



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

# **MASUUNIPROSESSIN KOKONAISVALTAINEN HALLINTA**

Joona Untola

Prosessitekniikka

Kandidaatintyö

Toukokuu 2022

# TIIVISTELMÄ

Masuuniprosessin kokonaisvaltainen hallinta

Joona Untola

Oulun yliopisto, prosessitekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2022, 26 s.

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

Työn tavoitteena on tehdä kirjallisuuskatsaus masuuniprosessin mittausmenetelmiin sekä eri asiantuntijajärjestelmiin, joita käytetään masuuniprosessin hallinnassa. Masuuniprosessi on mittauksien kannalta haastava prosessi. Korkeiden lämpötilojen ja muiden haastavien olosuhteiden vuoksi osa mittauksista on toteutettava epäsuorin keinoin. Olosuhteiden vuoksi prosessi on myös hallinnan kannalta haastava.

Työn perustana käytetään prosessikuvausta, jossa kartoitetaan prosessiin vaikuttavia tekijöitä. Prosessikuvauksessa esitellään masuuniprosessin perusteet. Prosessikuvauksen perusteella arvioidaan prosessiin vaikuttavia tekijöitä. Lisäksi työssä kartoitetaan prosessin kokonaisvaltaisen hallinnan kannalta tärkeimpiä tekijöitä ja kriteereitä.

Prosessiin vaikuttavien tekijöiden perusteella työssä kartoitetaan mitattavia suureita, sekä niiden mittausmenetelmiä. Asiantuntijajärjestelmistä selvitetään niiden rakenteita ja toimintaperiaatteita. Työssä pyritään selvittämään erityisesti tuoreimpia tutkimuksia näistä. Työn tuloksena esitellään erilaisia mittausmenetelmiä ja asiantuntijajärjestelmiä. Kirjallisuuskatsauksen pohjalta näiden ominaisuuksia vertaillaan ja esitetään mahdollisuuksia jatkotutkimukselle. Työssä saadut tulokset ovat sovellettavissa muihinkin prosesseihin, erityisesti korkealämpötilaprosesseihin.

*Asiasanat: masuuni, asiantuntijajärjestelmä, mittaus*

# SISÄLLYSLUETTELO

## TIIVISTELMÄ

## SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO .....	4
2 MASUUNI.....	5
2.1 Masuunin panostus.....	5
2.2 Kuilu.....	6
2.3 Hormit .....	6
2.4 Pesä ja raudan lasku .....	7
2.5 Massataseet .....	8
3 MITTAUKSET .....	10
3.1 Masuunin panostusmateriaalin mittaus .....	10
3.1.1 Materiaalin lentoradan mittaus.....	10
3.1.2 Materiaalin pinnanmuodon mittaus.....	10
3.2 Sulan pinnankorkeuden mittaus .....	11
3.3 Lämpötilojen mittaus .....	13
3.3.1 Sisäseinämän lämpötilan mittaus .....	13
3.3.2 Sulan lämpötilan mittaus.....	13
3.3.3 Palo-onkalon liekin lämpötilan mittaus .....	14
3.3.4 Kaasuvirtauksien lämpötilajakauma .....	14
3.4 Kaasuvirtaukset.....	14
3.5 Huippukaasun analysointi .....	15
4 ASIANTUNTIJAJÄRJESTELMÄT.....	16
4.1 VAiron.....	16
4.2 Spirin ym. kehittämä asiantuntijajärjestelmä .....	17
4.3 Ivanov ym. kehittämä asiantuntijajärjestelmä.....	18
4.4 Murav’eva ym. kehittämä asiantuntijajärjestelmä .....	19
4.5 Radhakrishnanin ja Mohamedin kehittämä asiantuntijajärjestelmä.....	20
5 POHDINNAT .....	22
6 YHTEENVETO .....	23
LÄHDELUETTELO	

# 1 JOHDANTO

Teräs näkyy jokapäiväisessä elämässämme, sillä käytämme lukemattomia määriä teräksestä valmistettuja tuotteita. Vuoden 2019 aikana terästä valmistettiin maailmanlaajuisesti 1869 miljoonaa tonnia (Geerdes ym. 2020). Terästä käytetään muun muassa autoihin, rakennustuotteisiin ja koneen osiin. Teräksen ominaisuuksia muokataan valmistusvaiheessa sen käyttökohteen mukaan. (SSAB, 2022)

Masuuniprosessi on yleisin tapa valmistaa raakarautaa, josta valmistetaan terästä. Masuunit sijaitsevatkin yleensä terästehtaalla. Esimerkiksi Raahen SSAB:n terästehtaaseen kuuluu raudantuotannon alueen lisäksi koksaamo, terässulatto ja valssaamo. (SSAB, 2022)

Masuunin sisällä raaka-aineet ovat kerroksittain. Pelkistysprosessin myötä raaka-aineista saadaan valmistettua raakarautaa. Masuuniprosessi toimii korkeissa lämpötiloissa, joka tuo omat haasteensa prosessissa toteutettaviin mittauksiin. Korkein masuunissa mitattava lämpötila voi olla jopa 2300 °C. Korkeiden lämpötilojen ja kemiallisten reaktioiden takia masuunin täytyy olla rakenteeltaan hyvin kestävä, jonka lisäksi sen rakenteisiin kuuluu jäähdytysjärjestelmä. Suurimmat masuunit voivat tuottaa jopa neljä miljoonaa tonnia raakarautaa vuodessa. (Geerdes ym. 2020)

Työn tavoitteena on kartoittaa ja esitellä masuuniprosessista suoraan ja epäsuoraan mitattavat suureet, sekä esitellä ja vertailla erilaisia masuuniprosessin hallintaan käytettäviä asiantuntijajärjestelmiä. Työn tarkoituksena on selvittää erityisesti tuoreempia menetelmiä masuuniprosessin hallinnasta.

## 2 MASUUNI

Masuunissa valmistetaan raakarautaa, joka jatkojalostetaan teräkseksi. Suurimpien masuunien pesän halkaisijat ovat noin 15 m ja tilavuudeltaan ne ovat yli 5000 m<sup>3</sup>. Prosessin perustana on pelkistää rautaa sisältäviä komponentteja, eli rautaoksidgeja. Rautaoksidgeina masuuniin syötetään sintteriä, rautapellitejä ja rautamalmia. Pelkistimenä käytetään koksia ja hiiltä. Pelkistysprosessi vaatii hyvin korkean lämpötilan, jota varten masuuniin kuumapuhalletaan esilämmitettyä kaasua. Kuuma kaasu nousee masuunissa ylöspäin, jolloin masuunin yläosasta syötetty rautapitoinen syöte sulaa ja laskeutuu kohti masuunin pesää. Huippukaasu ulosvirtaa masuunin huipulta, mutta sitä on myös mahdollista kierrättää. Korkeassa lämpötilassa tapahtuu kemiallisia reaktioita, joissa rauta pelkistyy. Sula rauta laskeutuu masuunin pesään, josta se lasketaan ulos avattavan reiän kautta jaksoittain kuonan kanssa. Masuuniprosessista kerrotaan yksityiskohtaisemmin seuraavissa kappaleissa. (Geerdes ym. 2020)

### 2.1 Masuunin panostus

Masuunin yläosasta panostettavat raaka-aineet varastoidaan siilolaitoksella, josta ne automaattisesti toimivan seulonnan ja punnituksen jälkeen kuljetetaan masuunin yläosaan. Masuunin panostukset yhtä tonnia valmista metallia kohden sisältävät noin 800 kg koksia, 800 kg malmia, 1100 kg sintteriä, 40 kg mangaanimalmia ja 90 kg kalkkikiveä. Materiaali panostetaan kerroksittain, jotka on jaettu rautapitoisiin materiaaleihin, kalkkikiveen ja koksiin. Kuljetus tapahtuu panostusvaunulla. (Radhakrishnan & Maruthy Ram, 2001)

Materiaalin syöttö masuuniin tapahtuu niin sanotun bell less top -systeemin kautta. Panostusvaunusta materiaali kaadetaan suppiloon (receiving hopper), josta se syötetään syöttösuppiloon. Suppiloiden välissä on tiivisteventtiili. Syöttösuppilosta materiaalia syötetään pystysuorassa olevan putken läpi pyörivään ränniin. Materiaalin virtauksen määrää kontrolloidaan venttiilin avulla. Ränni pyörii jatkuvatoimisesti akselinsa ympäri, jonka lisäksi myös sen kaltevuuskulmaa voidaan säätää. Rännistä materiaali putoaa masuunin esilämmitysvyöhykkeelle. (Radhakrishnan & Maruthy Ram, 2001)

## 2.2 Kuilu

Masuuniin panostetut materiaalit muodostavat uuniin pedin, jossa on kerroksittain koksia ja rautapitoista materiaalia. Kuuman pelkistyskaasun kohotessa uunissa ylöspäin, se sulattaa ja pelkistää rautapitoista materiaalia. Sulanut metalli suodattuu koksipedin läpi masuunin pesään. (Dong ym. 2010)

Loo ym. (2011) mukaan oksy reagoi sen laskeutuessa korkean lämpötilan alueelle. Raudan pelkistysreaktiot tapahtuvat jo paljon matalimmissa lämpötiloissa. Koheesioalueella rauta pehmenee ja sulaa, mutta koksille vastaavaa ei tapahdu. Lämpötilan ollessa noin 1000 °C koksi alkaa reagoida, muodostaen hiilimonoksidia. (Geerdes ym. 2020)

Noin 500 °C:n lämpötilassa alkaa pelkistysprosessi. Kyseisessä lämpötilassa hematitiitti ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) alkaa pelkistyä magnetiitiksi ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) pelkistyskaasun avulla. Magnetiitti ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) pelkistyy wustiitiksi ( $\text{FeO}_{1.05}$ ) noin 900 °C:n lämpötilassa. Noin 1000 °C:n lämpötilassa vallitsevana pelkistysreaktiona on hematitiitin pelkistyminen rautaoksidiksi ( $\text{FeO}$ ), hiilimonoksidin toimiessa pelkistimenä. Tämän lisäksi tapahtuu myös pienissä määrin pelkistymistä vedyn avulla, jolloin sivutuotteena syntyy hiilidioksidin sijaan vettä. Kun materiaali alkaa pehmentyä ja sulaa noin 1200 °C:n lämpötilassa, rautaoksidi pelkistyy puhtaaksi raudaksi. (Geerdes ym. 2020)

Lämpötila, jossa pehmeneminen alkaa, riippuu panostuksen koostumuksesta. Tavallisesti se on kuitenkin noin 1200 °C. Pelkistysprosessin osalta oleellisia tekijöitä ovat materiaalien kemialliset ja metallurgiset ominaisuudet. Optimaaliset metallurgiset ominaisuudet sinttereille ja pelleteille ovat hyvien pelkistys-hajoamisominaisuuksien lisäksi mahdollisimman korkea sulamispiste. Jos materiaali hajoaa pienempiin partikkeleihin, pelkistysprosessi häiriintyy. Tämä johtuu kaasun nopeammasta virtauksesta, kun virtaukselle syntyy enemmän tilaa pienempien partikkelien välistä. (Geerdes ym. 2020)

## 2.3 Hormit

Masuuniin injektoidaan hiilipölyä hormien läpi. Hormit ympäröivät masuunia tasaisin välimatkoin. Hiilipölytekniikka on korvannut pitkälti polttoöljyn käytön ja vähentänyt

koksin käyttöä niiden korkeamman hinnan vuoksi. Lisäksi tekniikka tuottaa vähemmän hiilidioksidipäästöjä. Hiilipöly toimii lämmöntuottajana ja pelkistimenä palo-onkalossa. (Shan-Wen ym. 2007)

Hiilipölyn on oltava sopivan hienojakoista sekä kuivaa, jotta se saadaan injektoitua masuuniin ja toimimaan halutulla tavalla. Hiili injektoidaan hormoneihin lanssien kautta. Alun perin suorat lanssit sijoitettiin hormoneihin tai lähietäisyydelle niistä. Lanssisuunnittelulla on kuitenkin havaittu olevan merkitystä, etenkin hiilipölyn virtausmäärien ollessa korkeita. Nykyisin tyypillisiä ratkaisuja ovat esimerkiksi kahden lanssin sijoittaminen yhteen hormiin, joka saa aikaan enemmän turbulenssia. Turbulenssia voidaan lisätä myöskin lanssin sijoittamisella lähemmäksi hormin kärkeä tai lanssin kärjen muotoilulla. (Geerdes ym. 2020)

Vähemmän käytetty tekniikka on injektoida maakaasua ja hiiltä yhtäaikaaisesti hormiin. Tätä käytetään erityisesti Pohjois-Amerikassa. Tällöin syntyy myöskin vetyä, mutta hiili tuottaa suurimman lämmön edelleen. Etuna tässä tekniikassa on prosessin parempi lämpöstabiilisuus. (Geerdes ym. 2020)

Hormien kautta hiili puhalletaan palo-onkaloon, jossa se syttyy palamaan. Tämä saa aikaan liekin, jonka lämpötila on hyvin korkea. Liekki on noin 180 cm pitkä ja muistuttaa muodoltaan banaania. (Geerdes ym. 2020)

## **2.4 Pesä ja raudan lasku**

Sula metalli ja kuona putoavat masuunin pesään. Metallin ja kuona eivät juurikaan sekoitu keskenään. Metallin koostumus saattaa vaihdella jonkin verran esimerkiksi seinämän ja pesän keskustan välillä. Metallin sekoittuu hyvin, kun se lasketaan masuunin pesästä ulos. (Geerdes ym. 2020)

Sula lasketaan masuunin pesästä ulos porattavan reiän kautta. Reiän pituus on tavallisesti 2,5–4,5 metriä ja se on halkaisijaltaan noin 40–70 millimetriä. Metallin virtaa hyvin sen alhaisen viskositeetin ansiosta. Kuonalla on korkeampi viskositeetti, joten se ei virtaa yhtä hyvin kuin metalli. Reikää pidetään auki, kunnes reikä alkaa puhaltamaan ulos kaasua. Sula lasketaan yleensä senkkoihin, joilla se viedään jatkojalostettavaksi.

Useimmat masuunit käyttävät jatkuvaa laskua, jolloin toinen reikä avataan samaan aikaan kun auki ollut reikä suljetaan. (Geerdes ym. 2020)

Masuunin pesällä on tärkeä rooli masuuniprosessin ja masuunin elinkaaren kannalta. Siksi sitä on tärkeää pitää olosuhteet siellä mahdollisimman stabiileina. Näissä olosuhteissa suorat mittaukset ovat hyvin haastavia, joten prosessia on hallittava epäsuorien mittausten avulla. (Torrkulla & Saxén, 2000)

## 2.5 Massataseet

Raudan sisääntulo masuuniin tapahtuu hematiittina, kun taas ulostulo on sulana rautana. Hematiitista rautaa on 69,9 massaprosenttia (m-%). Raudan massatase voidaan määrittää yhtälöllä: (Cameron, 2020)

$$[\text{Hematiitin massa malmipanostuksessa}] * 0,699 = [\text{Raudan massa sulassa metallissa}] \quad (1)$$

Hapen sisääntulo masuuniin tapahtuu hematiitin mukana, kuten raudallakin. Hematiitista happea on 30,1 m-%. Hematiitin lisäksi happea tulee masuuniin kuuman ilman mukana. Sen ulostulo masuunista tapahtuu hiilimonoksidina (CO) ja hiilidioksidina (CO<sub>2</sub>). Hiilimonoksidissa happea on 57,1 m-% ja hiilidioksidissa 72,7 m-%. Hapen massatase voidaan määrittää yhtälöllä: (Cameron, 2020)

$$[\text{hematiitin massa malmipanostuksessa}] * 0,301 + [\text{hapen massa kuumassa ilmassa}] = [\text{hiilimonoksidin massa}] * 0,571 + [\text{hiilidioksidin massa}] * 0,72 \quad (2)$$

Hiilen (C) sisääntulomasuuniin tapahtuu koksina. Koksin voidaan olettaa olevan sataprosenttisesti hiiltä. Se poistuu masuunista hiilimonoksidina ja hiilidioksidina. Hiilimonoksidissa hiiltä on 42,9 m-% ja hiilidioksidissa 27,3 m-%. Hiilen massatase voidaan määrittää yhtälöllä: (Cameron, 2020)

$$[\text{Hiilen massa koksipanostuksessa}] = [\text{hiilimonoksidin massa}] * 0,429 + [\text{hiilidioksidin massa}] * 0,273 \quad (3)$$



Typen (N<sub>2</sub>) sisäänvalo masuuniin tapahtuu kuuman ilman mukana. Se poistuu masuunista kaasuna sen yläosasta. Typen massatase voidaan määrittää yhtälöllä: (Cameron, 2020)

$$[\textit{typen massa kuumassa ilmassa}] = [\textit{typen massa ulostulossa}] \quad (4)$$

## **3 MITTAUKSET**

Masuunin olosuhteissa monet mittaukset ovat hyvin haastavia toteutettavaksi. Haastavat olosuhteet aiheuttavat muun muassa korkeat lämpötilat, korkeat paineet sekä korkeat pölypitoisuudet. (Xu ym. 2020) Tämän takia osa mittauksista toteutetaan epäsuo- rina, esimerkiksi massataseiden tai mallinnuksen avulla. (Brännbacka & Saxén, 2001)

### **3.1 Masuunin panostusmateriaalin mittaus**

Materiaalin kerrosten jakautumisella on merkittävä rooli prosessin tuottamien päästöjen vähentämisessä ja energian kulutuksen vähentämisessä. Oikealla jakaumalla saadaan haluttu kaasujen virtausjakauma ja voidaan optimoida koksen määrää. Lisäksi näin voidaan parantaa tuottavuutta ja stabiilisuutta. (Xu ym. 2020)

#### **3.1.1 Materiaalin lentoradan mittaus**

Materiaalin lentorataa mitataan, jotta voidaan mallintaa materiaalin jakautumista masuunissa. Mittaus toteutetaan materiaalin pinnan yläpuolelle asetettaville lansseilla, joissa on paineanturit. Sensorit tunnistavat putoavan materiaalin osuman, jolloin materiaalin lentorata voidaan määrittää reagoineiden sensorien perusteella. (Andreev ym. 2016)

#### **3.1.2 Materiaalin pinnanmuodon mittaus**

Masuunin pinnankorkeuden suoraan mittaukseen on olemassa useita menetelmiä, kuten mekaaniset anturit, tutka-anturit, laseranturit ja infrapunakamerat. Nämä eivät kuitenkaan ole optimaalisia jatkuvaan ja reaaliaikaiseen mittaukseen. Mekaaniset anturit toimivat vain kiinteissä korkeuksissa. Tutka-anturit mittaavat ainoastaan poikkileikkauksen pinta- alaa ja ne antavat vain keskiarvon materiaalin pinnankorkeudesta. Laseranturit ja infrapunakamerat toimivat luotettavasti vain, kun pölyn määrä on vähäistä. Normaalisti olosuhteet masuunin yläosassa ovat hyvinkin pölyisiä. (Xu ym. 2020)

Pinnankorkeuden mittaukseen on kehitetty 3D-muotoista informaatiota tuottavaa menetelmää. Pinnankorkeutta ja muotoa voidaan mitata endoskoopin avulla.

Endoskooppia käytetään pinnan kuvaamiseen, jonka jälkeen kuvasta voidaan luoda 3D-kuvaa. (Xu ym. 2020)

Endoskooppi on suunniteltu ottaen huomioon masuunin vaativat olosuhteet, kuten korkea lämpötila, pölyisyys ja valon puute. Endoskooppi koostuu kuvaus-, taustavalo-, suoja- ja virtakomponentista. Endoskooppi vaatii matalan valohäviön taustavalon, sekä kuumuuden kestävästä linssin. Lisäksi endoskoopin on oltava turvallinen, helposti asennettava ja sen huollon on onnistuttava myös masuunin käytön aikana. (Xu ym. 2020)

Laadukkaan kuvan ja pitkän elinkaaren takaamiseksi, endoskooppi on asennettava tiettyyn paikkaan. Endoskooppi on asennettava paikkaan, jossa pölypitoisuus on mahdollisimman pieni. Tällöin minimoidaan pölyn aiheuttama haitta kuvanlaadussa. Endoskoopin on oltava 1–1.5 m päässä materiaalin pinnasta, jolla varmistetaan riittävä kirkkaus. Endoskoopin on oltava alle metrin päässä sisäseinästä, jotta endoskooppi ei kärsisi kuumasta kaasuvirtauksesta. (Xu ym. 2020)

Selkeän kuvan muodostaminen on haasteellista kirkkauserojen vuoksi. Lisäksi panostus ja kaasuvirtaukset tuovat ongelmia. Tähän tarvitaan algoritmi, joka laskee tai nostaa kuvan kirkkautta tarpeen mukaan. Pinnan muoto luodaan kameraparin tuottamasta kuvaparista parametrien avulla. Lopulta pinnan muoto skaalataan universaalkoordinaatteihin hyödyntämällä muiden mittauslaitteiden dataa. (Xu ym. 2020)

### **3.2 Sulan pinnankorkeuden mittaus**

Masuunin pesästä mitataan sen sisältämän sulan metallin ja kuonan pinnankorkeutta. Metallin ja kuonan pinnankorkeuksista on mahdollista tuottaa omat mittaukset. Suorat mittaukset ovat hyvin haastavia, johtuen korkeasta lämpötilasta ja kemiallisista olosuhteista. (Brännbacka & Saxén 2001) Pinnankorkeuden mittaamiseen on kehitetty suoria mittausmenetelmiä, mutta ne eivät ole toistaiseksi osoittautuneet toimintavarmiksi. Metallin ja kuonan elektronisia ominaisuuksia voidaan hyödyntää mitattaessa lähdejännitteitä (EMF) eri pisteistä pesän seinistä. Menetelmässä ongelmakohdiksi on osoittautunut esimerkiksi kaasunpaineen vaikutus EMF-signaaliin. (Li ym. 2018) Valokuitusensoreilla mittaamista on myös tutkittu, mutta ongelmaksi on osoittautunut häiriöt ja niiden kalibroinnin haastavuus. (Agrawal ym. 2016)

Sulan metallin ja kuonan määrä masuunin pesässä voidaan laskea massataseiden pohjalta. Laskelmat tehdään siis laskemalla tuotannon määrä hapen kulutuksen kautta ja mittaamalla ulos lasketun sulan metallin ja kuonan määrä. Lisäksi on tiedettävä pesän geometriset mitat. Hapen kulutus saadaan laskettua, kun tunnetaan viimeisen kahdeksan tunnin keskiarvot masuuniin puhalletun kuuman ilman, puhtaan hapen ja kosteuden määrästä. Kuonan tuotantomäärä saadaan sulan metallin ja kuonan välisestä suhteesta. Suhde lasketaan panostusseosten mukaan. (Agrawal ym. 2016)

Pesästä ulos lasketun metallin määrä määritetään mittaamalla sulan metallin pinnankorkeutta senkassa. Pinnankorkeus mitataan tutkilla, jotka mittaavat etäisyyttä tutkan ja sulan metallin pinnan välillä. Pinnankorkeuden avulla voidaan määrittää senkassa olevan sulan tilavuus, josta voidaan edelleen määrittää uloslasketun sulan määrä. Kuonan määrä määritetään hihnapunnituksen avulla. Kuona granuloidaan granulointilaitoksessa, josta saadaan tuotteena granulihiekkaa, joka kuljetetaan hihnaa pitkin varastoitavaksi. Kuormituskennot mittaavat hihnalla olevan kuorman painon, jonka lisäksi mitataan hihnan nopeus. Näiden mittausten avulla määritetään pesästä lasketun kuonan määrä. (Agrawal ym. 2016)

Sulan metallin pinnankorkeus voidaan määrittä yhtälön avulla: (Agrawal ym. 2016)

$$h_{HM}(t) = h_{HM}(t_0) + \left( \int_{t_0}^t \left[ \frac{\Delta V_{HM}(m^3 \text{min}^{-1})}{(\pi * r^2 * \varphi)} dt \right] \right), \quad (5)$$

missä  $h_{HM}(t)$  on sulan metallin pinnankorkeus (m) hetkellä  $t$ ,  $h_{HM}(t_0)$  on sulan metallin pinnankorkeus (m) hetkellä  $t_0$ ,  $r$  on masuunin pesän säde (m) ja  $V_{HM}$  on sulan metallin tilavuus ( $m^3$ ).

Kuonan pinnankorkeus voidaan määrittää yhtälön avulla: (Agrawal ym. 2016)

$$h_{Slag}(t) = h_{Slag}(t_0) + \left( \int_{t_0}^t \left[ \frac{\Delta V_{Slag}(m^3 \text{min}^{-1})}{(\pi * r^2 * \varphi)} dt \right] \right), \quad (6)$$

missä  $h_{Slag}(t)$  on kuonan pinnankorkeus (m) hetkellä  $t$ ,  $h_{Slag}(t_0)$  on kuonan pinnankorkeus hetkellä  $t_0$  ja  $V_{HM}$  on kuonan tilavuus ( $m^3$ ).

Näiden kahden pinnankorkeuden arvo on masuunin pesän pinnakorkeus. Se voidaan siis määrittää yhtälöllä:

$$h_{TotalLiquidLevel}(t) = h_{HM}(t) + h_{Slag}(t), \quad (7)$$

missä  $h_{TotalLiquidLevel}(t)$  on pinnankorkeus (m) ajan hetkellä  $t$ . (Agrawal ym. 2016)

### 3.3 Lämpötilojen mittaus

Lämpötiloja mitataan useasta paikasta eri puolilta masuunia. Masuunin lämpötilojen suorat mittaukset ovat haastavia toteutettavaksi vaikeiden olosuhteiden vuoksi. Näin ollen masuunin lämpötilojen mittaukset ovat pääosin epäsuoria mittauksia. (Pan ym. 2018)

#### 3.3.1 Sisäseinämän lämpötilan mittaus

Sisäseinämän lämpötilaa ei pystytä mittaamaan suoralla mittauksella haastavien olosuhteiden vuoksi. Tunnettaessa masuunin seinämän fyysiset rakenteet, sen seinämän lämmönjohtavuus voidaan 3D-mallintaa. Seinämän jäähdytyslevyjen lämpötilat voidaan mitata ja niitä käytetään arviointikriteerinä sisäseinämän lämpötilan mallintamiseen. Sisäseinämän lämpötila saadaan lopulta iteroinnin avulla. Menetelmä on esitelty tarkemmin viitatussa artikkelissa. (Shen ym. 2021)

#### 3.3.2 Sulan lämpötilan mittaus

Sulan metallin lämpötila on merkittävä indikaattori arvioidessa sulan metallin laatua ja kontrolloidessa masuuniprosessia. Viitatussa artikkelissa esitetään menetelmä jatkuvalla lämpötilan mittaukselle. Menetelmässä perustana toimii infrapunälämpökuvauus. (Pan ym. 2018)

Suora lämpötilan mittaus masuunin pesästä on mahdotonta. Laskureiän kohdalta mitatun lämpötilan voidaan olettaa olevan sama kuin masuunin pesässä. Siinäkin on kuitenkin paljon haasteita. Lämpötilan mittaukseen on ollut menetelmiä, joissa lämpötila mitataan sifonin kohdalta. Näissä haittoina ovat olleet operaattorin turvallisuusriskit ja laitteiden lyhyt elinikä yhdistettynä niiden korkeisiin hankintakustannuksiin. (Pan ym. 2018)

Artikkelissa esitellyssä menetelmässä määritetään laskureiän lämpötila lämpökuvauksella ja lämpötilanalenemista kuvaamalla mallilla. Infrapunälämpökamera kuvaa infrapunakuvaa sulasta metallista sifonin jälkeen. Sifoni sijaitsee laskurännissä ja

sillä erotetaan sula metalli ja kuona toisistaan. Lämpötila voidaan määrittää reaaliajassa analysoimalla sulan metallin lämpötilajakaumaa. Mallintamalla lämpötilanalenemista laskureiän ja sifonin välillä, saadaan lämpötila laskureiän kohdalla. (Pan ym. 2018)

Pan ja kollegat ovat kehittäneet myös mittausmenetelmän, jolla voidaan mitata lämpötila suoraan laskureiältä. Infrapunakameralla kuvataan sulan virtausta laskureiästä. Haasteena aiemmin laskureiältä mittaamisessa on ollut muun muassa pölyn vaikutus. Pölyn aiheuttamat virheet kuvan käsittelyssä on suodatettu matriiseilla ja kompensatiomallilla. (Pan ym. 2019)

### **3.3.3 Palo-onkalon liekin lämpötilan mittaus**

Palo-onkalon liekin lämpötila vaikuttaa suoraan masuunin pesän toimintaan. Liekin lämpötila vaikuttaa metallin ja kuonan sulamiseen, joka taas vaikuttaa suoraan pesän toimintaan. Jokainen hormi tuottaa oman palo-onkalon, joten niiden lämpötilat eivät ole yhtä suuret toisiinsa verrattuna. Tämä taas vaikuttaa kaasuvirtauksien jakaumaan. (Zhou ym. 2017)

Yhdeksi tehokkaimmaksi menetelmäksi on todettu Charge Coupled Device -menetelmä (CCD), joka on väriin perustuva digitaalinen kuvausjärjestelmä. Kuvasta voidaan laskea lämpötilajakauma. Jakauma lasketaan kaksivärimenetelmällä, jolloin säteilykuvan jokaisen pisteen lämpötila saadaan määritettyä. (Zhou ym. 2017)

### **3.3.4 Kaasuvirtauksien lämpötilajakauma**

Kaasuvirtauksien lämpötilajakauma voidaan määrittää lämpöanturien ja termoparien avulla. Paikallaan pysyvät lämpöanturit sijoitetaan materiaalin pinnan yläpuolelle (Semenov, 2017). Niillä voidaan toteuttaa jatkuva lämpötilan mittaus (Timmer ym. 1997). Lämpöparit sijoitetaan masuunin kuiluun eri korkeuksille ja ympäri masuunin kehää. (Semenov, 2017)

## **3.4 Kaasuvirtaukset**

Kaasu virtaa masuunissa sen alaosaan kohti yläosaa. Samalla kuuma kaasu aiheuttaa raudan sulamista ja pelkistymistä. Näin ollen masuuniprosessin stabiilisuuden kannalta

on olennaista, että kaasuvirtaukset kanavoituvat halutulla tavalla masuunin sisällä. Kaasuvirtauksien kanavoituminen voidaan määrittää eri parametrien avulla, joista tärkeimmät ovat paine-erot materiaalissa, seinämän lämpötilat ja lämpöhäviöt sekä kaasun koostumus ja lämpötilaprofiili masuunin yläosassa. (Geerdes ym. 2020)

### **3.5 Huippukaasun analysointi**

Kaasun koostumus voidaan mitata materiaalin pinnan yläpuolella olevilla antureilla. Yleensä neljä anturia analysoi hiilidioksidi-, hiilimonoksidi- ja vetypitoisuuden. Hiilidioksidi- ja hiilimonoksidipitoisuudet analysoitiin infrapunatekniikalla ja vetypitoisuus analysoitiin lämmönjohtavuuden perusteella. Minuutin mittaiset analysoinnit otetaan 30 minuutin välein. (Timmer ym. 1997)

## 4 ASIANTUNTIJAJÄRJESTELMÄT

Asiantuntijajärjestelmän tarkoituksena on analysoida prosessidataa jatkuvasti. Analysoinnin perusteella järjestelmä voi joko ehdottaa tai suorittaa tarvittavia toimenpiteitä (Geerdes ym. 2020). Kun tarkastellaan asiantuntijajärjestelmiä, ne voidaan jakaa kolmeen eri kategoriaan. Ennustavat ja hälyttävät asiantuntijajärjestelmät ennustavat masuunin tapahtumia ja antavat sen perusteella hälytyksiä operaattorille. Neuvoa-antavat järjestelmät ehdottavat toimenpiteitä operaattorille. Ne eivät kuitenkaan suorita toimenpiteitä, vaan ne jättävät lopullisen päätöksen operaattorille. Niiden tarkoituksena on muodostaa samantapaiset toimintatavat eri työvuorojen välille, vaikka operaattori vaihtuukin vuoron vaihtuessa. Takaisinkytketyt asiantuntijajärjestelmät tekevät automaattisia toimenpiteitä. Näiden asiantuntijajärjestelmien avulla voidaan saada aikaan merkittäviä vähennyksiä tuotantokustannuksiin. (Klinger ym. 2010)

### 4.1 VAiron

VAiron-asiantuntijajärjestelmä on käytetyin järjestelmä masuuneissa (Trofimov, 2020). Vuonna 2010 se oli käytössä yli kymmenessä prosentissa. Järjestelmä kerää dataa pääosin mitatuista arvoista. Lisäksi se hyödyntää laskennallisia arvoja. Järjestelmän tietokanta sisältää historian prosessidatasta, sekä tavoitearvot prosessille. Datan validoinnilla määritetään datan prosessoinnin tarve. Validointia tehdään esimerkiksi puhallettavan ilman kosteudelle vertailemalla mitattua ja laskettua arvoa. Järjestelmä antaakin käyttäjälle viestin, jos se havaitsee virheellistä dataa. (Klinger ym. 2010)

Jotkut diagnoosit ja korjaavat toimenpiteet vaativat esiprosessointina lisälaskelmia. Laskelmat voivat esimerkiksi olla aikaperusteisia, kuten esimerkiksi trendit ja keskiarvot. Esimerkkinä voidaan käyttää masuunin yläosan kaasun vetypitoisuuden käyttämistä vesivuodon havaitsemiseen. Tällöin merkittävänä indikaattorina voidaan pitää vetypitoisuuden keskiarvoa ja trendiä. Jotkin laskelmat ovat hyvin kompleksia. Tästä esimerkkinä on SiO<sub>2</sub>-pitoisuuden riippuvuus sulan metallin lämpötilasta. Lämpötilan muutos taas johtuu järjestelmän tekemästä muutoksesta kuonan emäksisyyteen. (Klinger ym. 2010)

Validoitu ja esiprosessoitu data syötetään sumean logiikan sääntöihin, jotta saadaan alkuarvo jokaiselle diagnoosille. Tämän jälkeen lopulliset diagnoosit muodostetaan



hyödyntämällä prosessituntemusta. Yleensä diagnoosit esitetään välillä  $[-1, +1]$  ja ne esitetään graafisesti liikennevaloja muistuttavalla esityksellä (normaali, korkea tai matala, hyvin korkea tai hyvin matala). (Klinger ym. 2010)

Järjestelmä voi toimia neuvoa-antavassa tilassa tai suljetun silmukan tilassa. Valittu tila vaikuttaa toimintaan, kun järjestelmä ehdottaa tarvittavaa toimenpidettä. Riippumatta tilasta operaattori voi joko hyväksyä tai hylätä ehdotetun toimenpiteen. Ehdotetut toimenpiteet voivat olla joko laadullisia tai määrällisiä. Laadullisissa ehdotuksissa järjestelmä ehdottaa esimerkiksi jonkin arvon laskemista tai nostamista. Määrällisissä ehdotuksissa järjestelmä ehdottaa myöskin kohdearvon. Jos ehdotukseen ei reagoida ennalta määritetyssä ajassa, neuvoa-antavassa tilassa järjestelmä hylkää ehdotuksen automaattisesti. Vastaavasti suljetun silmukan tilassa järjestelmä toteuttaa toimenpiteen, jos operaattori ei reagoi siihen. (Klinger ym. 2010)

VAiron-järjestelmällä raportoidaan olevan useita hyötyjä. Järjestelmän avulla saadaan minimoitua kaksin ja polttoaineen käyttöä. Nämä molemmat vähentävät sekä kustannuksia, että päästöjä. Kustannukset vähenevät myös ylläpidon osalta. Tuottavuutta on saatu parannettua, koska järjestelmä tuo stabiilisuutta masuunin toimintaan. Stabiilisuus tuottaa myöskin tasalaatuisempaa metallia, joka on olennaista koko terästuotannon kannalta. Lisäksi järjestelmä tarjoaa mahdollisuuden lisätä selityksiä operaattorin tekemille päätöksille, joka parantaa tiedonkulkua operaattorien välillä. (Klinger ym. 2010)

## **4.2 Spirin ym. kehittämä asiantuntijajärjestelmä**

Järjestelmän peruseriaatteena on loogis-matemaattinen malli, joka on luotu arvioimalla masuunissa tapahtuvaa sulamisprosessia. Malli sisältää 15 hallittua indikaattoria, joilla määritetään niin sanottu normaalitila masuunille. Lisäksi malli yhdistää hallittua indikaattoreihin yhdeksän suunniteltua indikaattoria, joten indikaattoreita on siis yhteensä 24. (Spirin ym. 2020)

Normaalitilasta poikkeamista tarkastellaan kaasujakaumille, sulamiselle ja materiaalin laskeutumiselle. Parametrejä sulamisprosessin arviointiin on yhteensä 111 (kts. Taulukko 1) (Spirin ym. 2020)

**Taulukko 1.** Kontrolloitujen ja suunniteltujen parametrien määrä normaalitilan ja poikkeamien määrittämiseen. (Spirin ym. 2020)

Poikkeama normaalitilasta	Kontrolloitujen parametrien määrä	Suunnitteluparametrien määrä	Yhteensä
<b>Normaali operointitila</b>	15	9	24
<b>Kaasuvirtauksien stabiilisuuden poikkeamat:</b>			
- Reunavirtaus,	9	5	14
- Keskustan virtaus.	8	5	13
<b>Sulamisen poikkeamat:</b>			
- Sulan kuuma virtaus,	8	4	12
- Sulan kylmä virtaus.	8	4	12
<b>Poikkeamat materiaalin sulavassa laskeutumisessa:</b>			
- materiaalin yläosa,	8	4	12
- materiaalin alaosa,	7	4	11
- haluttu masuunin toiminta	8	5	13
<b>Yhteensä</b>	<b>71</b>	<b>40</b>	<b>111</b>

Ohjelmisto on osa masuunin sulamisprosessia optimoivaa järjestelmää ja se on sovitettu yhteen masuunin automaatiojärjestelmän kanssa. Käyttäjälleen järjestelmä näyttää päänäytöllä jokaisen kolmen tarkasteltavan kohteen tilan. Järjestelmä antaa mahdollisuuden tarkastella näitä tarkemmin jokaista yksityiskohtaisesti, jolloin jokaisesta poikkeamasta on löydettävissä tarkentavaa informaatiota. Järjestelmä tarjoaa käyttäjälleen mahdollisuuden saada reaaliajassa diagnooseja masuuniprosessin toimintatilasta. Diagnoosien lisäksi järjestelmä pystyy myös tekemään toimenpiteitä prosessin kontrolloimiseksi. (Spirin ym. 2020)

### 4.3 Ivanov ym. kehittämä asiantuntijajärjestelmä

Ivanovin ja kollegoiden kehittämä asiantuntijajärjestelmä on hyvin kattava. Se sisältää itse prosessin hallintaan kuuluvia malleja (looginen, tase, teknologinen, fysikaaliskemikaalinen ja analyttinen). Näiden lisäksi järjestelmä sisältää mallit turvallisuudesta ja taloudellisuudesta. (Ivanov ym. 2011)

Loogisessa mallissa sisääntuloina toimivat tavoitearvot mittaussuureille, jotka kuvaavat sulamisprosessia. Ulostuloina on mitatut arvot kyseisistä suureista. Ulostulojen arvot halutaan pitää mahdollisimman lähellä sisääntuloja, jotta prosessi toimisi stabiilisti. Arvoja voidaan kontrolloida manuaalisesti, neuvoa-antavasti tai automaattisesti. Tasemallin tarkoituksena on seurata masuunin materiaalitaseita. Mallin sisääntulot kuvaavat sulamista sekä raaka-aineiden ja talkkiration koostumusta. Mallin ulostulot kuvaavat taas prosessin sivutuotteiden (kuona ja kaasu) koostumusta. Teknologinen malli koostuu matemaattisista kaavoista. Kaavoilla voidaan määrittää tuotannon määrä /[tonnia/vuorokausi], laskun pituus/[min] ja laskujen määrä vuorokaudessa. Fysikaaliskemikaalinen malli kuvaa kemiallisten elementtien jakautumista talkkiration ja kuonan välillä. Laskelmissa on hyödynnetty teknologista mallia sillä ehdolla, että Gibbsin vapaaenergia on mahdollisimman lähellä tasapainoa. Analyttinen malli mahdollistaa tarkastelun niille komponenteille, joista ollaan kiinnostuneita. Sen tuloksia voidaan käyttää pohjana päätettäessä täyttävätkö materiaalin kemialliset koostumukset vaatimukset. (Ivanov ym. 2011)

Turvallisuusmallilla voidaan kuvata esimerkiksi loukkaantumisten esiintyvyyttä työntekijöiden joukossa ja niiden vakavuutta. Mallin avulla voidaan myös määrittää riittävä jäähdytysveden määrä masuunin ulkoseinämän jäähdyttämiseen, sekä laitteiden toimintavarmuus. Taloudellinen malli tarjoaa mahdollisuuden laskea prosessin tuotantokustannuksia. (Ivanov ym. 2011)

Järjestelmä perustuu siis useisiin heterogeenisiin malleihin. Se vähentää mahdollisten suunnitteluvaiheessa tapahtuvien virheiden määrää, joka tarjoaa mahdollisuuden tehokkaaseen prosessikontrolliin. Järjestelmä on myös integroitavissa muihin korkealämpötilaprosesseihin. (Ivanov ym. 2011)

#### **4.4 Murav'eva ym. kehittämä asiantuntijajärjestelmä**

Murav'evan ja kollegoiden kehittämän asiantuntijajärjestelmän tarkoituksena on prosessin hallinta oikean panostusmateriaalin koostumuksen valinnan avulla. Järjestelmä perustuu matemaattisiin malleihin, jotka kuvaavat sulamisprosessia kemiallisesti ja fysikaalisesti. (Murav'eva ym. 2021)

Mallialajärjestelmä sisältää neljä yksikköä. Panosjakautumismalli mallintaa materiaalin jakautumista masuunin yläosassa. Fysikaalisen ja kemiallisen mallin tehtävänä on määrittää rautaa sisältävien panostusten käyttäytymistä masuunissa. Käyttäytymistä voidaan mallintaa esimerkiksi lämpötilojen ja tunnettujen panostustietojen avulla. Metallikuonamalli ennustaa sulan materiaalin koostumusta ja ominaisuuksia. Lisäksi alajärjestelmä sisältää plastisen vyöhykkeen paikan ja muodon määrittämisen. (Murav'eva ym. 2021)

Laskennallinen alajärjestelmä sisältää kaksi yksikköä. Toinen laskee arviointiperusteet kaasun dynaamiselle tilalle. Toinen taas laskee arviointiperusteet plastisen vyöhykkeen paikalle ja muodolle. Laskenta perustuu plastisen vyöhykkeen määrittämismetodiin, mitä voidaan täydentää sulamislinjan ja -alueen matemaattisella mallilla. (Murav'eva ym. 2021)

Teknologisten rajoitteiden alajärjestelmä voidaan jakaa staattisiin ja dynaamisiin rajoitteisiin. Staattisiin rajoitteisiin kuuluu rajoitus panostusmateriaalien sallitussa kvantitatiivisessa koostumuksessa, panostusmateriaalin komponenttien suhteen pysyminen sallitussa haarukassa, kuonan viskositeetin rajoitus, sekä muut kemialliset ja fysikaaliset rajoitteet kuonan koostumuksessa. Dynaamisiin rajoitteisiin kuuluvat rajoitus rautaoksidin pitoisuudesta kuonassa, lämpötilaeron minimointi pehmenemis- ja sulamislämpötilojen välillä. Sen tehtävänä on tarjota optimaaliset arvot plastisen vyöhykkeen arviointikriteerille. (Murav'eva ym. 2021)

Järjestelmä tarjoaa siis alajärjestelmien kautta optimaalisen valinnan panostusmateriaalin koostumukselle. Koostumus on olennainen osa prosessin stabiilisuuden hallintaa. Mallilla voidaan tähdätä joko tuotantokustannusten minimointiin, koksen kulutuksen minimointiin tai haluttuun tuotantomäärään. (Murav'eva ym. 2021)

#### **4.5 Radhakrishnanin ja Mohamedin kehittämä asiantuntijajärjestelmä**

Radhakrishnanin ja Mohamedin kehittämä asiantuntijajärjestelmä perustuu sulan metallin pii- ja rikkiarvojen kontrollointiin neuroverkkojen avulla. Neuroverkot ovat ikään kuin epälineaarinen kartoitus sisään- ja ulostulojen välillä. Neuroverkkojen avulla ennustetut pii- ja rikkiarvot sekä lämpötilat yhdistetään panostuksen laskentamalliin. (Radhakrishnan & Mohamed 2000)

Neuroverkkojen ulostuloina toimivien pii- ja rikkiarvojen perusteella asiantuntijajärjestelmä laskee tarvittavat muutokset. Järjestelmä toimii ja tekee laskelmat tietyin väliajoin, esimerkiksi puolen tunnin välein. Jos neuroverkkojen ennustamat arvot ovat tavoitearvojen ulkopuolella, järjestelmä laskee tarvittavat muutokset. Korjaavat toimenpiteet on järjestetty hierarkiaan. Piiarvot korjataan ensin kosteuden ja sitten lämpötilan avulla. Korjatessa piiarvoja, sillä on päinvastaisia vaikutuksia rikkiarvoihin. Siksi korjaavat toimenpiteet rikille tulevatkin hierarkiassa piiarvojen korjauksen jälkeen. Toimenpiteenä on säätää puhallusilman painetta. Kun puhallusilman toimenpiteet on laskettu, laskee järjestelmä muutokset panostukseen. Muutoksia panostukseen ovat kaksin ja kalkin määrä. Kaikilla toimenpiteillä on ala- ja yläarvot, perustuen masuunin toimintarajoitukseen. (Radhakrishnan & Mohamed 2000)

Järjestelmän avulla on saatu huomattava parannus sulan metallin laatuun ja sen hallintaan. Järjestelmän avulla pystytään hallitsemaan paremmin piiarvoja kuin rikkiarvoja, koska rikkiarvojen korjaavat toimenpiteet liittyvät pääosin muutoksiin panostuksessa. Panostuksen muutokset näkyvät noin 4–6 h kuluttua toimenpiteen jälkeen. Järjestelmä vaatii kuitenkin stabiilit olosuhteet ja laadukkaat raaka-aineet toimiakseen halutulla tavalla. (Radhakrishnan & Mohamed 2000)

## 5 POHDINNAT

Kaikista esitellyistä asiantuntijajärjestelmistä on löydettävissä poikkeavuuksia ja yhtenäisyyksiä toisiinsa verrattuna. Masuunin toiminnan kannalta olennaisimpana osana voidaan ajatella olevan sen stabiilisuus. Vanhin esitelty järjestelmä, eli Radhakrishnanin ja Mohamedin järjestelmä, vaatii kuitenkin toimiakseen stabiilit olosuhteet. Koska se vaatii myös laadukkaat raaka-aineet, ei järjestelmä välttämättä ole optimaalisin koko prosessin hallinnan kannalta. Neuroverkkojen tuoman oppiskyvyn myötä sen käyttäminen tuotteen laadun hallintaan on kuitenkin järkevää. Murav'evan ja kollegoiden kehittämä järjestelmä voisi kuitenkin toimia yhdistettynä tähän järjestelmään, sen toimiessa panostusmateriaalin kontrolloinnin kautta. Tällöin järjestelmä sisältäisi sekä tuotteen laadun, että raaka-aineiden kontrolloinnin.

VAiron ja Sprinin ja kollegoiden kehittämät järjestelmät ovat pohjimmiltaan samankaltaisia. Molempien järjestelmien perustana on niin sanottu normaalitila, josta poikkeavista arvoista tehdään diagnooseja. Kirjallisuuden perusteella VAiron vaikuttaa operaattorille helppokäyttöisemmältä. Järjestelmä on monipuolinen diagnoosien osalta, jonka lisäksi se tarjoaa mahdollisuuden operaattorille tehdä selvityksiä tekemilleen ratkaisuille. Tämän avulla järjestelmää on mahdollista kehittää, kun tietoa kerätään pitkältä ajalta.

Esitellyistä järjestelmistä Ivanovin kehittämä järjestelmä on monipuolisin. Se poikkeaa muista järjestelmistä erityisesti ottamalla suoraan huomioon turvallisuuden ja taloudellisuuden. Sen perustana toimii kuitenkin malli, jolla pyritään hallitsemaan prosessia kokonaisvaltaisesti.

Vaikka useiden järjestelmien kerrotaan saaneen aikaan päästövähennyksiä jopa tuotantomäärien noustessa, missään järjestelmässä ei suoraan tavoitella sitä. Tulevaisuudessa järjestelmien kehityksessä voitaisiinkin keskittyä mallintamaan masuunin tuottamia päästöjä. Lisäksi järjestelmien kehityksessä on syytä ottaa huomioon niiden integroitavuus muihin korkealämpötilaprosesseihin, etenkin muuttuvan raudanvalmistustekniikan takia.

## 6 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tehdä kirjallisuuskatsaus masuuniprosessin mittausmenetelmiin sekä eri asiantuntijajärjestelmiin, joita käytetään masuuniprosessin hallinnassa. Masuuniprosessin voidaan todeta olevan haastava prosessi mittauksien ja hallinnan kannalta. Tämä tulee erityisesti esiin mittausmenetelmistä sekä asiantuntijajärjestelmistä.

Työn perustana käytettiin prosessikuvausta, jossa kartoitettiin prosessiin vaikuttavia tekijöitä. Prosessikuvauksessa esiteltiin masuuniprosessin toimintaperiaatteita. Prosessikuvauksesta saatiin selville prosessiin vaikuttavia tekijöitä. Lisäksi työssä kartoitettiin prosessin kokonaisvaltaisen hallinnan kannalta tärkeimpiä tekijöitä ja kriteereitä.

Prosessiin vaikuttavien tekijöiden perusteella työssä kartoitettiin mitattavia suureita, sekä niiden mittausmenetelmiä. Asiantuntijajärjestelmistä selvitettiin niiden rakenteita ja toimintaperiaatteita. Työssä selvitettiin erityisesti tuoreimpia menetelmiä mittauksiin, sekä tuoreimpia asiantuntijajärjestelmiä. Työn tuloksena esitellään erilaisia mittausmenetelmiä, sekä asiantuntijajärjestelmiä. Kirjallisuuskatsauksen pohjalta asiantuntijajärjestelmiä vertailtiin ja esitettiin mahdollisuuksia jatkotutkimukselle. Työssä saadut tulokset ovat sovellettavissa muihinkin prosesseihin, erityisesti korkealämpötilaprosesseihin.

## LÄHDELUETTELO

- Agrawal, A., Kor, S. C., Nandy, U., Choudhary, A. R. & Tripathi, V. R. (2016). Real-time blast furnace hearth liquid level monitoring system. *Ironmaking and Steelmaking*, 43(7), 550–558. (Viitattu 18.1.2022)
- Andreev, K., Van der, J., Bell, T., Jak, H. & Raleigh, J. (2015). Stable Blast Furnace Control by Advanced Measurement Techniques. (Viitattu 1.2.2022)
- Brännbacka, J. & Saxén, H. (2001). Modeling the liquid levels in the blast furnace hearth. *ISIJ International*, 41(10), 1131–1138 (Viitattu 14.1.2022)
- Cameron, I. (2020). Blast furnace ironmaking: Analysis, control and optimization. Elsevier. (Viitattu 10.1.2022)
- Dong, X. F., Yu, A. B., Chew, S. J. & Zulli, P. (2010). Modeling of blast furnace with layered cohesive zone. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 41(2), 330–349. (Viitattu 7.12.2021)
- Du, S., Chen, W. & Lucas, J. (2007). Performances of pulverized coal injection in blowpipe and tuyere at various operational conditions. *Energy Conversion and Management*, 48(7), 2069–2076. (Viitattu 30.11.2021)
- Geerdes, M., Chaigneau, R. & Linguardi, O. (2020). *Modern Blast Furnace Ironmaking: An Introduction (Fourth Edition, 2020)*. (Viitattu 10.2.2022)
- Ivanov, E. B., Klimovitskii, M. D. & Anisimov, E. F. (2011). Expert system for blast-furnace operators. *Metallurgist*, 54(11–12), 730–736. (Viitattu 14.2.2022)
- Klinger, A., Kronberger, T., Schaler, M., Schürz, B. & Stohl, K. (2010). Expert Systems Controlling the Iron Making Process in Closed Loop Operation. In (Ed.), *Expert Systems*. IntechOpen. (Viitattu 11.2.2022)
- Li, Y., Zan, L., Ge, Y., Wei, H., Zhang, Z., Bi, C. & Yaowei, Y. (2018). Monitoring liquid level of blast furnace hearth and torpedo ladle by electromotive force signal. *Metals*, 8(9), 665–678 (Viitattu 14.1.2022)



Loo, C. E., Matthews, L. T. & O'Dea, D. P. (2011). Lump ore and sinter behaviour during softening and melting. *ISIJ International*, 51(6), 930–938. (Viitattu 14.12.2021)

Murav'eva, I. G., Togobitskaya, D. N., Ivancha, N. G., Bel'kova, A. I. & Nesterov, A. S. (2021). Concept development of an expert system for selecting the optimal composition of a multicomponent blast-furnace charge and functional and algorithmic structure. *Steel in Translation*, 51(1), 33–38. (Viitattu 28.2.2022)

Pan, D., Jiang, Z., Chen, Z., Gui, W., Xie, Y. & Yang, C. (2019). Temperature measurement and compensation method of blast furnace molten iron based on infrared computer vision. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 68(10), 3576–3588. (Viitattu 21.3.2022)

Pan, D., Jiang, Z., Chen, Z., Gui, W., Xie, Y. & Yang, C. (2018). Temperature measurement method for blast furnace molten iron based on infrared thermography and temperature reduction model. *Sensors (Switzerland)*, 18(11) 3792–3807. (Viitattu 27.1.2022)

Radhakrishnan, V. R. & Maruthy Ram, K. (2001). Mathematical model for predictive control of the bell-less top charging system of a blast furnace. *Journal of Process Control*, 11(5), 565–586. (Viitattu 20.11.2021)

Radhakrishnan, V. R. & Mohamed, A. R. (2000). Neural networks for the identification and control of blast furnace hot metal quality. *Journal of Process Control*, 10(6), 509–524. (Viitattu 18.3.2022)

Semenov, Y. S. (2017). Temperature distribution of the gas flux in blast furnaces. *Steel in Translation*, 47(7), 473–477. (Viitattu 2.2.2022)

Shen, L., Chen, Z., Jiang, Z. & Gui, W. (2021). Soft sensor modeling of blast furnace wall temperature based on temporal-spatial dimensional finite-element extrapolation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70, 1–14 (Viitattu 25.1.2022)

Spirin, N. A., Gurin, I. A. & Istomin, A. S. (2020). Expert system of diagnostics blast furnace process. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 1–14. (Viitattu 14.2.2022)

SSAB, 2022. Tuotantopaikat Suomessa, SSAB:n Raahen tehdas [verkkodokumentti].  
Raahe: SSAB. Saatavissa: <https://www.ssab.fi/ssab-konserni/tietoja-ssabsta/tuotantopaikkakunnat-suomessa/raahe> (Viitattu 16.3.2022)

Timmer, R., Droog, J., Flierman, G. & Steeghs, A. (1997). Radial gas distribution in the blast furnace top. Steel Research, 68(2), 47–53. (Viitattu 25.1.2022)

Torrkulla, J. & Saxén, H. (2000). Model of the state of the blast furnace hearth. ISIJ International, 40(5), 438–447. (Viitattu 30.11.2021)

Trofimov, V. B. (2020). Automated expert systems in blast-furnace process control. Metallurgist, 64(1-2), 3–12. (Viitattu 11.2.2022)

Xu T., Chen Z., Jiang Z., Huang J. & Gui W. (2020). A Real-Time 3D Measurement System for the Blast Furnace Burden Surface Using High-Temperature Industrial Endoscope. Sensors. 20(3), 869–889. (Viitattu 12.1.2022)

Zhou, D., Cheng, S., Zhang, R., Li, Y. & Chen, T. (2017). Uniformity and activity of blast furnace hearth by monitoring flame temperature of raceway zone. ISIJ International, 57(9), 1509–1516. (Viitattu 27.1.2022)