



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

Valokaariuunin lämpöenergian tehokkuuden mallinnus

Antti Tiainen

Prosessi- ja ympäristötekniikka

Kandidaatintyö

Toukokuu.2024

TIIVISTELMÄ

Valokaariuunin lämpöenergian tehokkuuden mallintaminen

Antti Tiainen

Oulun yliopisto, Prosessi- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2024, 21 s.

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

Tämän kandidaatin työn tavoitteena oli tutkia valokaariuunin toimintaa ja esitellä siihen liittyvää dataa. Lisäksi datapisteistä oli tarkoitus tutkia mallinnuksen ja data-analyysin keinoin valokaariuunin energian syötön ja lämpötilan välistä suhdetta. Työn tarkoituksena oli selvittää, löytyykö näiden muuttujien väliltä lineaarista riippuvuutta. Työssä kyseistä dataa mallinnettiin ja analysoitiin sekä todettiin muuttujien riippuvuudet. Työssä käytettiin data-analysointimenetelmiä, kuten Microsoft Excelin data-analyysityökalua. Exceliä käytettiin datapisteiden mallintamiseen pistekuvaajina (ns. scatter-kuvaajina), jotta mahdolliset korrelaatiot olisivat näkyvissä myös visuaalisesti. Työn lopuksi todettiin tuloksien merkityksellisyys ja ehdotettiin jatkokehitystoimenpiteitä.

Asiasanat: Ruostumaton teräs, Valokaariuuni, Regressioanalyysi, Data

ABSTRACT

Title: Efficiency of electric arc furnace

Author's First name Family name: Antti Tiainen

University of Oulu, Degree Programme of Process Engineering

Bachelors thesis 2024, 21 pp.

Supervisor(s) at the university: Aki Sorsa, Jari Ruuska

The aim of this bachelor's thesis was to study the operation of the electric arc furnace and present related data. From the data points, the aim was to find out the relationship between the electric arc furnace's energy input and temperature. The purpose of the work was to find out if there is any kind of linear dependence between these variables. The data in question was modelled and analysed, after which the dependencies of the variables, if found, are determined. The work used data analysis methods, such as Microsoft Excel's data analysis tool. Excel was also used to model data points as scatter plots so that possible correlations are also visible visually. At the end of the work, the relevance of the results was stated, and further development was proposed.

Keywords: Stainless Steel, Electric Arc Furnace, Regression analysis, Data

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto	5
2 Teräs	6
2.1 Hiiliteräs	6
2.2 Ruostumaton Teräs	7
2.3 Valokaariuuni	7
2.4 Valokaariuunin Energiatase.....	9
2.5 AOD-konvertteri.....	10
3 Lineaarinen regressio	12
4 Data-analyysi.....	13
4.1 Käytetty data.....	13
4.2 Työkalut.....	13
4.3 Reaktiivinen voima aktiivisen voiman funktiona.....	14
4.4 Aktiivinen voima lämpötilan funktiona.....	16
4.5 Reaktiivinen voima lämpötilan funktiona	17
5 Pohdintaa ja jatkokehitystyö	19
6 Yhteenveto	20

LÄHDELUETTELO

1 JOHDANTO

Tämän kandidaatin työn tavoitteena on tutkia dataa valokaariuunin energian syötöstä ja lämpötilasta ja selvittää näiden muuttujien välisiä riippuvuuksia. Kyseistä dataa mallinnetaan, analysoidaan ja tutkitaan, jotta saadaan tehtyä jonkinlainen johtopäätös datasta. Työssä tullaan käyttämään data-analyysimenetelmiä ja pistekuvaajia muuttujille. Tämä työ perustuu kirjallisuusdataan (www.Kaggle.com, *Industrial Data from the Electric Arc Furnace*), joka sisältää arvoja valokaariuunin virransyötöstä ja valokaaren lämpötilasta tietyllä ajan hetkellä. Työn toisena tavoitteena on tutustua valokaariuunin toimintaan. Työssä keskitytään kuitenkin erityisesti datan mallinnukseen ja analysointiin, josta saadaan tutkittua riippuvuudet muuttujille. Työssä esitellään teräksen tuotantoketju yleisellä tasolla, mutta valokaariuunia käsitellään tarkemmin. Edellä mainittujen tavoitteiden lisäksi esitellään dataa ja arvioidaan sen hyvyttä, jonka jälkeen tutkitaan Microsoft Excelin data-analyysityökalulla dataa ja lopuksi suoritetaan tuloksien arviointi.

2 TERÄS

2.1 Hiiliteräs

Teräs on yksi tärkeimmistä metalleista nykypäivänä. Terästä löytyy erilaisista rakenteista, koneista, välineistä ja säiliöistä. Teollisuudessa terästä käytetään paljon, minkä takia sille tarvitaan tehokas tuotantoketju. Teräksen suurimmat tuottajat löytyvät Kiinasta, Intiasta ja Afrikasta. Kiina on myös yksi teräksen suurimmista kuluttajista.

Teräs on metalliseos, joka sisältää hiiltä 0–2 %, mutta käytännössä hiilipitoisuus harvemmin ylittää 1.3 %. Mikäli hiilipitoisuus on suurempi, metalliseosta kutsutaan valuraudaksi ja mikäli pienempi, niin meltoraudaksi. Teräs luokitellaan hiiliteräkseksi ja seospohjaiseksi teräkseksi (ruostumaton teräs), jossa tyypillisimpiä seosaineita ovat nikkeli, volframi, molybdeeni, kromi ja vanadiini. Teräksessä on myös muita aineita, kuten rikkiä, fosforia, mangaani ja silikonia, joiden erottaminen ei ole helppoa, mutta tarpeellista terästyypin mukaan. Hiiliteräksen kovuus ja vahvuus kasvaa hiilipitoisuuden kasvaessa, mutta sen sijaan sen muovautuvuus heikkenee. (Gupta 2009).

Terästä voidaan valmistaa rautapitoisesta malmista tai vaihtoehtoisesti voidaan käyttää kierrätysterästä. Rautapitoinen malmi louhitaan maaperästä ja kuljetetaan rikastamolle. Rikastusprosessi voi poiketa malmin laadun mukaan; esim. malmi voi olla rikkipitoista pyriittiä tai se voi olla happipitoista malmia, kuten magnetiittia tai hematitiittia. Rikastamalla erotetaan malmista halutut metallimineraalit ja ei-haluttu sivukivi. Tyypillisiä prosessivaiheita rikastuksessa on murskaus ja jauhatus, joiden jälkeen voidaan käyttää soveltuvaa erotusmenetelmää esim. vaahdotusta. (Hukki 1964)

Raudan rikastuksen jälkeen rauta pelletoidaan isompaan kappalekokoon. Pelletöinnin jälkeen rauta voidaan hyödyntää esimerkiksi masuunissa. Masuunissa hoidetaan perinteinen hiiliteräksen valmistus. Masuuniin syötetään ylhäältä kuivatislattu hiili eli hiilikoksi ja pelletoitu rauta. Masuunin alapuolelta syötetään happirikastettua ilmaa (Cameron 2020). Masuuni kuumenee korkeisiin lämpötiloihin ja tapahtuu pelkistysreaktio, jossa raudasta pelkistyy happi pois ja hiili puolestaan hapettuu.

Masuunireaktion jälkeen rautasulalle suoritetaan rikinpoisto, hiilenpoisto, hapenpoisto ja seosaineiden lisäys. (Cameron 2020)

2.2 Ruostumaton Teräs

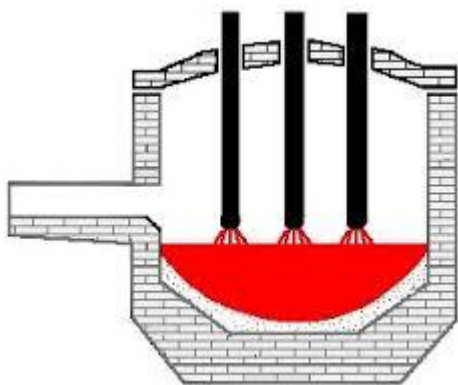
Toinen terästyyppi, joka kytkeytyy valokaariuunin toimintaan, on ruostumaton teräs. Ruostumatonta terästä löytyy kaikkialta, kuten teollisuuden säiliöistä, aterimista, keittiötyökaluista, astioista ja rakenteista. Ruostumaton teräs on hyvin tärkeä materiaali sen lisättyjen ominaisuuksien takia, joita hiiliteräksessä ei ole. Teräkseen voidaan lisätä eri yhdisteitä, jotta voidaan vaikuttaa sen ominaisuuksiin. Kromin lisäys parantaa sen kestävyyttä korroosiota vastaan ja nikkelin lisäys sen sijaan parantaa teräksen kykyä vastustaa lämpölaajenemista ja korroosionkestävyyttä (Gupta 2009). Ennen vanhaan ruostumatonta terästä valmistettiin ilman happikonvertertia laittamalla valokaariuuniin teräsromua, rautamalmia ja kalkkia (CaO). Uuniin lisätään sulamiseen jälkeen ferrosilikonia, kalkkia ja fluorisälpää (Swinbourne et al. 2010). Tämän jälkeen nostetaan sulakylvyn lämpötilaa ja lisätään sekaan matalahiilipitoista ferrokromia (Patil 1998). 1970-luvun alun jälkeen alettiin käyttämään niin sanottua ‘duplex’-menetelmää, joka hyödyntää valittua happikonvertertia hiilenpoistoon. Duplexissa on myös se hyvä puoli, että kalliin matalahiilipitoisen ferrokromin voi korvata korkeahiilipitoisella ferrokromilla (Rao & Chatterjee 1976).

Ruostumattomaksi teräkseksi kutsutaan terästä, johon on seostettu vähintään 10 % kromia ja muita aineita, kuten nikkeliä ja mangaania (Swinbourne et al. 2010). Ruostumattomia teräksiä on montaa eri laatua ja sen ominaisuudet poikkeavat riippuen teräkseen lisätyistä seosaineista ja niiden määrästä seoksessa. Hiilen pitoisuus tulee pitää mahdollisimman matalana, sillä suurempi hiilipitoisuus heikentää korroosionkestokykyä (Ward 1962).

2.3 Valokaariuuni

Valokaariuunissa tapahtuu teräksen ja seosaineiden sulaminen. Grafiittielektrodien ja metallin välille muodostuu valokaari, joka aiheuttaa metallin sulamisen. Kuvassa 1 näkyy

grafiittielektrodit, jotka sulattavat teräsphanoksen keskeltä reunoille. Uunin sisällä on tulenkestävää massaa ja tiiliä, jotka suojaavat uunia sulakylvytä ja vesijähdytteiset paneelit seinämällä pyrkivät pitämään lämpöenergian pois uunin seinämistä ja katosta (Pauna 2020). Uunissa vapautuu sulamisen aikana myös kaasuja, jotka ohjataan uunista ulos kaasunpoistojärjestelmän kautta (Pauna 2020).



Kuva 1. Valokaariuuni (Wikicommons)

Prosessin alkuvaiheessa tulee valita valmistettavan teräslaadun tyyppi. Romutelakanhoitaja valmistelee teräsromuastiat panosta varten sulattajan vaatimuksien mukaan. Panoksen valmistaminen huolellisesti on tärkeä osa prosessia oikean sulamiskemian ja hyvien sulamisolosuhteiden varmistamiseksi. Romu kerrostetaan astiaan koon ja tiheyden mukaan, jotta terässula saadaan muodostumaan mahdollisimman nopeasti, ja samalla turvataan uunin seinämät ja katto kaarisäteilyltä. Valokaariuunin päältä poistetaan katto ja kaadetaan sitä kautta kierrätysteräsphanos. Tämän jälkeen katto ja elektrodit lasketaan panoksen päälle ja syötetään energiaa, jotta elektrodien ja panoksen välille syntyy kaari. Energia voi olla kemiallista tai sähköistä, mutta pääosin käytetään sähköenergiaa elektrodeilla. Alussa valitaan välijännitehana, kunnes elektrodit uppoutuvat romuun. Kun elektrodit ovat porautunut tarpeeksi syvälle romuun, avataan korkeajännitehana, joka synnyttää pitkän kaaren. Korkeajännitehanaa ei avata suoraan, jotta voidaan välttää kaaren aiheuttamat mahdolliset vauriot uunille. Pitkä kaari maksimoi kaaren lämmön, koska se siirtää voiman romuun ja uunin tulisijassa olevaan nestemäiseen metallialtaaseen. (Singh 2020)

Kemiallista energiaa voidaan syöttää esimerkiksi kuvassa 1 esiintyvistä happipolttimista tai happilansseilla. Happipolttainepolttimet polttavat maakaasua hapella tai hapen ja ilman sekoituksella. Lämpöä siirtyy romulle liekkisäteilyllä, konvektiolla ja johtumisella. Kun sula teräsallas on muodostunut, happi voidaan syöttää suoraan sulaan teräskylpyyn. Happi reagoi useiden kylvyssä olevien komponenttien kanssa, kuten alumiinin, piin, mangaanin, fosforin, hiilen ja raudan kanssa. Kaikki nämä reaktiot ovat eksotermisiä ja antavat lisäenergiaa romun sulamiseen. Reaktiossa syntyneet metallioksidit päätyvät kuonaan ja syntynyt hiilimonoksidi palaa uunissa tai poistuu kaasunpoistojärjestelmän kautta. Kun panoksia ei enää sulateta, lasketaan jänniteporrasta, jotta uunin seinämät eivät vaurioidu kaaren säteilyn vuoksi. (Singh 2020)

Terässulan sekaan on sitoutunut monenlaisia aineita. Jotkut aineet ovat tarpeellisia eri teräslaaduille, kuten kromi ja nikkeli, mutta jotkut taas ovat haitallisia, kuten rikki ja fosfori. Sulan sekaan on myös liennut kaasuja, kuten vetyä ja typpeä. Erityisen tärkeää on poistaa sulasta fosfori ja rikki, mutta optimiolosuhteet fosforin erotukselle ovat päinvastaiset rikin erotukselle. Fosforin poistossa edesauttaa matala sulan lämpötila, sulan emäksisyys ja rautaoksidien (FeO) taso sulassa. Rikin poisto on hankalaa, ja se pyritään hoitamaan jo teräksen pelkistysvaiheessa. (Singh 2020)

2.4 Valokaariuunin Energiatase

Valokaariuuni tarvitsee paljon energiaa, jotta se voi alkaa sulattamaan panosta. Suurin energiasyöttö menee elektrodeille, jotka saavat aikaan valokaaren. Sähkövirran lisäksi uunissa ilmenee kemiallista energiaa, jota syntyy uunissa olevista raaka-aineista (Singh 2020).

Termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön mukaan energiaa ei voi syntyä tyhjästä eikä se voi hävitä itsekseen, se voi muuttua vaan muotoaan. Tätä sääntöä hyödyntäen energiatase on kaikkein yksinkertaisimmassa tapauksessa:

$$\text{Energian syöttö} = \text{Energia ulos} + \text{Energiahäviöt} \quad (1)$$

Yhtälöstä 1 saadaan pohja energiataseyhtälölle, joka voidaan johtaa kaikelle energialiikenteelle valokaariuunissa (Oinas 2016). Valokaariuunin energiatase on esitetty yhtälössä 2.

$$E_{\text{total}} = \eta_{\text{el}} \times E_{\text{el}} + E_{\text{chem}} = E_{\text{steel}} + E_{\text{slag}} + E_{\text{offgas}} + E_{\text{cool}} + E_{\text{other}}, \quad (2)$$

missä E_{total} on valokaariuunin käyttämä kokonaisenergia (kWh),

η_{el} on korkeajännitejärjestelmän hyötysuhde,

E_{el} on käytetty sähköenergia (kWh),

E_{chem} on kemiallisten reaktioiden lämpösisältö (kWh),

E_{steel} on teräksen lämpösisältö (kWh),

E_{slag} on kuonan lämpösisältö (kWh),

E_{offgas} on savukaasujen lämpösisältö (kWh),

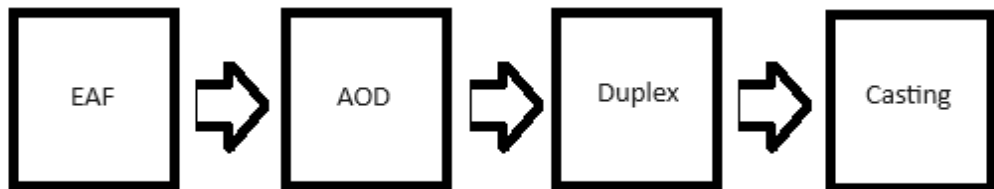
E_{cool} on jäähdytykseen siirtyvä lämpösisältö (kWh) ja

E_{other} on muut lämpöhäviöt (kWh) (Karassaari 2008, 45).

2.5 AOD-konvertteri

Argon-oxygen-decarburization yksikköprosessin eli AOD-konvertterin tarkoituksena on poistaa terässulasta hiiltä mahdollisimman pienillä metallikomponenttien kulumisella (Järvinen et al. 2011). Ennen 1970-lukua oli tavallista suorittaa hiilenpoisto valokaariuunissa sulamisen yhteydessä. Tämän jälkeen aloitettiin käyttämään niin sanottua ‘duplex’-menetelmää, jossa sulatus tapahtuu valokaariuunissa, mutta jalostus tapahtuu AOD-konvertterissa (Hay et al. 2019, s.31). AOD-konvertteriproessin toisena tavoitteena on suorittaa rikin poisto ja osa seostuksesta (Hay et al 2019, s.31). AOD-konvertteri hyödyntää hiilenpoistossa happea ja inerttejä kaasuja, kuten argonia tai typpeä, suuttimien kautta. (Järvinen et al. 2011). Kun prosessiin on puhallettu tarpeeksi happea, voidaan pelkistää sula. Kuonasta voidaan pelkistää erilaisten piin yhdisteiden avulla mellotuksen aikana hapettunut kromi (Hay et al. 2019, s.41). Pelkistykseen jälkeen otetaan uusi näyte, ja jos se läpäisee laatukynnyksen, terässula voidaan lähettää senkka-asemalle valusenkassa (Oinas 2016). Senkka-aseamalla tehdään viimeiset seostukset ja

jäähdytetään teräs valamislämpötiloihin. Tämän jälkeen kuuma terässula menee valssaukseen. Kuvassa 2 on esitetty ruostumattoman teräksen prosessilinja.



Kuva 2. Ruostumattoman teräksen prosessilinja

3 LINEAARINEN REGRESSIO

Lineaarinen regressioanalyysi on analyysimenetelmä, jolla tutkitaan vastemuuttujan suhdetta tulomuuttujaan. Verrattavia tulomuuttujia voi olla useampia, mutta tässä työssä tutkitaan yhtä vastemuuttujaa ja yhtä tulomuuttujaa kerrallaan. Linearisella regressiolla toisin sanoen pyritään selittämään muuttujien välillä olevaa lineaarista riippuvuutta ja tyypillisesti saadaan datapisteiden välille estimoitua suora. Muuttujien tulisi olla jatkuva-aikaisia ja normaalijakautuneita. Monimuuttuja lineaarinen regressioyhtälö näkyy yhtälössä 3: (Ryan 2003)

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + e. \quad (3)$$

Yllä, muuttujat X_1, X_2, \dots, X_p , ovat selittäviä muuttujia ja $\beta, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ ovat niiden regressiokertoimia ja e on jäännöstermi eli residuaali, joka ilmaisee selittämättä jäävän satunnaisvaihtelun (Ryan 2003). Tämän työn osalta riittää, kun tutkitaan β_1 ja x_1 asti, sillä tutkitaan vain yhtä muuttujaa kerrallaan. Kyseisen kaavan voi muuntaa yksittäiselle datapisteelle, kun on identifioitu parametrien regressiokertoimet seuraavasti: (Ryan 2003)

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + e_i. \quad (4)$$

Yhtälöön 4 sijoitetaan data-analyysiosiossa selvitettyt kertoimet, jos lineaarista riippuvuutta ilmenee. Mallille määritetään sellaiset parametrien lukuarvot, joilla saadaan mahdollisimman hyvä sovitus. Regressiokertoimet saadaan selville käyttämällä pienimmän neliösumman menetelmää. Tällä menetelmällä pyritään sovittamaan koordinaatistoon suora, joka kuvastaa pisteiden sijaintia mahdollisimman hyvin (Ryan 2003). Jokaisesta koordinaattipisteestä lasketaan etäisyyden neliö sovitettavasta suorasta ja etsitään suora, jossa nämä yhteenlasketut etäisyydet olisivat minimissään. Parhaimman suoran tapauksessa neliöiden pinta-alojen summa (sum of squared errors, SSE) on mahdollisimman pieni. Minimoitava neliösumma on esitetty yhtälössä 5.

$$SSE = \sum_{i=1}^N (y_i - (\beta_1 x_i + \beta_0))^2 \quad (5)$$

4 DATA-ANALYYSI

4.1 Käytetty data

Käytetty aineisto on saatu sivulta nimeltä Kaggle (<https://www.kaggle.com>) ja aineiston nimi on *Industrial Data from the Electric Arc Furnace*. Tutkittavassa aineistossa on mittaustiedot kolmesta parametrasta, jotka ovat aktiivinen voima, reaktiivinen voima ja lämpötila. Aktiivinen voima on voima, joka syötetään valokaariuuniin ja reaktiivinen voima on sen sijaan voima, joka kuluu uunin lämpötilan nostamiseen. Reaktiivinen voima voi olla negatiivista eli kapasitiivista resistanssia tai se voi olla positiivista eli induktiivista resistanssia (Ahmad 2022). Parametrien lisäksi tiedetään lämmityksen alku- ja loppuajankohdat.

Data-analyysi ei kuitenkaan ole aina yksiselitteistä. Aineistosta löytyi yksittäinen datapiste, joka oli virhemittaus voiman mallinnuksesta. Kyseinen poikkeava datapiste hylättiin analyysistä, jotta tulokset eivät vääristyisi. Muita poikkeavia arvoja ei erityisemmin aineistossa ollut. Toinen ongelma aineistossa oli poikkeava määrä toistoja mittauksista. Datapisteitä löytyi eri määrä eri sarakkeista, joten nämäkin piti suodattaa siten, että saadaan samalta mittaussarjalta oikea mittaus. Aineistosta löytyi termi ”Key”, joka kuvasi tätä tiettyä mittaussarjaa. Aineistosta suodatettiin ne ”Keyt”, joilla oli eriävä lukumäärä mittapisteitä molemmilla dataseiteillä. Aineistot suodatettiin Matlab[®]: lla. Datapisteitä löytyi kaiken kaikkiaan noin 9000 kpl ja suodatuksen jälkeen 4331 kpl.

4.2 Työkalut

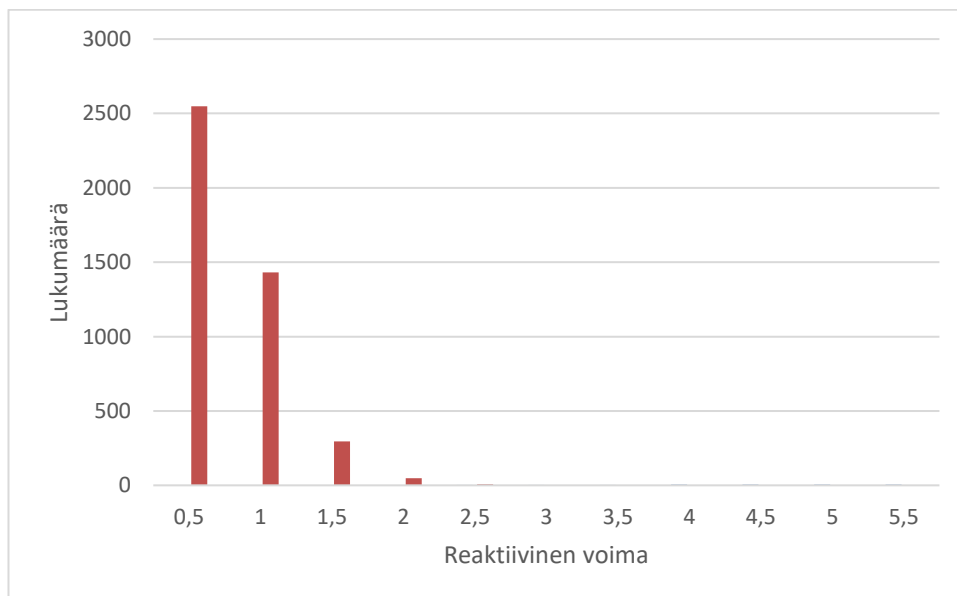
Data-analyysityökaluista käytettiin Excelin regressiotyökalua, jonka avulla saatiin kolme eri taulukkoa. Ensimmäisessä taulukossa saadaan selville sovituksen hyvyyteen liittyviä tunnuslukuja. Tärkein termi tässä on korrelaatio, joka saa arvoja väliltä 0–1. Tämä kertoo kuinka hyvin pisteet asettuvat suoralle ja se on myös yksi mallin hyvyyden mitoista. Jos korrelaatio lähestyy ykköstä, niin silloin malli on hyvä. Toinen tärkeä tilastotermi on keskivirhe, joka on mallinnusvirheen varianssin estimaatti eli kuvaa keskimääräistä poikkeamaa keskiarvosta.

Toinen taulukko on ANOVA-taulukko. Tämä on varianssianalyysiin liittyvä taulukko, joka on yksi Excelin analyysityökaluista. Tässä tärkein termi on P-arvo. P-arvo on yksi mallin hyvyyden mitta ja mitä suurempi P-arvo on, sitä todennäköisemmin malli on virheellinen.

Kolmannessa taulukossa löytyy mallin parametrien lukuarvot, niihin liittyvät keskivirheet ja P-arvot. P-arvo tässä on tärkeä, sillä se on yksi mallin hyvyyden mitta ja jos P-arvo on alle 0.05, niin silloin mallin termit ovat tilastollisesti merkitseviä. Tästä taulukosta löytyvät myös normaalijakauman rajoihin liittyvät luottamusrajat, mutta ne eivät ole tässä työssä olennaisia

4.3 Reaktiivinen voima aktiivisen voiman funktiona

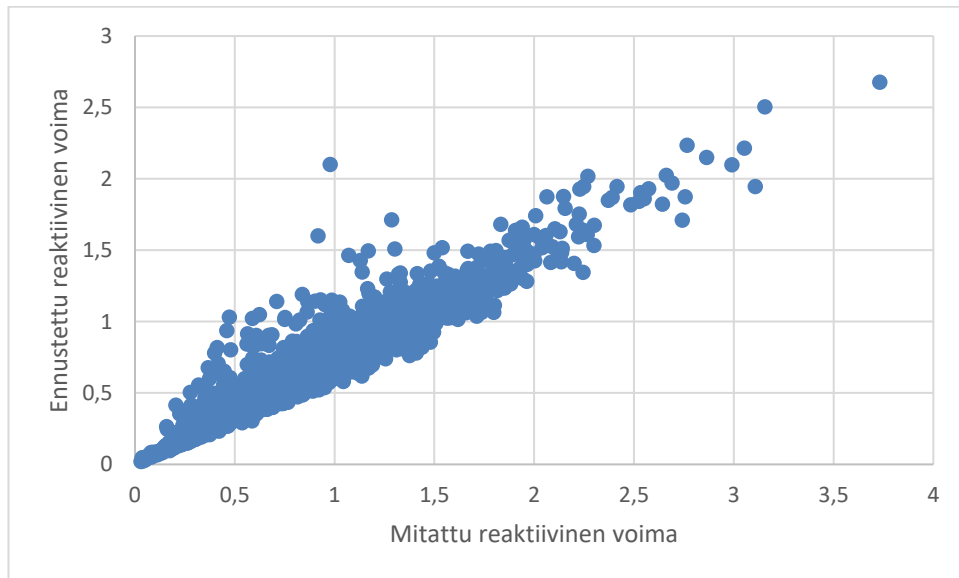
Regressiotyökalua käytettiin kolme kertaa mallintamaan voimien välistä riippuvuutta keskenään ja voimien suhdetta lämpötilan suhteen. Reaktiivisen voiman saamien arvojen jakauma on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Reaktiivisen voiman alueet

Voimien riippuvuuden mallista saadaan selville, että voimat korreloivat hyvin keskenään ja mallin tulos on hyvä. Kuten kuvasta 4 näkyy, reaktiivisen voiman ja aktiivisen voiman

välillä on selvästi lineaarinen riippuvuus. Kuvassa on pari pistettä, jotka ovat hiukan kauempana muista pisteistä, mutta ne eivät vaikuta tulokseen merkittävästi.



Kuva 4. Voimien välinen suhde

Kuvassa 4 esitetyn riippuvuuden korrelaatio on 0,9204, joka on lähellä numeroa yksi, joten riippuvuus voimilla on hyvä. Keskivirhe eli varianssi on 0,1152, joka on matala. Matala varianssi ja korkea korrelaatio on hyvä merkki mallin hyvyydelle. P-arvo on nolla eli mallin ennusteet ovat hyvät ja todennäköisyys mallin virheellisyydelle on olematon. Kaiken tämän perusteella malli toimii hyvin voimille.

Taulukko 1. Mallin hyvyyden ANOVA-taulukko voimille.

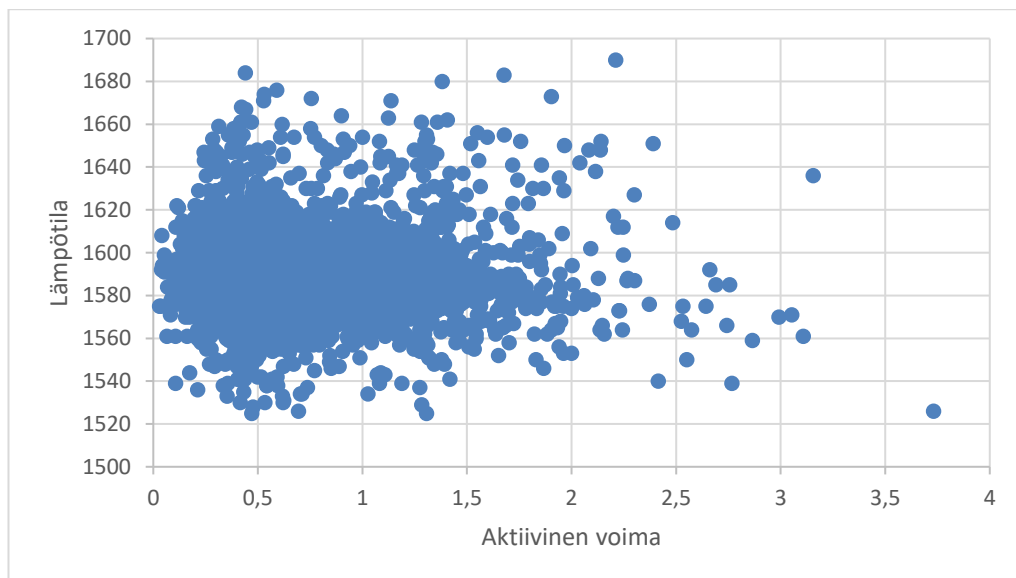
ANOVA	<i>va</i>	<i>NS</i>	<i>KN</i>	<i>F</i>	<i>ε:n tarkkuus</i>
Regressio	1	664,7113	664,7113	50059,3453	0
Jäännös	4328	57,4692	0,013278		
Yhteensä	4329	722,1804			

Data-analyysityökalun avulla saadaan myös voimien välisen suoran kertoimet. Leikkauspiste saa arvon 0,0413 ja muuttuja x saa kertoimen 1,2456. Nämä vastaavat termejä β_0 ja β_1 kaavassa (4), jotka voidaan sijoittaa yhtälöön (6)

$$Y = 0.0413 + 1.2456x \quad (6)$$

4.4 Aktiivinen voima lämpötilan funktiona

Loogisesti ajateltuna valokaariuunin virransyötön noston voisi olettaa nostavan lämpötilaa ylöspäin, mutta näin ei käynyt. Kuten kuvasta 5 näkyy jo päällepäin, mitään riippuvuutta ei suoranaisesti ole ja datapisteitä löytyy kaikkialta. Näiden lisäksi huomataan, että lämpötila-alue on 1520°C - 1700°C välillä ja suurempi arvo aktiiviselle virralle ei tarkoita suurempaa lämpötilaa.



Kuva 5. Aktiivisen voiman ja lämpötilan suhde

Taulukkoon 2 on tulostettu aktiivisen voiman ja lämpötilan välisen mallin ANOVA-taulukko. Kuvasta huomataan, että mallin P-arvo on korkea. Pelkästään tämän perusteella voidaan tulokset hylätä. Sen lisäksi saatu korrelaatio regressiolle on 0,0002, joka tarkoittaa sitä, että termit eivät korreloi ollenkaan. Varianssi on 18,4133, joka tarkoittaa

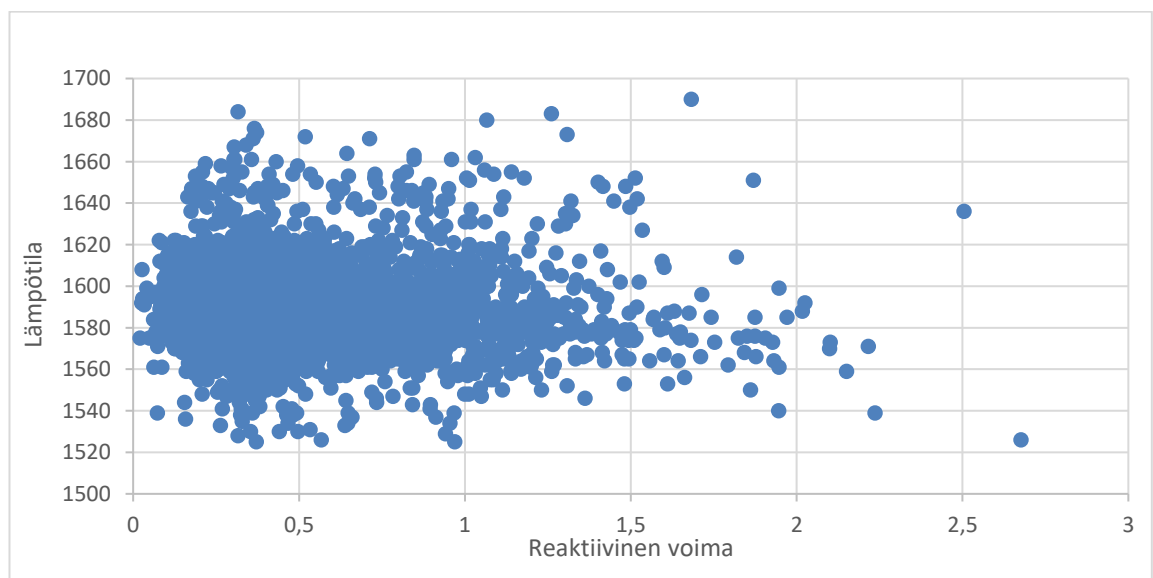
sitä, että mallinnusvirhettä ilmenee paljon. Mallin tarkkuus on näiden perusteella erittäin huono.

Taulukko 2. Aktiivisen voiman ja lämpötilan tulokset

ANOVA					
	va	NS	KN	F	F:n tarkkuus
Regressio	1	273,8104	273,8104	0,803981377	0,369956
Jäännös	4328	1473979	340,5681		
Yhteensä	4329	1474252			

4.5 Reaktiivinen voima lämpötilan funktiona

Reaktiivisen voiman tulokset vastaavat aika pitkälti aktiivisen voiman tuloksia. Kuva 6 näyttää samantapaiselta, kuin kuva 5 eli lineaarista riippuvuutta ei ole ja datapisteitä on kaikkialla. Taulukosta 3 nähdään, että P-arvo on hyvin pieni, joka tarkoittaa sitä, että malli on todennäköisesti oikein. Toisaalta korrelaatiokerroin on 0,0046 ja keskivirhe on 18,4133. Tämä puolestaan tarkoittaa sitä, että mallinnusvirhettä ilmenee paljon, joten mallin voidaan todeta olevan epätarkka.



Kuva 6. Reaktiivisen voiman ja lämpötilan suhde

Taulukko 3. Reaktiivisen voiman ja lämpötilan tulokset

ANOVA					
	<i>va</i>	<i>NS</i>	<i>KN</i>	<i>F</i>	<i>F:n tarkkuus</i>
Regressio	1	6832,7	6832,7	20,15233033	7,33724E-06
Jäännös	4328	1467420	339,0526		
Yhteensä	4329	1474252			

5 POHDINTAA JA JATKOKEHITYSTYÖ

Aktiivisella ja reaktiivisella voimalla on tulosten perusteella selvästi lineaarista riippuvuutta. Voimien ja lämpötilan suhteen mallit sen sijaan korreloivat huonosti keskenään ja näillä ei esiintynyt minkäänlaista lineaarista riippuvuutta. Loogisesti ajateltuna valokaariuunin virransyötön noston voisi olettaa nostavan lämpötilaa ylöspäin, mutta näin ei aineiston mukaan tapahtunut. Tämä tulos voisi johtua aineiston datapisteistä. Valokaariuuniin syötetään metallia panoksina ja panoksen koko, muoto ja tiiviys voivat poiketa toisistaan, mitkä voivat vaikuttaa poikkeaviin lämpötilaeroihin, vaikka syötettäisiin täysin sama energiamäärä. Enemmän energiaa kuluu sulattamaan isompaa panosta ja se myös lämpenee hitaammin. Toinen vaihtoehto voi olla, että valokaariuunissa esiintyy vaihtelevissa määrin lämpöhäviöitä, mutta tämä ei ole kovin todennäköistä.

Tulokset voisi saada merkittävämmiksi, jos dataan täydennetään puuttuvat tiedot tai jos panos voidaan standardoida, jonka mukaan kaikki testit tehdään. Tämän pitäisi parantaa korrelaatiota huomattavasti ja vähentää keskihajontaa. Tässä työssä tätä ei kuitenkaan tehty.

6 YHTEENVETO

Tämän kandidaatin työn tavoitteena oli tutkia dataa valokaariuunin energian syötöstä ja lämpötilasta ja selvittää näiden muuttujien välisiä riippuvuuksia. Kyseinen data mallinnettiin, analysoitiin ja arvioitiin. Työssä käytettiin Excelin data-analyysityökalua lineaarisuuden tutkimiseen ja kuvaajia mallinnukseen. Tämä työ perustui kirjallisuusdataan (www.Kaggle.com), joka sisälsi arvoja valokaariuunin virransyötöstä ja valokaaren lämpötilasta. Työn toisena tavoitteena oli tutustua valokaariuunin toimintaan, esitellä sitä ja tutustua teräksen tuotantoketjuun.

Työssä käytetty aineisto on suodatettu, analysoitu, mallinnettu ja arvioitu. Aktiivisen- ja reaktiivisen voiman välillä oli selvä lineaarinen riippuvuus tulosten perusteella ja malli todettiin tilastollisesti merkittäväksi. Lineaarista riippuvuutta ei ilmennyt voimien tapauksessa verrattaessa voimia lämpötilan kanssa. Kuvien 5 ja 6 datapisteet näyttivät päällepäin hajanaisilta ja lineaarisuutta ei havaittu scatter-kuvaajista. Muut tilastolliset termit, kuten varianssi oli korkea ja korrelaatio oli matala. Pelkästään niiden perusteella pystyttiin lämpötilamallit hylkäämään.

LÄHDELUETTELO

- Sami Oinas 2016: 'Valokaariuunin Panostusajankohta' Opinnäytetyö
<https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/111682/Valokaariuunin%20Panostusajankohta%20Sami%20Oinas.pdf?sequence=1> [10]
- Munir Ahmad: Active Power, Reactive Power, Apparent Power, and the Role of Power Factor: 2022 <https://control.com/technical-articles/active-power-reactive-power-apparent-power-and-the-role-of-power-factor/>
- Modern Regression Analysis for Scientists and Engineers
<https://www.nist.gov/system/files/documents/2017/05/09/ryannotes-1.pdf>
- Hay, T. (Thomas) ; Echterhof, T. (Thomas) ; Visuri, V.-V. (Ville-Valtteri): Development of an Electric Arc Furnace Simulator Based on a Comprehensive Dynamic Process Model 2019
<https://oulurepo.oulu.fi/bitstream/handle/10024/26519/nbnfi-fe202003249115.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Kho, T.S.; Swinbourne, D.R.; Blanpain, B.; Arnout, S.; Langberg, D. Understanding stainless steelmaking through computational thermodynamics Part 2 VOD-converting 2010
- B. V. Patil, A. H. Chan and R. J. Choulet: 'Refining of stainless steels', in 'The making, shaping and treating of steel', 11th edn, 715–741; 1998, Warrendale, PA, Association of Iron and Steel Engineers
- T. R. R. Rao and D. Chatterjee: MECON J., 1976, 3, (2), 13–18
- R. G. Ward: 'An introduction to the physical chemistry of iron and steel making', 143; 1962, London, Edward Arnold Ltd
- Gupta, H. N: 'Manufacturing Process' 2019
- Ian Cameron, Mitren Sukhram, Kyle Lefebvre, William Davenport 'Blast furnace ironmaking: analysis, control and optimization'
- Ramesh Singh: 'Applied welding engineering: processes, codes and standards' 2020
- Järvinen, Mika P. ; Pisilä, Sauli ; Kärnä, Aki ; Ikäheimonen, Topi ; Kupari, Pentti ; Fabritius, Timo Fundamental Mathematical Model for AOD Process. Part I: Derivation of the Model.
- Karassaari, O-P. 2008, Valokaariuunin energiatase ja kaatolämpötilan mallinnus. Oulun yliopisto. Prosessi- ja ympäristötekniikan osasto. Diplomityö.

Hukki R.T: Mineraalien hienonnus ja rikastus 1964