyttää näitä taseita mallin muodostamiseen. Systeemi pystyy näistä mittauksista havaitsemaan muutokset puhalluksen käyttäytymisessä, jonka ansiosta niihin voidaan reagoida sekä tehdä tarvittavat muutokset. MEFCON tarvitsee massa- ja lämpötaseiden laskemiseen mitattuja arvoja konvertteriprosessin useista eri osista. Mallin käyttämiä mitattuja ja analyseistä saatavia arvoja ovat esimerkiksi lanssin happivirtaus, pohjapuhalluksen kaasuvirtaukset, raakaraudan massa ja alkuainepitoisuudet, teräksen lämpötila ja hiilipitoisuus, lisäainemäärät sekä savukaasun hiilimonoksidi, hiilidioksidi- ja happipitoisuudet. MEFCON muodostaa pääasiassa massataseet hiilelle, hapelle sekä kuonan ja muiden metallien komponenteille. Lämpötila lasketaan lämpötaseesta, joka huomioi esimerkiksi reaktiossa syntyvän lämmön ja raaka-aineiden lämpötilan sekä lämpöhäviöt. Eri metallien, kuten piin, mangaanin, fosforin, kromin ja raudan pitoisuudet lasketaan happitaseesta. Kuonan muodostamiseen tarvittava happimäärä jaetaan

kuonanmuodostajametallien kanssa puolitasapainoyhtälöiden mukaan ja konvertterissa jäljellä oleva happimäärä lasketaan. MEFCON muodostaa näistä mittauksista ja taseista lopputuloksena kuona- ja metallianalyysin sekä teräksen lämpötila-arvion. (Hahlin 1993)

Dynaamisia malleja kehitetään jatkuvasti ja niihin voidaan kehittää tarkempia, pienempiä malleja, jotka voidaan lisätä käytössä olevaan konvertterin ohjausmalliin, kuten lähteessä (Schlautmann et al. 2017). Lähteessä on kehitetty yksityiskohtaisempaa mallia fosforinpoistoon, joka on lisätty ja testattu lähteen (Schlautmann et al. 2011) mallissa. Fosforinpoistomalli perustuu fosforinpoiston tarkempaan tutkimukseen ja monivyöhykerekreatiomalliin (engl. multi-zone reaction model). Tutkimuksissa tarkasteltiin fosforinpoistoon liittyvää kinetiikkaa sekä termodynamiikkaa. Laboratoriokokeilla selvitettiin kalkin liukenemistä kuonaan sekä saatiin tietoa fosforinpoiston pääkontaktialueista. Lisäksi käytettiin hyväksi CFD-mallinnusta sekoitus- ja virtauskäyttäytymisen selvittämiseksi, kehitettiin fosforinpoistoon liittyvä termodynaaminen tietokanta sekä tarkasteltiin aiheeseen liittyvää kirjallisuutta. Tutkimuksista muodostettiin alimalleja, joita voitiin testata monivyöhykerekreatorimallissa ja edelleen konvertterin ohjauksessa käytettävässä online-mallissa. Monivyöhykerekreatiomallissa kokeiltiin kahden ja neljän vyöhykkeen jakoa. Konvertteri jaettiin kahden vyöhykkeen mallissa metallisulaan ja kuona-/metalliemulsioon. Neljän vyöhykkeen mallissa prosessi jaettiin metallisulaan, kuona-metalli-rajapinnan reaktiiviseen osaan ja epäreaktiivisen kuonan osaan sekä hotspottiin. Prosessi etenee eri tavalla näillä vyöhykkeillä, joten jakaminen eri vyöhykkeisiin auttaa ymmärtämään paremmin termokemiallisia yhteyksiä faasien ja komponenttien välillä sekä parantaa mallin tarkkuutta. Tästä syystä kahden vyöhykkeen malli jaettiin vielä kahteen pienempään osaan. (Schlautmann et al. 2011)

Mangaanin poistoon on kehitetty dynaaminen malli lähteessä (Rout et al. 2018). On tärkeää tietää, kuinka mangaani käyttäytyy, koska mangaania käytetään parantamaan teräksen ominaisuuksia. Mangaani kuitenkin aiheuttaa konvertterin vuorauksen kulumista sekä saannin heikkenemistä. Malli laskee mangaanin poistumista konvertterin eri osissa, kuten lanssin hotspotin alueella. Tärkein tekijä mangaanin poistossa oli pisaran halkaisijan suuruus, koska pienemmät pisarat saavuttavat tasapainotilan nopeammin kuin suuret. Tämä vaikutti merkittävästi mangaanin konversioon kuonan ja metallin välillä.

4.2 Staattiset mallit

Konvertterin staattisia malleja käytetään yleensä puhalluksen loppuarvojen ennustukseen. Staattiset mallit voidaan jakaa edelleen datapohjaisiin ja teoreettisiin malleihin. Mallit perustuvat energia- ja massataseisiin, jotka ottavat huomioon laskennassa useita eri muuttujia. Malli huomioi esimerkiksi arviot tarvittavasta hapen määrästä puhalluksessa, lämpöhäviöistä, jäähdytys- tai lämmitysmateriaalin määrästä, kalkin määrästä kuonan muodostuksessa, loppulämpötilan ja hiilipitoisuuden tähtäyksestä. Konvertterin puhallusprosessiin vaikuttavat useat tuntemattomat muuttujat sekä ilmiöt, jotka tekevät mallin ennustustarkkuudesta rajallisen verrattuna dynaamiseen malliin. (Jalkanen & Holappa 2014; Gu et al. 2021)

Datapohjaiset ja teoreettiset mallit ovat hyvin yleisiä konvertteriprosessin ennustamisessa. Vaikka mallit ovat yleisiä, ei ole helppoa tehdä mallia, joka pystyy kuvaamaan prosessin teoreettisesti. Usein käytetään myös näiden kahden yhdistelmiä, jotta staattisesta mallista saataisiin tarkempi. Datapohjaiset mallit käyttävät hyväkseen prosessidatahistoriaa mallinnukseen ja oppimiseen. Mallit ovat jatkuvan kehityksen alla, koska uusia mittauslaitteita kehitetään koko ajan prosessin tuntemattomien muuttujien ja tapahtumien selvittämiseksi. (Takawa et al. 1987; Schlüter et al. 2014)

Lähteessä (Uebber et al. 2012) luotiin datan louhintamalli, joka perustuu tukivektorikoneeseen (engl. support vector machine). Malli ennusti puhalluksen loppuarvoja, joita olivat puhalluksen loppulämpötila, hiilipitoisuus, fosforipitoisuus sekä kuonan rautapitoisuus. Malli käyttää hyväkseen savukaasuanalyysin tuloksien ja lanssin jäähdytyssysteemin arvojen lisäksi uusia mittausmenetelmiä. Lanssissa oli kiihtyvyyssanturi ja pyrometri sekä akustinen monitorointijärjestelmä lisättiin konvertterin suulle. Malliin voidaan syöttää monia staattisia muuttujia, kuten kierrätysteräksen määrä ja konvertterin sekä lanssin ikä. Lähteen (Uebber et al. 2012) mukaan mallin ennustustarkkuus on parempi kuin metallurgisten mallien.

Tapauskohtaisen päättelyn (engl. case-based reasoning) hyödyntämistä konvertterin puhallettavan happimäärän hallinnassa on tutkittu lähteessä (Gu et al. 2021). Tapauskohtainen päättely koostuu tapauksen kuvauksesta, tapauksen hakemisesta, tapauksen uudelleen käytöstä sekä tapauksen tarkistuksesta ja säilyttämisestä. Menetelmä

pyrkii hyödyntämään konvertterin tapauksessa edellisiä saman teräslaadun sulatuksia ja parantamaan mallia.

Ensimmäisenä mallille kuvataan ongelma sekä sen diskreetit ja jatkuva-arvoiset puhalluksen muuttujat. Puhalluksen diskreettejä muuttujia ovat esimerkiksi puhalluksen loppulämpötila sekä haluttu hiilipitoisuus. Jatkuva-arvoisia muuttujia, joita käytetään, ovat kierrätysteräksen ja kalkin määrä sekä raakaraudan ominaisuudet. Tapausta voidaan hakea annettujen muuttujien perusteella hyödyntäen erilaisia laskukaavoja tai geometrisia samankaltaisuuksia. Tarpeeksi lähellä olevan tapauksen löytyessä sitä voidaan käyttää puhallukseen tai mahdollisesti muokata, jos se nähdään tarpeelliseksi. Jos tapaus todetaan toimivaksi, se voidaan tallentaa tietokantaan. (Gu et al. 2021)

Matemaattisella mallilla voidaan ennustaa lähteen (Takawa et al. 1987) mukaan useita puhalluksen loppuarvoja. Lähde esittelee, kuinka lasketaan hapen teoreettinen kulutus puhalluksen aikana, lämpötilan nousu sekä fosforin poistuminen. Nämä yhtälöt ovat keskeisiä puhalluksen ennustamisessa. Hapen kulutus lasketaan kahdessa osassa; korkean ja matalan hiilipitoisuuden alueella. Korkean hiilipitoisuuden aikana lähes kaikki happi käytetään hiilen poistoon. Loppua kohden hiiltä on vähemmän, reaktio hidastuu eikä kaikki happi pala. Lämpötila nousee hiilen palamisen ja raudan hapettumisen sekä muiden alkuaineiden hapettumisen takia. Tässä mallissa on käytetty lämpötilan nousun ennustamiseen raudan ja hiilen palamisreaktioissa syntyvän lämmön summaa. Fosforin poistoon on käytetty funktiota, joka on esitetty hiilen määrän suhteen puhalluksen lopussa.

5. POHDINTA

Konvertteriprosessin hallinta on hyvin vaikeaa, koska kaikkia konvertterissa tapahtuvia ilmiöitä ei tunneta sekä malleihin tarvittavat mittaukset pitää suorittaa usein epäsuorasti olosuhteiden vuoksi. Huono prosessin mallinnus johtaa esimerkiksi korkeampiin päästöihin, heikkoon saantoon, vuorauksen kulumiseen sekä epäpuhtauksien päätyminen teräkseen. Edellä mainittujen syiden takia uusia malleja ja mittaustapoja etsitään koko ajan sekä vanhoja pyritään kehittämään paremmiksi.

Laadukas konvertterin ohjaus tarvitsee tarkkoja ja realistisia mittauservoja hyvän puhalluksen saavuttamiseksi. Tärkeimpiä mittauksia konvertteriprosessin ohjauksen ja mallien kannalta ovat teräksen happipitoisuuden mittaaminen, savukaasuista mitattavat hiilidioksidin sekä hiilimonoksidin pitoisuudet sekä erilaiset lämpötilamittaukset, teräksestä, vuorauksesta ja savukaasuista. Konvertterista mitataan vuorauksen ja kaatoreiän kuluneisuutta, jotka ovat tärkeitä turvallisuustekijöitä.

Luotettavimman tuloksen teräksen lämpötilasta sekä happipitoisuudesta puhalluksen jälkeen saadaan käsin mittaamalla. Puhalluksen aikana käytettävät pudotussondit ovat kuitenkin erittäin hyödyllisiä sekä korvaamassa yleisesti käytössä olevat apulanssit. Puhalluksen aikana tehdyt happipitoisuuden ja lämpötilan mittaukset pudotussondia hyödyntäen antavat aikaa operaattorille reagoida ja säätää esimerkiksi lanssin korkeutta tai lisätä seosaineita tavoitelämpötilan saavuttamiseksi. Näiden mittaustapojen ongelmia ovat luotettavuus, toimintavarmuus ja taloudelliset kustannukset verrattuna käsin mittaukseen.

Nykyaikaisessa konvertterin ohjauksessa käytetään malleja, jotka hyödyntävät savukaasuista mitattavaa lämpötilaa sekä eri kaasujen pitoisuuksia, joista tärkeimpiä ovat hiilimonoksidin ja hiilidioksidin pitoisuudet. Savukaasujen mittaukseen on kehitetty järjestelmiä, joista osa käyttää hyväkseen infrapunasäteilyä tai massaspektrometriä. Molemmat järjestelmät ovat hyviä mallien kannalta, mutta infrapunasäteilyä hyödyntävät mittausslaitteet ovat hieman nopeampia eikä niiden kuollutta aikaa tarvitse huomioida konvertterin ohjaavassa mallissa. Nämä mittalaitteet ovat kalliita, mutta tarpeellisia jokaisella konvertterilla taloudellisen puhalluksen saavuttamisen ja päästöjen vähentämisen kannalta.

Ilman dynaamisia tai staattisia malleja konvertteriprosessia olisi vaikeaa, ellei mahdotonta hallita sekä puhalluksen onnistumisprosentti olisi hyvin matala, etenkin haastavilla teräslaaduilla. Malleilla pyritään ennustamaan puhalluksen loppulämpötilaa, alkuainepitoisuuksia sekä laskemaan tarvittava kierrätysteräksen, raakaraudan sekä seosaineiden määrä. Staattisia malleja on käytetty ennen dynaamisia malleja prosessinohjauksessa, eivätkä ne pysty hyödyntämään jatkuvia mittauksia puhalluksen aikana. Dynaamiset mallit kuitenkin tarvitsevat toimiakseen näitä malleja sekä ne ovat toimintavarmoja. Esimerkiksi mittalaitteiden pettäessä tuotanto voi jatkua edes jollain tavalla. Dynaamiset mallit ovat kuitenkin hyvin kehittyneitä ja niitä kehitetään aktiivisesti koko ajan paremmiksi. Paras mahdollinen ohjausjärjestelmä konvertteriprosessille ja vaihteleville teräslaaduille muodostetaan yhdistämällä useita erilaisia staattisia ja dynaamisia malleja. Jotkin yritykset ovat jo pystyneet kaupallistamaan omia ohjausjärjestelmiä. Ruotsissa kehitettyä MEFCON-järjestelmää myydään kaupallisesti dynaamisena ohjausjärjestelmänä.

6. YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli esitellä teräskonvertteriprosessia sekä tutkia siihen liittyviä staattisia ja dynaamisia malleja sekä suoria ja epäsuoria mittaustapoja. Tarkastelu rajattiin erityisesti LD-KG-konvertterin toimintaan liittyviin mittauksiin ja malleihin. Konvertterissa vallitsevien olosuhteiden takia mittausten suorittaminen ja sitä kautta mallien muodostaminen on erittäin haastava tehtävä.

Työn alussa esiteltiin teräskonvertterin prosessivaiheita sekä sen sijainti ja rooli teräksenvalmistusketjussa. Tarkemmin käytiin läpi puhallusta sekä siinä käytettäviä lansseja ja kuinka niitä voidaan hyödyntää vuorauksen kuluneisuuden tai skollautumisen estämiseksi.

Konvertteriprosessin mallien muodostuksessa on tärkeässä roolissa erilaiset mittaukset. Työssä esiteltiin erilaisia tapoja ja mahdollisuuksia esimerkiksi lämpötilan mittaamiseksi savukaasuista, vuorauksesta ja teräksestä. Tarkemmilla mittauksilla pystytään luomaan tarkempia dynaamisia malleja konvertterin ohjaamiseksi. Dynaamisten ja staattisten mallien toimintaa sekä näiden yhdistelmiä ja kaupallisia vaihtoehtoja esiteltiin ja vertailtiin. Lopuksi päädyttiin johtopäätökseen, että molempia malleja tarvitaan hyvän ohjausjärjestelmän luomiseksi.

7. LÄHDELUETTELO

- Aula, M., Heikkilä, A., Iljana, M., Sipola, T. and Visuri, V. V., 2014. Steel industry-what they measure and how. *Process Metallurgy Group. PO Box, 4300.*
- Cordova, E., Khan, M., Zulian, D., Goldberg, B. and Maiolo, J., 2007. Development of the Goodfellow EFSOP technology for the BOF. *Steel Times International*, 31 (4), 26.
- Díaz, J., Fernández, F. J. and Suárez, I., 2019. Hot Metal Temperature Prediction at Basic-Lined Oxygen Furnace (BOF) Converter Using IR Thermometry and Forecasting Techniques. *Energies* [online], 12 (17). Saatavissa: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/17/3235>.
- Gross, J. H., 2006. *Mass spectrometry: a textbook*. Springer Science & Business Media.
- Gu, M., Xu, A., Wang, H. and Wang, Z., 2021. Real-Time Dynamic Carbon Content Prediction Model for Second Blowing Stage in BOF Based on CBR and LSTM. *Processes* [online], 9 (11). Saatavissa: <https://www.mdpi.com/2227-9717/9/11/1987>.
- Hahlin, P., 1993. A dynamic system for converter control in steelmaking. *Steel Times*, 221 (6), S4.
- Han, M. and Wang, X., 2011. BOF Oxygen Control by Mixed Case Retrieve and Reuse CBR. *IFAC Proceedings Volumes* [online], 44 (1), 3575–3580. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016441650>.
- Harris, J. A. and Collings, N., 2015. The transient start-up response of a universal exhaust gas oxygen sensor to investigate the Nernst equation in platinum/zirconia cells. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 221, 81–87.
- Hubble, D. H., Russell, R. O., Vernon, H. L. and Marr, R. J., 1998. Steelmaking refractories-Chapter 4. Steelmaking and refining-Volume 1, *The making, shaping, and treating of steel*. 11th ed. Pittsburgh, PA: AISE Steel Foundation. 227-230.

- Jalkanen, H. & Holappa, L., 2014. Chapter 1.4 - Converter Steelmaking. *In: Seetharaman, S., ed. Treatise on Process Metallurgy* [online]. Boston: Elsevier, 223–270. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080969886000146>.
- Kauppinen, T., Alamaki, P., Lilja, J. and Ruotsalainen, K., 1999. Thermography in the condition monitoring of refractory lining. *In: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 214–226.
- Lu, B., Li, Y. and Qu, B., 2014. *Optimization research on converter steelmaking process parameters based on DOE*. Key Engineering Materials.
- Makwana, A., Sane, A., He, X. and Buragino, G., 2021. Novel method for stirring BOF melts in conjunction with slag splashing. *In: AISTech - Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 354–362.
- Metallinjalostajat. 2014. *Teräskirja*. 9. p. [Helsinki]: Metallinjalostajat.
- Miller, T. W., Jimenez, J., Sharan, A. and Goldstein, D. A., 1998. Oxygen steelmaking processes-Chapter 9. *The Making, Shaping and Treating of Steel-Steelmaking and Refining volume 1*, 475–524. 11th ed. Pittsburgh, PA: AISE Steel Foundation.
- Mochizuki, M., Matsuoka, M. and Fujiwara, R., 1990. Improvement in response of commercialized oxygen sensor. *Solid State Ionics* [online], 40–41, 746–749. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0167273890901114>.
- Oghbasilasie, H & Holappa, L 1997 'Post combustion in converter steelmaking' *Teknillisen korkeakoulun materiaalitekniikan ja metallurgian julkaisuja*, no. TKK-V-B128, Espoo, pp. 53.
- Pistorius, P. C., 2019. Slag carry-over and the production of clean steel. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 119 (6), 557–561.
- Rout, B. K., Brooks, G., Akbar Rhamdhani, M., Li, Z., Schrama, F. N. H. and van der Knoop, W., 2018. Dynamic Model of Basic Oxygen Steelmaking Process Based on Multizone Reaction Kinetics: Modeling of Manganese Removal. *Metallurgical and*

Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science, 49 (5), 2191–2208. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s11663-018-1306-8>

Ruuska, J., 2012. Special measurements and control models for a basic oxygen furnace (BOF). Oulu.

Ruuska, J. and Leiviskä, K., 2004. *LD-KG-konvertterin lämpötila- ja lisäainemallit* [online]. University of Oulu. Saatavissa: <http://urn.fi/urn:isbn:9514275470>.

Ruuska, J., Ollila, S. and Leiviskä, K., 2005. *LD-KG-konvertterin hallintaan käytettävät mittaukset*.

Sandlöbes, S., Senk, D., Sancho, L. and Diaz, A., 2011. In-situ measurement of CO- and CO₂-concentrations in BOF Off-Gas. *Steel Research International*, 82 (6), 632–637. Saatavissa: <https://doi.org/10.1002/srin.201000223>

Schlautmann, M., Kleimt, B., Khadhraoui, S., Hack, K., Monheim, P., Glaser, B., Antonic, R., Adderley, M. and Schrama, F., 2017. Dynamic on-line monitoring and end point control of dephosphorisation in the BOF converter. *European Steel Technology and Application Days*.

Schlautmann, M., Kleimt, B., Teiter, T., Schnabel, S. and Ponten, H. J., 2011. Model-based dynamic monitoring and end-point control of converter process. In: *Proceedings of the 6th European Oxygen Steelmaking Conference (EOSC), Stockholm, Sweden. 7–9. September 2011* [online]. Curran Associates. Saatavissa: <https://books.google.fi/books?id=tpHssgEACAAJ>.

Schlüter, J., Odenthal, H.-J., Uebber, N., Blom, H., Beckers, T., Morik, K. and AG, S. M. S. S., 2014. Reliable bof endpoint prediction by novel data-driven modeling. *AISTech 2014 Conference Proceedings* [online]. Association for Iron & Steel Technology. Saatavissa: <https://books.google.fi/books?id=CKSAoAEACAAJ>.

Smith, B. C., 2011. *Fundamentals of Fourier transform infrared spectroscopy*. CRC press.

- Sumi, I., Kishimoto, Y., Kikuchi, Y. and Igarashi, H., 2006. Effect of high-temperature field on supersonic oxygen jet behavior. *ISIJ International*, 46 (9), 1312–1317. Saatavissa: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.46.1312>
- Takalo-Mattila, J., Heiskanen, M., Kyllonen, V., Maatta, L. and Bogdanoff, A., 2022. Explainable Steel Quality Prediction System Based on Gradient Boosting Decision Trees. *IEEE Access*, 10, 68099–68110. Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3185607>
- Takawa, T., Katayama, K., Hoteiya, M. and Hirayama, N., 1987. Mathematical model of end point control for the top and bottom blowing process in BOF. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, 27 (12), 951–958.
- Uebber, N., Odenthal, H. J., Schlüter, J., Blom, H. and Morik, K., 2012. A novel data-driven prediction model for BOF endpoint. JSI Paris.
- Valentas, L. S., Barbus, J. A. and Rymarchyk, N. M., 2007. BOF Post Combustion Oxygen Lances as a Production and Maintenance Tool. In: *AIST Proceedings: AISTech 2007*.
- Wang, X., Han, M. and Wang, J., 2010. Applying input variables selection technique on input weighted support vector machine modeling for BOF endpoint prediction. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* [online], 23 (6), 1012–1018. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0952197610000187>.
- Wang, Y., Chen, Y., Li, J., Chen, F. and Chen, J., 2012. Using FES in measuring the BOF temperature. *Advances in Information Sciences and Service Sciences*, 4 (10), 286–292. Saatavissa: <https://doi.org/10.4156/AISS.vol4.issue10.34>
- You, D., Bernhard, C., Mayer, P., Fasching, J., Kloesch, G., Rössler, R. and Ammer, R., 2021. Modeling of the BOF Tapping Process: The Reactions in the Ladle. *Metallurgical and Materials Transactions B* [online], 52 (3), 1854–1865. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s11663-021-02153-2>.
- Yuan, Z., Yang, X., Lu, Z., Huang, J., Pan, Y. and Ma, E., 2007. Jet Behavior and Metallurgical Performance of Innovated Double-Parameter Oxygen Lance in BOF.

Journal of Iron and Steel Research, International [online], 14 (3), 1–6. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1006706X0760034X>.

Zhi-Gang, H., Liu, L., Ping, H. and Ming-Xiang, T., 2003. A Dynamical Off-gas Model on a 150t BOF. *Steel Times International*, 27 (3), 11.

Zhou, Z.-Y. and Tang, P., 2021. Optimization on Temperature Strategy of BOF Vanadium Extraction to Enhance Vanadium Yield with Minimum Carbon Loss. *Metals* [online], 11 (6). Saatavissa: <https://www.mdpi.com/2075-4701/11/6/906>.

Zuliani, D. J., Scipolo, V., Maiolo, J. and Born, C., (2010). Opportunities for increasing productivity and lowering operating costs while reducing GHG emissions in steelmaking. In: *AISTech - Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 61–71.