

Terässulan lämpötilanmittaus valokaariuunissa

Toni Ahava

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelman opinnäytetyö
Kone- ja tuotantotekniikka
Insinööri (AMK)

KEMI 2014

ALKUSANAT

Tämä työ on tehty Outokumpu Stainless Coil EMEA:lle.

Haluan kiittää valvojaani Outokumpu Stainless Coil EMEAn terässlaiton kehitysinsinööri Kimmo Valloa mielenkiintoisista keskusteluista ja avusta, jota olen työhöni liittyen saanut. Kiitokset kuuluvat myös muillekin terässlaiton insinööreille, jotka ovat autaneet työhöni liittyvissä asioissa. Haluan kiittää myös oppilaitoksen ohjaajaani Lauri Kantolaa, jolta sain paljon palautetta työhöni liittyen.

Lisäksi haluan kiittää vaimoani Tiinaa ja poikiani Juliusta ja Romeota saamastani tuesta opintojeni suhteen.

Tornio 22.4.2014

Toni Ahava

TIIVISTELMÄ

LAPIN AMMATTIKORKEAKOULU, Teollisuus ja luonnonvarat

Koulutusohjelma:	Kone- ja tuotantotekniikka
Opinnäytetyön tekijä(t):	Toni Ahava
Opinnäytetyön nimi:	Terässulan lämpötilamittaus valokaariuunissa
Sivuja (joista liitesivuja):	44 (0)
Päiväys:	22.4.2014
Opinnäytetyön ohjaaja(t):	TkL Lauri Kantola
<p>Opinnäytetyö on tehty Outokumpu Stainless Coil EMEA:n terässulatolla. Tavoitteena on selvittää mahdollisuuksia terässulan lämpötilan mittaukselle valokaariuunissa. Työssä selvitetään millaisia menetelmiä on olemassa ja mitä ominaisuuksia niillä on. Lisäksi työssä pohditaan niiden testattavuutta tehdasolosuhteissa.</p> <p>Outokummun valokaariuunissa ei tällä hetkellä ole mahdollisuutta mitata terässulan lämpötilaa. Tästä johtuen on vaikeaa arvioida sulatusprosessin kestoa, jotta sulan lämpötila olisi optimaalinen seuraavaa prosessia varten.</p> <p>Uniin perehtymällä selvitettiin mitä vaatimuksia ja haasteita ympäristö asettaa lämpötilanmittaukselle. Kirjallisuudesta selvitettiin teoriaa olemassa olevista teknologioista. Laitteiden toimittajilta pyydettiin lisätietoa sovellukseen mahdollisista ratkaisuista. Näiden perusteella on selvitetty, miten ratkaisuja voidaan soveltaa ja testata Outokummun terässulaton valokaariuunissa.</p> <p>Työssä saatiin selville, että terässulan lämpötilan mittaamiselle valokaariuunista mahdollisia teknologioita ovat termoelementti- sekä pyrometritekniikat. Termoelementtitekniikan sovelluksia ovat terässulaan pudotettava anturi sekä robotilla terässulaan upotettava anturi. Pyrometritekniikan sovelluksia ovat kaasupuhaltimen integroitu lämpötilalanssi sekä optisen kuidun syöttäminen sulaan pohjasuuttimen kautta.</p>	
Asiasanat: lämpötila, mittaus, teräs, sulatus.	

ABSTRACT

LAPLAND UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES, Industry and Natural Resources

Degree programme:	Mechanical and Production Engineering
Author(s):	Toni Ahava
Thesis title:	Temperature Measurement of Liquid Steel in the Electric Arc Furnace
Pages (of which appendixes):	44 (0)
Date:	22 April 2014
Thesis instructor(s):	Lauri Kantola Lic.Sc. (Tech.)
<p>This work was commissioned by Outokumpu Stainless Coil EMEA. The goal was to investigate the possibilities for temperature measurement of liquid steel in the Electric Arc Furnace. Information about available measuring methods and their features was gathered. Furthermore, testing procedures for the discovered methods were contemplated.</p> <p>Presently, it is not possible to measure the temperature of the steel bath in the Electric Arc Furnace at Outokumpu. Due to this, it is difficult to estimate the necessary length of the melting process in order to achieve an optimal temperature in the melt for the following process.</p> <p>By getting familiarized with the Electric Arc Furnace, requirements and challenges for measuring its steel melt were defined. Theory of different measuring technologies was investigated from appropriate literature. Additional information about feasible solutions was requested from associated suppliers. By means of the information received, possible application and testing of the feasible solutions in the Electronic Arc Furnace in Outokumpu was examined.</p> <p>It was found that there are two feasible technologies for temperature measurement of liquid steel in the Electric Arc Furnace; thermocouple technology and pyrometer technology. The applications of thermocouple technology are drop-sensors and immersion thermocouples. The applications of pyrometer technology are an integrated temperature lance in an oxygen burner and optical fiber feeding into the melt.</p>	
<p>Keywords: temperature, measurement, steel, melting.</p>	

SISÄLLYS

ALKUSANAT	2
TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET	7
1 JOHDANTO	8
2 OUTOKUMMUN TORNION TEHTAAT	9
2.1 Tornion tehtaiden tuotantoprosessi.....	9
2.2 Terässulatto ja sen tuotantoprosessi	10
2.2.1 Ferrokromikonvertteri	11
2.2.2 Sulatus valokaariuunissa	12
2.2.3 Mellotus AOD-konvertterissa	12
2.2.4 Senkkäkäsittely	12
2.2.5 Jatkuvavalu.....	13
3 VALOKAARIUUNI 2.....	14
3.1 Valokaariuuni 2:n toiminta.....	14
3.2 Valokaariuunin asettamat vaatimukset ja rajoitukset lämpötilanmittaukselle .	16
4 LÄMPÖTILAN MITTAAMINEN.....	18
4.1 Nestepatsaslämpömittarit	18
4.2 Bi-metallilämpömittarit	19
4.3 Sauvalämpömittarit	20
4.4 Kapillaarilämpömittarit	20
4.5 Vastusanturit.....	20
4.6 Termoelementtitekniikka.....	21
4.7 Pyrometrit.....	23
5 TERÄSSULAN LÄMPÖTILAMITTAUKSET.....	26
5.1 Termoparianturit.....	26
5.2 Pyrometrit.....	29
6 RATKAISUVAIHTOEHDOT	31
6.1 Pyrometrilanssi.....	31
6.1.1 Siemens-VAI Simetal RCB Temp	31
6.1.2 Soveltuvuus	32

6.1.3	Suunnitelma	33
6.2	Upotusanturit	33
6.2.1	Siemens Simetal LiquiRob.....	34
6.2.2	BSE TempSamp Manipulator	34
6.2.3	Soveltuvuus	35
6.2.4	Suunnitelma	35
6.3	Pudotussondijärjestelmä.....	36
6.3.1	Heraeus Electro-Nite QuiK-Tap järjestelmä.....	36
6.3.2	Soveltuvuus	37
6.3.3	Suunnitelma	37
6.4	Optinen mittaus valokuidun avulla.....	38
6.4.1	Minco Group DynKonTemp	38
6.4.2	Soveltuvuus	39
6.4.3	Suunnitelma	39
7	LOPPUTULOS	40
7.1	Hinta	40
7.2	Käytettävyys	40
7.3	Tarkkuus	41
7.4	Testattavuus	41
8	POHDINTA	42
	LÄHTEET	43

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

AOD	Argon-Oxygen-Decarburization
VKU	Valokaariuuni
RCB	Refining Combined Burner

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö on tehty Outokumpu Oyj:n Tornion tehtaiden terässulatolle. Työ käsittelee lämpötilamittausten mahdollisuutta terässulaton valokaariuunissa. Tavoitteena oli kartoittaa terässulan mittausmenetelmiä, jotka olisivat tarpeeksi tarkkoja sekä toistettavissa olevia, jotta ne olisi hyödynnettävissä prosessin ohjauksessa.

Valokaariuunin sulatusprosessin aikana ei nykyisellään ole tarkkaa tietoa sulan lämpötilasta, joten on kokemuksen ja tuntuman avulla arvioitava, kuinka kauan sulatusta pitää jatkaa. Työssä selvitetään lämpötilamittauksiin liittyviä menetelmiä ja teknologiaa kirjallisuudesta, tieteellisistä julkaisuista ja valmistajilta. Työssä selvitetään myös mahdollisten menetelmien testattavuutta.

Terässulaton valokaariuunissa sulatetaan kierrätettyä romuterästä elektrodeihin johdetun sähköenergian avulla. Terässulan lämpötilan tulee olla oikea, jotta se olisi valmis seuraavaa prosessivaihetta varten ja jotta saavutettaisiin mahdollisimman kustannustehokas sulatusprosessi. Tällä hetkellä prosessinaikaista lämpötilamittausmahdollisuutta ei ole, vaan mittaus suoritetaan kaadon jälkeen.

Jos sulaa kuumennetaan liikaa, prosessiaika pitenee ja uunin vuoraukset kuluvat nopeammin. Lisäksi on käytetty ylimääräistä sähköenergiaa. Jos sula on liian kylmää, sitä joudutaan kuumentamaan seuraavassa prosessissa (AOD konvertterissa) polttamalla ferropiin piitä, joka on kallis energianlähde.

Mahdollistamalla terässulan lämpötilan mittaaminen prosessin aikana voitaisiin arvioida, kuinka kauan sulatusta pitäisi jatkaa oikean lämpötilan saavuttamiseksi. Tällä tavalla vähentyisivät ylikuumat ja liian kylmät sulan lämpötilat ja seurauksena säästyisi energiaa ja aikaa. Tarkoituksena on myös tehdä suunnitelma mittausmenetelmien testaamiselle valokaariuunilla, jolloin niiden toimivuutta voisi selvittää.

Työn rajauksena on, ettei mittausmenetelmien testauksia suoriteta ajanpuutteen vuoksi. Testauksia varten ei myöskään laadita erillistä dokumentaatiota, esimerkiksi piirustuksia, vaan suunnitellaan testausmenetelmät periaatteellisesti.

2 OUTOKUMMUN TORNION TEHTAAT

2.1 Tornion tehtaiden tuotantoprosessi

Tornion tehtaiden tuotantoketju alkaa Keminmaan kromikaivoksesta, joka on ainoa kromikaivos EU:n alueella. Louhittu malmi murskataan maanalaisessa murskaamossa, jonka jälkeen se kuljetetaan esimurskesiiloon. Kaivoksen rikastamossa malmi rikastetaan pala- ja hienorikasteiksi, jotka kuljetetaan Tornion ferrokromitehtaalle. (Outokummun sisäinen O’net, hakupäivä 16.4.2014.)

Ferrokromitehtaan sintraamalla hienorikaste jauhetaan ja pelletoidaan, jonka jälkeen ne sintrataan 1400 °C sintrausuunissa, jolloin rikasteet kovettuvat ja ovat valmiita sulatusta varten. Palarikasteet etukuumennetaan 500–800 °C lämpöisiksi etukuumennussiiloissa ennen sulatusta. (Outokummun sisäinen O’net, hakupäivä 16.4.2014.)

Sula ferrokromi kaadetaan valusenkkään ja kuljetetaan terässulatolle automaattijunalla. Osa sulasta valetaan ja jäädytetään, jonka jälkeen se murskataan terässulaton haluamaan raekokoon. (Outokummun sisäinen O’net, hakupäivä 16.4.2014.)

Terässulatolla ferrokromisulasta poistetaan pii ja osa hiilestä happipuhalluksella. Valokaariuuneille panostetaan kierrätysterästä, nikkeliä, molybdeenioksidia ferrokromia ja koksia. Valokaariuunissa sulatettu teräs kaadetaan senkkään, jossa se siirretään AOD-konvertertiin, jossa pääasiassa vähennetään hiilipitoisuutta kaasupuhalluksen avulla. Konvertterikäsittelyn jälkeen sula siirretään senkka-asemille, joissa teräksen koostumusta säädetään lisäämällä seosaineita. Valmis terässula siirretään jatkuvavalukoneille, joissa sula jähmettyy ja se katkaistaan aihioiksi. Aihiot ovat n 14m pitkiä ja 20–26 tonnin painoisia. Aihioista hiotaan pintaviat pois aihiohiomossa, jonka jälkeen ne kuljetetaan kuumina kuumavalssaamolle tai jäädytetään ja varastoidaan. (Outokummun sisäinen O’net, hakupäivä 16.4.2014.)

Kuumavalssaamalla aihiot kuumennetaan askelpalkkiuuneissa, jonka jälkeen ne siirretään etuvalssaimille, jossa aihio valssataan 100m pituiseksi ja 22mm paksuiseksi nauhaksi. Nauha siirretään Steckel- tyyppiselle nauhavalssaimelle, jonka suurin valssausnopeus on 600 metriä minuutissa. Nauhavalssaimella säädetään nauhan paksuus, jonka jälkeen se siirtyy kelaimelle. Rullat siirretään jäähdytysaltaisiin jäähtymään, jonka jäl-

keen ne kuljetetaan kylmävalssaamolle. (Outokummun sisäinen O’net, hakupäivä 16.4.2014.)

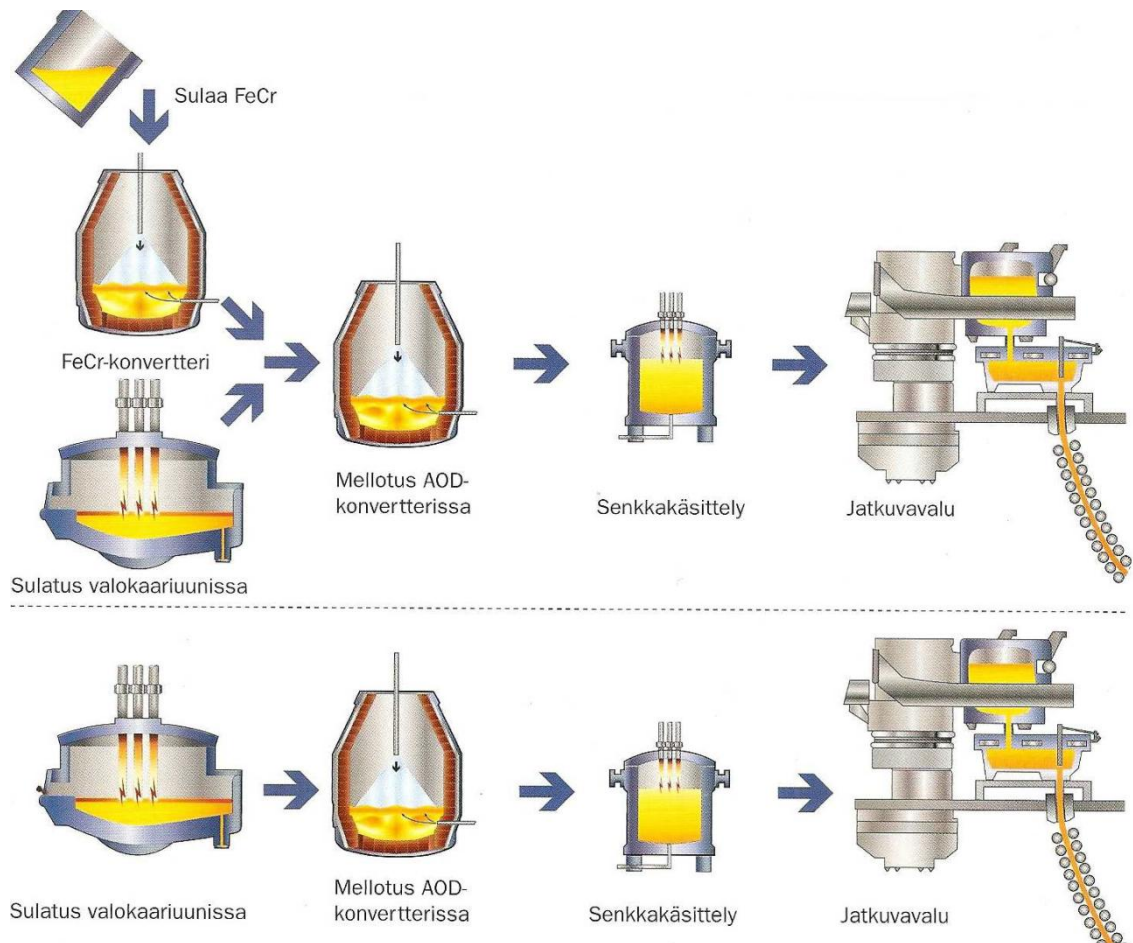
Kylmävalssaamalla rullat nostetaan hehkutus- ja peittäuslinjalle, jossa nauhan mikrorakenne tasataan ja sen pinnalla oleva musta oksidikerros poistetaan kuulapuhalluksen ja happopeittauksen avulla. Teräsnauhasta muuttuu hehkutus- ja peittäuskäsittelyssä mustasta kirkkaaksi. Tämän jälkeen nauhat valssataan Sendzimir-valssaimilla lopullisiin paksuuksiin. Kylmävalssaamisen jälkeen nauhat käsitellään vielä hehkutus- ja peittäuslinjoilla jolloin teräkselle saadaan halutut muovattavuus- ja lujuusominaisuudet. (Outokummun sisäinen O’net, hakupäivä 17.4.2014.)

Teräsnauhojen sileyttä ja tasomaisuutta parannetaan vielä viimeistelyvalssaimilla, ja tarvittaessa edelleen venytysoikaisulinjoilla. Tämän jälkeen rullat siirretään halkaisu- tai katkaisulinjoille, joissa ne halkaistaan kapeiksi rulliksi tai katkaistaan levyiksi. Rullat pakataan automaattisella rullan- ja levynpakkauslinjalla jonka jälkeen ne varastoidaan ja siirretään lähettämölle, missä levy- ja rullapaketit lastataan autoihin, juniin tai kontteihin. (Outokummun sisäinen O’net, hakupäivä 17.4.2014.)

Kylmävalssaamo 2. rakennuksessa toimii jatkuvatoiminen RAP-linja, joka koostuu tandemvalssaimesta, hehkutus- ja peittäusosasta, viimeistelyvalssaimesta ja venytysoikaisuyksiköstä. Linjalla nauhat hehkutetaan, peitataan ja kylmävalssataan. Rakennuksessa on myös oma automaattivarasto, jossa varastoidaan prosessiin tulevat ja lähtevät rullat. (Outokummun sisäinen O’net, hakupäivä 17.4.2014.)

2.2 Terässulatto ja sen tuotantoprosessi

Tornion terässulatolla on toiminnassa kaksi tuotantolinjaa: Linja yksi, joka on aloittanut tuotannon vuonna 1976 ja linja kaksi, joka on aloittanut tuotannon vuonna 2002. Tärkeimmät raaka-aineet terässulatolle ovat teräsromu, ferrokromi ja nikkeli. 1- linjan panoskoko on 95t ja 2- linjan 150t. Panoskoolla tarkoitetaan sitä, kuinka paljon yhteen prosessivaiheeseen voidaan syöttää panosta. Terässulatton prosessi ja sen vaiheet ovat esitettyinä kuvassa 1. (Outokummun sisäinen O’net, hakupäivä 17.4.2014.)



Kuva 1 Ruostumattoman teräksen valmistus Tornion tehtaalla. (Metallinjalostajat ry 2009, 40.)

2.2.1 Ferrokromikonvertteri

Ruostumattoman teräksen valmistuksessa käytettävä ferrokromi valmistetaan kromiitimalmista ferrokromitehtaalla. Ferrokromissa on kuitenkin liian korkea hiilipitoisuus teräksen valmistukselle, jonka takia se käsitellään ferrokromikonvertterissa.

Konvertteriin panostetaan sulaa ferrokromia. Lisäksi panostetaan rautaromua jäähdytystä varten ja kalkkia kuonanmuodostajaksi. Happi- ja paineilmapuhalluksen avulla alennetaan sulan ferrokromin hiili- ja piipitoisuutta. (Metallinjalostajat ry 2009, 41.)

Terässulaton 1-linjan kromikonvertteri on 6,2m korkea, ja sen halkaisija on 4,55m. Konvertterin tilavuus on 41m^3 ja kokonaispaino 180t.

2.2.2 Sulatus valokaariuunissa

Kierrätysterästä panostetaan valokaariuuniin, jossa teräs sulatetaan sähköenergian avulla. Sähköenergiaa syötetään kolmen elektrodin kautta, jotka työntyvät uuniin ylhäältä.

Elektrodien ja panoksen väliin syntyy valokaari, jonka lämpöenergia siirtyy teräkseen joka lopulta sulaa. Teräkseen lisätään ferrokromia, jotta sille saadaan korroosionkestävyyttä. (Metallinjalostajat ry 2009, 36.)

2.2.3 Mellotus AOD-konvertterissa

Jotta teräkselle saataisiin haluttua muokkautumisominaisuutta, suoritetaan hiilipitoisuuden vähennys (mellotus) halutulle tasolle. Tämä tapahtuu käsittelemällä valokaariuunissa sulatettu teräs AOD (Argon-Oxygen-Decarburization) -menetelmällä.

Terässula ja sula ferrokromi panostetaan AOD-konvertteriin. Konvertteri on tiilivuorattu säiliö, johon puhalletaan argon-happiseosta säiliön alaosassa olevien suuttimien kautta ja mahdollisesti myös päältäpuhalluslanssilla. Teräksen hiilipitoisuus ennen AOD-mellotusta on noin yhdestä kahteen painoprosenttia ja mellotuksen jälkeen se on tyypillisesti 0,04 %.

Mellotuksen lisäksi AOD-konvertterilla pelkistetään piillä kuonaan hapettunut kromi takaisin terässulaan ja poistetaan rikkiä. Sulan koostumusta voidaan myös tarkentaa pienillä seostuksilla. (Metallinjalostajat ry 2009, 39.)

2.2.4 Senkkäkäsittely

Senkkauuni on rakenteeltaan samanlainen kuin valokaariuuni, mutta pienempitehoinen. Senkkauunissa suoritetaan terässulan viimeistelyä.

Sulan koostumusta voidaan tarkentaa lisäämällä seosaineita. Lisäksi epämetallisia sulkeumia poistetaan ja lämpötila nostetaan ja tasataan jatkuvavalmu varten. (Metallinjalostajat ry 2009, 45.)

2.2.5 Jatkuvavalu

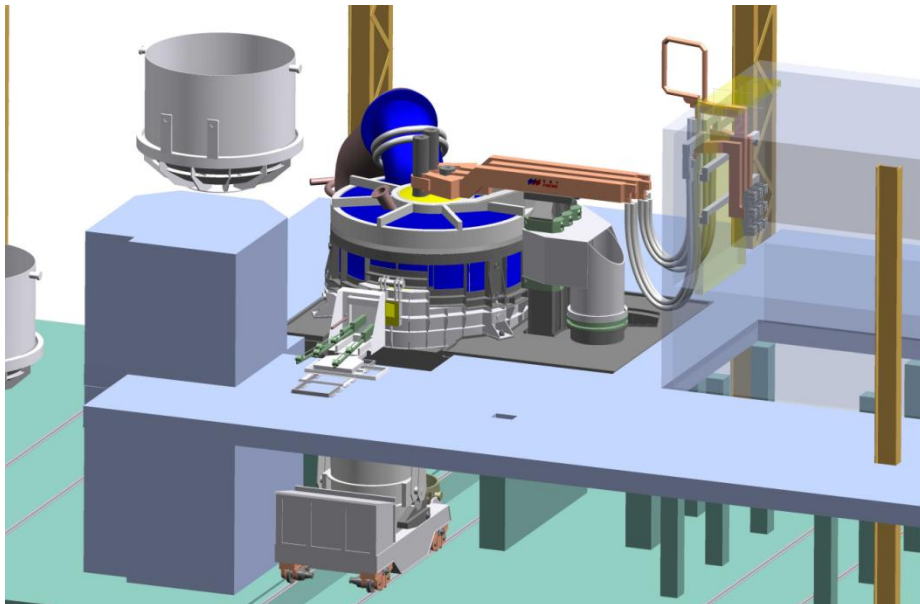
Jatkuvavalussa terässula kaadetaan kokillin läpi. Teräksen jäätyessä kokillissa, sen kuori jähmettyy ja saadaan halutun muotoinen teräsaihio. Kokilli liikehtii jatkuvasti sivusuunnassa, jotta sula ei pääse tarttumaan.

Kokillissa syntyvää valunauhaa vedetään toisiojäähdytysalueelle jossa nauhan jäähdytys tapahtuu vesisuihkulla tai vesisuihkulla ja ilmalla. Tämän jälkeen nauha leikataan mekaanisesti tai kaasulla polttamalla halutun mittaisiksi aihioiksi. Valmiissa aihioissa on pintavikoja, jotka poistetaan aihiohionnassa suurilla hiomakoneilla. (Metallinjalostajat ry, 2009 46.)

3 VALOKAARIUUNI 2

3.1 Valokaariuuni 2:n toiminta

Valokaariuuni 2:n toimittaja on Voest Alpine Industrieanlagenbau/Fuchs. Voest Alpine Industrieanlagenbau (VAI) tunnetaan nykyään paremmin nimellä Siemens VAI Metals Technologies GmbH. Uuni on korkeudeltaan 5,5m, halkaisijaltaan 8,1m ja sen tilavuus on 200m³. Uunin seinät ovat vesijähdytetyt ja seinien alaosa sekä uunin pohja ovat tiilivuoratut. Kolme grafiittista elektroodia, halkaisijoiltaan 710mm, tuottavat valokaaren, jonka vaikutuksesta uunin panos sulaa. Uuni on myös varustettu kippauslaitteistolla ja kääntyvällä holvilla. Valokaariuuni 2 ja sen ympärillä olevat laitteet näkyvät kuvassa 2. (Outokummun sisäinen O’net, hakupäivä 20.2.2014.)



Kuva 2 Valokaariuuni 2 (Outokummun sisäinen O’net 2014, hakupäivä 10.3.2014).

Sulatusta varten ulkomailta ja kotimaasta tuotua romumetallia säilytetään romupihalla. Sieltä romunosturi täyttää junan päällä olevan korin romumetallilla, jonka jälkeen juna kuljettaa sen valokaariuunin halliin. Valokaariuunin valvomosta käsin nosturinkuljettaja nostaa romukorin tiettyyn uunin yläpuoliseen asemaan ja tyhjentää sen uuniin. Jotta valmistettavalle teräkselle saadaan ruostumisenkestävyyttä, laitetaan sekaan noin 10t ferrokromia. Yhden sulatuserän kokonaispaino on 140t. Kuvassa 3 näkyy junan päällä oleva romukori, jota täytetään teräsromulla. (Outokummun sisäinen O’net, hakupäivä 20.2.2014.)



Kuva 3 Romukorin täyttö romupihalla (Outokumpu sisäinen O’net 2014, hakupäivä 10.3.2014).

Kun uunilla aloitetaan sulatus, kolme elektrodia laskeutuu romumetallin ylle ja niille syötetty virta aiheuttaa valokaaren, jonka lämpötila on 3000 - 4000 °C. Elektrodit eivät saa olla kosketuksessa romuun tai upota sulaan, joten niiden etäisyyttä romusta säädetään impedanssin eli vaihtovirran vastuksen perusteella. Sulatusta jatketaan, kunnes sula on saavuttanut tavoitelämpötilan. Romun laadusta riippuen voidaan käyttää myös kahden korin sulatusta. Jos romu on tarpeeksi tiivistä, se mahtuu yhteen koriin. Aikaa kuluu noin 55 minuuttia yhden korin sulatuksessa. Kuvassa 4 näkyy valokaariuunilla käynnissä oleva sulatus. (Outokummun sisäinen O’net, hakupäivä 20.2.2014.)



Kuva 4 Valokaariuuni 2 (Outokummun sisäinen O'net 2014, hakupäivä 10.3.2014).

Sulatuksen jälkeen sula kaadetaan kaatoreiän kautta uunin alapuolella junan päällä olevaan senkkaan. Kaatoa varten kippauslaitteisto pystyy kallistamaan uunia 40°. Kaadon jälkeen juna kuljettaa sulan seuraavalle prosessivaiheelle, AOD-konverterterille, jossa sulan koostumusta muunnetaan. Tämä tarkoittaa pääasiassa hiilipitoisuuden vähentämistä polttamalla. Samalla valokaariuuni aloittaa seuraavan sulatuksen. Uunin prosessi kestää kauemmin kun AOD-prosessi. Tästä syystä AOD:n tuotanto seisoo joka sulatuksen aikana pari minuuttia, eli valokaariuunin toiminnan tehostamiselle on syytä. Vuorokauden aikana suoritetaan 15 - 20 sulatusta. (Outokummun sisäinen O'net, hakupäivä 20.2.2014.)

3.2 Valokaariuunin asettamat vaatimukset ja rajoitukset lämpötilanmittaukselle

Uunin lämpötilaa mittaamalla on tarkoituksena mahdollistaa tarvittavan sulatusajan ennakointi ja näin saada parannettua uunin kapasiteettia. Optimointia varten tarvittava mittaustarkkuus on 10 - 15 °C, josta tavoitteena on 10 °C tarkkuus. Sulan tavoitelämpötila on 1580 °C. Lämpötilan ollessa liian suuri vuoraukset kuluvat nopeammin. Vuorauksien kulumisesta johtuen sulatuksessa käytetty pata vaihdetaan noin kolmen viikon välein, jolloin käytetty pata viedään muuraushallille korjausta varten. Jos uunia ajetaan liian kylmänä, joudutaan käyttämään kalliimpaa energianlähdettä, koska alilämpöistä sulaa joudutaan lämmittämään seuraavassa prosessivaiheessa, eli AOD:lla. Tämä teh-

dään polttamalla ferropiin (FeSi) piitä. (Outokummun sisäinen O'net, hakupäivä 20.2.2014; Vallo 10.3.2014, haastattelu.)

Tulevaisuudessa tarkoituksena on mitata valokaariuunin sulattaman teräksen lämpötila sen jälkeen, kun se on kokonaisuudessaan sulanut. Tämä tarkoittaa sitä, että mittaus kohdistuu sulaan, jonka lämpötila on noin 1600 °C. Korkea lämpötila asettaa rajoituksia lämpötilan mittaamiselle, koska useimmat sulaan työnnetyt anturit tuhoutuisivat korkeasta lämpötilasta johtuen. Optisille mittausmenetelmille haasteen asettaa n. 10-15cm korkea, sulan päälle muodostuva kuonakerros. Kuonakerroksen lämpötilan mittaus ei kelpaa, vaan mittaus on saatava kuonan alta. (Outokummun sisäinen O'net, hakupäivä 20.2.2014; Vallo 10.3.2014, haastattelu.)

4 LÄMPÖTILAN MITTAAMINEN

4.1 Nestepatsaslämpömittarit

Nestepatsaslämpömittarien toiminta perustuu lasin ja jonkin nesteen lämpölaajenemisen eroon. Kun lämpötila nousee, säiliössä oleva neste laajenee ja nousee lasiputkea (kapillaaria) pitkin. Putkessa on asteikko, josta lämpötila voidaan lukea. Nesteinä yleisimmät ovat elohopea ja alkoholi. Teollisuuteen tarkoitettut nestepatsasmittarit ovat metallisuojuksessa ja niitä kutsutaan konelämpömittareiksi, josta esimerkki näkyy kuvassa 5.



Kuva 5 konelämpömittari (Nuova Fima:n www-sivut, hakupäivä 17.4.2014).

Näiden haittapuolena on särkymisalttius, kuten myös rajattu lämpötila-alue ja mittaustulosten rekisteröinnin vaikeus. Mittausalue riippuu mittarissa käytetystä mittaustesteestä joka yleisimmin on elohopea tai alkoholi. Mittareilla voidaan mitata $-200\text{ °C} \dots +750\text{ °C}$ lämpötiloja. Parhaimmillaan näiden mittaustarkkuus on lämpötilojen 0 °C ja $+100\text{ °C}$ välillä, jolloin voidaan parhailla mittareilla saavuttaa $\pm 0,02\text{ °C}$ mittaustarkkuus. Lasilämpömittareiden mittausaluet ovat esitettyinä taulukossa 1. (Halko & Härkönen & Lähtenmäki & Välimaa 1990, 32.)

Taulukko 1: Lasilämpömittareiden lämpötila-alueet (Pihkala 2010, 36).

Täyteneste	Alaraja	Yläraja
Elohopea	-39 °C	$+60\text{ °C}$
Alkoholi	-80 °C	$+70\text{ °C}$
Tolueeni	-80 °C	$+180\text{ °C}$
Pentaani	-200 °C	$+30\text{ °C}$

Edellä esitetystä taulukosta voidaan todeta, että lasilämpömittareiden mittausalueen yläraja on maksimissaan +180 °C, eli niitä ei voida soveltaa valokaariuunille. Kirjallisuuden mukaan (Halko ym. 1990.) konelämpömittareita voidaan soveltaa jopa +750 °C:ssa mutta sekään ei riitä, kun terässulassa on jopa +1700 °C lämpötila.

4.2 Bi-metallilämpömittarit

Bi-metallilämpömittarien toiminta perustuu kahden erilaisen liitettyjen metallien lämpölaajenemisiin. Kun toinen metalleista laajenee toista enemmän, metalliliuska käyristyy. Esimerkiksi ruuvikierukkatyyppinen tuntoelin kiertyy lämpötilan noustessa ja siirtää akselin välityksellä kiertymän osoittimelle.

Bi-metallilämpömittaria käytetään teollisuuden lisäksi kotikäytössä esimerkiksi paistilämpömittarina tai löylylämpömittarina. Bi-metallilämpömittarien mittausalueen yläraja on riippuvainen käytetyistä materiaaleista. Käytännössä mittausalue on maksimissaan +450 °C. Mittausepätkarkkuus bi-metallimittareilla on ± 5 °C. Teollisuuteen tarkoitettu bi-metallilämpömittari on esitettyä kuvassa 6. (Halko ym. 1990, 34.)



Kuva 6 bi-metallilämpömittari (Nuova Fima:n www-sivut, hakupäivä 17.4.2014).

Bi-metallilämpömittarin maksimimittausalue +450 °C voidaan todeta liian alhaiseksi, jotta sitä voisi hyödyntää terässulan lämpötilamittauksiin. Tästä syystä menetelmä ei sovellu valokaariuunille.

4.3 Sauvalämpömittarit

Sauvalämpötilamittari koostuu sauvasta, jolla on pieni lämpölaajenemiskerroin, esim. kvartsi. Sauva on suojaputken sisällä, joka on tehty materiaalista jolla on suuri lämpötilakerroin, esim. messinki, nikkeli tai krominikkeli. Putken ja sauvan lämpölaajenemisten ero on verrannollinen lämpötilan muutokseen. (Halko ym. 1990, 34.)

Sauvalämpömittarien mittausalue riippuu käytettävästä materiaalista. Krominikkelisuojauputkella yläraja on 1000 °C (Halko ym. 1990, 34), joten se ei sovellu terässulan lämpötilanmittaamiseen.

4.4 Kapillaarilämpömittarit

Kapillaarilämpömittarit koostuvat anturisäiliöstä, kapillaarista ja mittauselimestä. Anturisäiliössä on mittausväliaine, joka voi olla neste, kaasu tai höyry. Jos välitysaineena on neste, lämpötilan muutos aiheuttaa nesteen laajenemisen, jolloin se siirtyy kapillaaria pitkin mittauselimelle. Välitysaineen ollessa kaasu tai höyry, lämpötilan mittaus perustuu niiden paineen muutokseen. (Halko ym. 1990, 35; Pihkala 2010, 39.)

Esim. elohopeatäytteisellä kapillaarilämpömittarilla voidaan mitata jopa +650 °C lämpötilaa. Kaasutäytteisellä kapillaarilämpömittarilla voidaan mitata lähes -273 °C lämpötilasta noin + 700 °C saakka. Liian matalasta mittausalueesta johtuen, kapillaarilämpömittaria ei voida soveltaa mitaamiseen terässulasta. (Pihkala 2010, 40.)

4.5 Vastusanturit

Vastusanturi mittaa tuntoelinmateriaalin vastuksen, joka on riippuvainen lämpötilasta. Kun materiaalin lämpötilariippuvuus tunnetaan, vastus voidaan muuttaa lämpötilaksi. Tuntoelinmateriaalina voidaan käyttää esimerkiksi nikkeliä, kuparia tai platinaa. Platina on yleisin materiaali, koska se on stabiili korkeissakin lämpötiloissa ja se on kemiallisesti kestävä. Vastusantureilla voidaan käyttää lämpömittareissa lämpötilojen -250 °C ja +850 °C välillä. Kuvassa 7 näkyy tyypillinen vastusanturi. (Pihkala 2010, 44.)



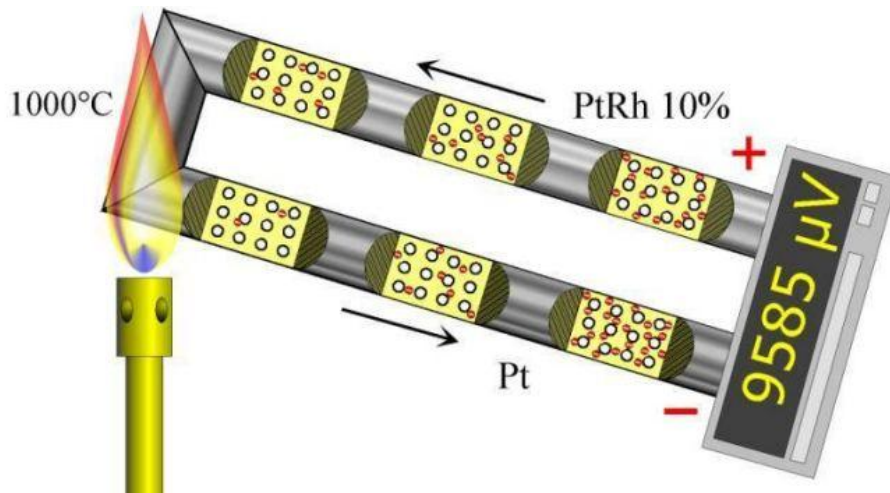
Kuva 7 vastusanturi ja liittopää (Meyervastuksen www-sivut, hakupäivä 17.4.2014).

Pt100-anturi on yleisin teollisuudessa käytetty metallivastusanturi ja sitä käytetään esimerkiksi putkistojen, kaasu ja ilmakanavien lämpötilanmittauksiin. Pt100-anturissa käytetty metallin on platina jonka lämpötilassa 0 °C on 100 Ω. Metallivastuksen vastus kasvaa lämpötilan noustessa.

Standardi EN 60751 määrittelee vastusanturien tarkkuusluokat, jotka ovat Klasse A tai Klasse B. Klasse A luokan antureilla on mittausepä-tarkkuus $\pm 0,15$ °C ja Klasse B luokan antureilla on mittausepä-tarkkuus $\pm 0,3$ °C lämpötilassa 0 °C. Terässulan lämpötilamittaukseen vastusanturia ei voida soveltaa, koska sen käyttölämpötila-alue on liian alhainen. (Halko ym. 1990, 36; SKS:n www-sivut, hakupäivä 24.02.2014.)

4.6 Termoelementtitekniikka

Termoelementti tai termopari koostuu kahdesta eri metallista olevista langoista, jotka on liitetty yhteen ja muodostavat suljetun virtapiirin. Liitoskohdista toinen on mitattavassa lämpötilassa ja toinen on tunnetussa lämpötilassa (vertailuliitos). Mittausliitoksen ja vertailupisteen lämpötilaero aiheuttaa jännitteen, joka on verrannollinen lämpötilaeroon ja termoparin materiaaleihin. Ilmiötä kutsutaan virolaisen fyysikon mukaan Seebeckin lämpösähköilmiöksi. Havainnollistaminen termoelementtimittauksesta näkyy kuvassa 8. (Halko ym. 1990, 40; Pihkala 2010, 46; SKS:n www-sivut, hakupäivä 24.02.2014.)



Kuva 8 Termoelementin havainnollistus (Van der Perre 2000).

Termolankapareissa käytetyt materiaalit ovat moninaisia ja näistä määräytyvät mm. eri termoelementtityypit. Standardissa DIN 43710 määritellään L-tyypin termopari. Muut termoparityypit on määritelty standardissa EN 60584-2.

J-tyypin (rauta-konstantaani), T-tyypin (kupari-konstantaani) ja E-tyypin (chromel-konstantaani) termoelementtejä voidaan käyttää kohtuullisen korkeissa lämpötiloissa. Näiden elementtien korkeimmat käyttölämpötilat ovat +350 °C ja 900 °C välillä.

K-tyypin (chromel-alumel) termoelementtiä voidaan käyttää happipitoisessa ympäristössä ja se kestää jopa 1300 °C lämpötilan. Tavallisesti sitä käytetään alueella 200..1000 °C.

Korkean lämpötilan termoelementtejä ovat platina-platinarhodium termoelementit. Näitä on kahta tyyppiä (R ja S) riippuen rhodiumpitoisuudesta. Pii, rikki, hiili ja useat metallihöyryt saattavat vahingoittaa edellä mainittuja termoelementtejä, joten niitä on suojattava. R ja S tyyppin termopareilla voidaan mitata jopa +1500 °C lämpötiloja, jonka jälkeen platina ja rhodium alkavat höyrystymään ja materiaalien välillä syntyy diffuusio, eli rhodiumatomit alkavat liikehtimään ja saastuttavat platinaa. (Halko ym. 1990, 43.)

Platinarhodium-platinarhodium termoelementti jonka toinen materiaali sisältää 6 % rhodiumia ja toinen materiaali sisältää 30 % rhodiumia, kestää epäpuhtauksia paremmin ja tätä voidaan käyttää jopa 1800 °C lämpötiloissa.

Karbideista, borideista ja nitrideistä valmistetut termoelementit ovat harvinaisempia variantteja. Ne ovat kemiallisesti kestäviä mutta hauraita. Sulan teräksen mittaukseen on käytetty myös Hiili-Piihiili-termoelementtiä. (Halko ym. 1990, 43.)

Taulukosta 2 voidaan todeta, että R, S ja B tyyppisten termoparien mittausalueet ovat tarpeeksi korkeita terässulan lämpötilan mittaamiseen. Termoelementtitekniikkaa on siis mahdollista soveltaa lämpötilamittauksille valokaariuunilla.

Taulukko 2: Termoelementtityyppien lämpötila-alueet (Pihkala 2010, 48)

Tyyppi	J	T	K	E	N	R	S	B
Mittausalue	-270	-270	-270	-270	-270	+400	-50	+100
°C	+1050	+400	+1370	+790	+1300	+1760	+1760	+1700

4.7 Pyrometrit

Pyrometri on laite, joka kosketuksettomasti mittaa kappaleesta lähtevää lämpösäteilyä. Laitteella voidaan määrittää kappaleen pinnan lämpötila. Pyrometri koostuu optisesta osasta ja ilmaisinosasta. Optiikka, eli linssit tai peilit, kohdistaa mitattavan säteilyn pyrometrin ilmaisinosalle, joka muuntaa säteilytehon mitattavaksi viestiksi, josta edelleen saadaan lämpötilatieto. (Halko ym. 1990, 54.)

Pyrometrit soveltuvat hyvin korkeiden pintalämpötilojen mittaamiseen. Yli 1400 °C lämpötiloissa esim. termoelementin käyttöikä on lyhyt. Pyrometrilla ei teoriassa ole ylärajaa mitattavalle lämpötilalle, mutta käytännössä pyrometrilla voidaan mitata -50 °C asteesta noin 3000 °C lämpötilaan, jolloin mittausepätaarkkuus on noin yhden prosentin verran. Höyryt ja kaasut mitattavan kohteen ja pyrometrin välissä aiheuttavat virhettä tai estävät mittaamisen. (Räsänen 1993, 62; Halko ym. 1990, 54.)

Kokonaissäteilypyrometrit mittaavat lämpösäteilyn mahdollisimman laajalla aallonpituusalueella. Tämä tarkoittaa sitä, että mittari voi mitata lämpötilaa laajalta lämpötila-alueelta. Alle 500 °C lämpötiloissa lämpösäteily on infrapuna-alueella, ja näin ollen

pyrometreja, jotka pystyvät mittaamaan alle 500 °C lämpötiloja, kutsutaan infrapunamittareiksi. Yleensä matalampia lämpötiloja mitatessa rajoittavana tekijänä on optiikka. Infrapuna-alueella säteilyn aallonpituus, jonka linssin pitää pystyä läpäisemään, on yli 30µm. Korkeita lämpötiloja mitatessa yläraja määräytyy yleensä ilmaissimen kestävydestä. Tavallisesti ilmaisin kestää n. 1500 °C...2000 °C. Kokonaissäteilypyrometrin tyypillinen mittausalue on -40...+1400 °C. (Halko ym. 1990, 55.)

Yleisimmät pyrometrit ovat tyypiltään osittaissäteilypyrometrejä. Nämä ovat rakenteeltaan samanlaisia kuin kokonaissäteilypyrometrit, mutta mittaavat kohdetta rajatusti tietyltä aallonpituusalueelta. Esim. infrapuna-alueita mittaavia pyrometreja kutsutaan infrapunälämpömittareiksi. Rajaamiseen käytetään suotimia, jotka päästävät läpi vain halutun aallonpituusalueen säteilyä. Tarkentamalla mittausaluetta suotimilla vältetään ympäristöhäiriöitä. Lisäksi osittaissäteilypyrometreilla päästään hyvin lyhyisiin vasteaikoihin (muutama millisekunti), jolloin ne soveltuvat liikkuvien kohteiden mittaamiseen. (Halko ym. 1990, 56; Pihkala 2010, 55.)

Korkeissa lämpötiloissa kappaleet alkavat hehkua ja niiden väri ja aaltopituudet muuttuvat tummanpunaisen ja valkoisen välillä. Suhdepyrometri/Kaksiväripyrometri mittaa kohteen lämpötilan kahden eri aallonpituuden lämpösäteilyintensiteetin avulla. Tämä tapahtuu niin, että pyrometrin suotimet päästävät läpi pidemmät aallonpituudet (esim. $\lambda > 1\mu\text{m}$) ja heijastavat lyhyemmät aallonpituudet aallonpituudet (esim. $\lambda < 1\mu\text{m}$). Läpäisyt ja heijastuneet säteilyt mitataan valokennoilla ja signaalijännitteiden suhde on verrannollinen kohteen lämpötilaan. Suhdepyrometrin mittausalue on tyypillisesti +700...3000 °C ja mittaus voi tapahtua vain rajatulla lämpötila-alueella. Etuna on, etteivät savukaasut, pöly tai höyry vaikuta mittaustulokseen. Kohteen emissiivisyyttä ei myöskään tarvitse tuntea, kunhan se pysyy samana lämpötilan muuttuessa. Kirjallisuudessa mittaustarkkuuden ilmoitetaan olevan ± 20 °C alueella +800 °C...1400 °C. Tekniikka kuitenkin kehittyy jatkuvasti sillä esimerkiksi kuvassa 9 näkyvälle, teollisuuskäyttöön tarkoitetulle suhdepyrometrille ilmoitetaan alueelle +1400 °C tarkkuudeksi ± 8 °C. (Halko ym. 1990, 56; Pihkala 2010, 55.)

Pyrometrit soveltuvat hyvinkin korkeisiin, jopa +3000 °C, mittausalueisiin kosketuksettoman mittaustekniikan ansiosta. Tästä johtuen ne soveltuvat hyvin terässulan lämpötilanmittauksiin. Eduiksi voidaan myös luetella lyhyt ja säädettävissä oleva vasteaika

(Kuvan 9 pyrometrilla 20 millisekunnista 10 sekuntiin), vähäinen huoltotarve ja mahdollisuus mittauksiin etäältä.



Kuva 9 suhdepyrometri (AST:n www-sivut, hakupäivä 17.4.2014)

5 TERÄSSULAN LÄMPÖTILAMITTAUKSET

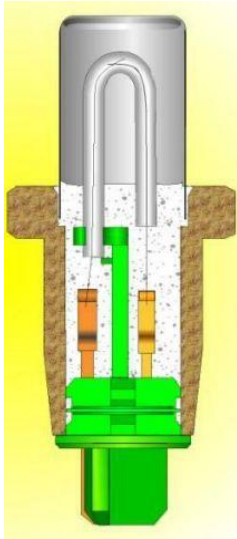
5.1 Termoparianturit

Nykyisin lämpötilanmittaukset terässulasta suoritetaan yleisimmin kertakäyttöisten termoparianturien avulla. Perinteisesti terässulan lämpötilan mittaus tapahtuu kuten kuvassa 10, jossa mittaaja upottaa lanssin avulla termoparianturin sulaan. Lanssin sisällä on johdot, joita pitkin signaali kulkee. Mittaus tapahtuu noin kuudessa sekunnissa ja signaali muunnetaan lämpötilatiedoksi, joka tallennetaan esimerkiksi tietokoneelle tai esitetään näytöllä. (Van der Perre 2000.)



Kuva 10 Lämpötilan mittaus lanssin avulla (Van der Perre 2000)

Lanssin päässä oleva anturi on yleensä kertakäyttöinen ja se vaihdetaan jokaisen mittauksen jälkeen. Kertakäyttöinen upotettava termopari koostuu termoparilangoista ja niiden suojaputkesta, liittimestä, joka varmistaa hyvän kontaktin termoparin ja lanssin välillä, suojakotelosta ja lämpöeristyksestä. Anturissa on teräskärki, joka tarjoaa suojaa sen kulkeutuessa kuonan läpi ja pahviputki, joka suojaa mm. anturin ja lanssin välistä kontaktia ja johtoja. Kuvassa 11 on esitetty leikkauskuvat vaihdettavasta anturikärjestä ja kuvassa 12 esitetään termopariantureita pahvisissa suojaputkissa. (Van der Perre 2000.)

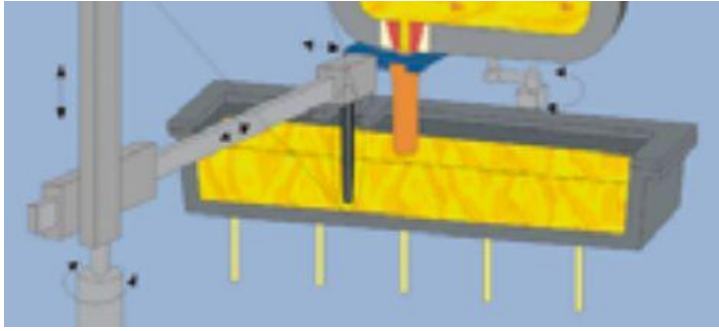


Kuva 11 Vaihdeettava termoparianturikärki



Kuva 12 Termopariantureita pahviputkissa (Sidermes:n [www-sivut](http://www.sidermes.com), hakupäivä 20.3.2014).

Termoparit, jotka kestävät korkeita lämpötiloja pidemmän ajan, mahdollistavat jatkuvan lämpötilan mittauksen terässulasta. Näin saadaan tietoa lämpötilan muutoksesta prosessin aikana. Esim. jatkuvavälialtaissa käytettävä ylhäältä upotettava malli voidaan viedä sulaan kanteen tehdyn reiän kautta. Anturille on usein valmistettu teline, joka toimii kanteen tehdyn reiän kantena sekä anturin pidikkeenä. Teline ja anturi voidaan kokonaisuudessaan nostaa syrjään nosturin avulla, jolloin anturi voidaan vaihtaa. Esimerkki tästä sovelluksesta on Heraeus Electro-Nite:n Contitherm, joka näkyy kuvassa 13. (Glitscher & Kendall 2008.)



Kuva 13 Heraeus Electro-Nite Contitherm jatkuvavalualtaassa (Van der Perre, 2000).

Heraeus Electro-Nite Contilance on puolestaan kehitelty jatkuvavalukoneiden välialtaille. Lanssi ohjautuu automaattisesti ja paikoittaa anturin oikeaan kohtaan vaikka sulan taso vaihtelisi. Lanssi on esitetty kuvassa 14. (Glitscher & Kendall 2008.)

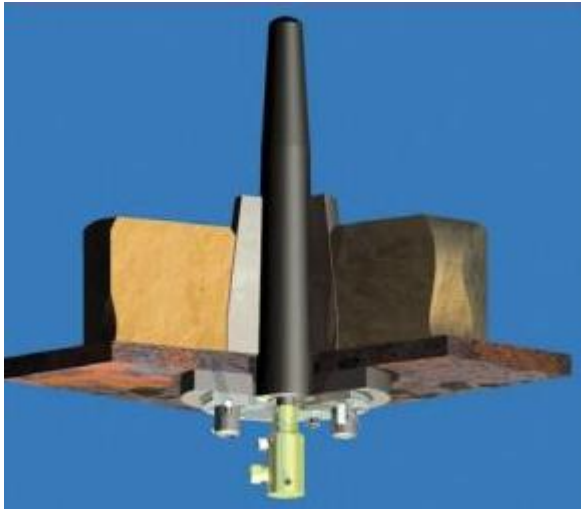


Kuva 14 Heraeus Electro-Nite Contilance. (Van der Perre 2000).

Contilance ei sovellu lämpötilanmittaukselle VKU:lla, koska sen nopeus ei riitä seuraamaan lämpötilan muutoksia nopeammin kuin 2 °C minuutissa. VKU:lla lämpötilan muutos saattaa olla yli 20 °C minuutissa. Sovellus on kyllin nopea jatkuvavalukoneelle, jolle se on suunniteltu. Lisäksi Contilance ja anturi mahdollisesti tuhoutuisivat viiden minuutin aikana valokaariuunin lämmönostovaiheen aikana (Glitscher 2014). Vaikka järjestelmälle olisi mahdollista rakentaa vaadittavat suojaukset, niin hidus vasteaika estää sen käytön. (Glitscher 2014.)

Heraeus Electro-Nite Castemp on seinän tai pohjan läpi asennettava anturi. Seinämään tehtyyn reikään asennetaan keraaminen kiinnike, jonka läpi anturi suojaputkineen asen-

netaan ja voidaan vaihtaa. Leikkauskuva asennetusta anturista näkyy kuvassa 15. (Glitscher & Kendall 2008.)



Kuva 15 CasTemp seinän tai pohjan läpi asennettuna.

5.2 Pyrometrit

Terässulan jatkuvalle lämpötilanmittaamiselle on haastavien olosuhteiden vuoksi monesti hyvä käyttää optisia menetelmiä. Kaksiväripyrometria eli suhdepyrometria voidaan käyttää mm. teräsvalun ja kaadon mittaamiseen jopa 30 metrin etäisyydeltä. Optisen mittarin nopeus mahdollistaa mittaustuloksen saamisen viiveettömästi heti kaadon alkaessa ja aina samasta kohtaa. Optisella menetelmällä ei tule kuluvista ja vaihdettavista osista aiheutuvia käyttökustannuksia. (Keller-MSR, 2010.)

Pyrometrin käyttöä valokaariuunilla vaikeuttaa mm. sulan peittävä kuonakerros ja savukaasut. Esimerkki kaupallisesta ratkaisusta on Keller MSR:n CellaCast järjestelmä, jonka mittauslaite näkyy kuvassa 16. (Keller-MSR, 2010.)



Kuva 16 CellaCast suhdepyrometri (Keller-MSR 2010, hakupäivä 10.04.2014).

6 RATKAISUVAIHTOEHDOT

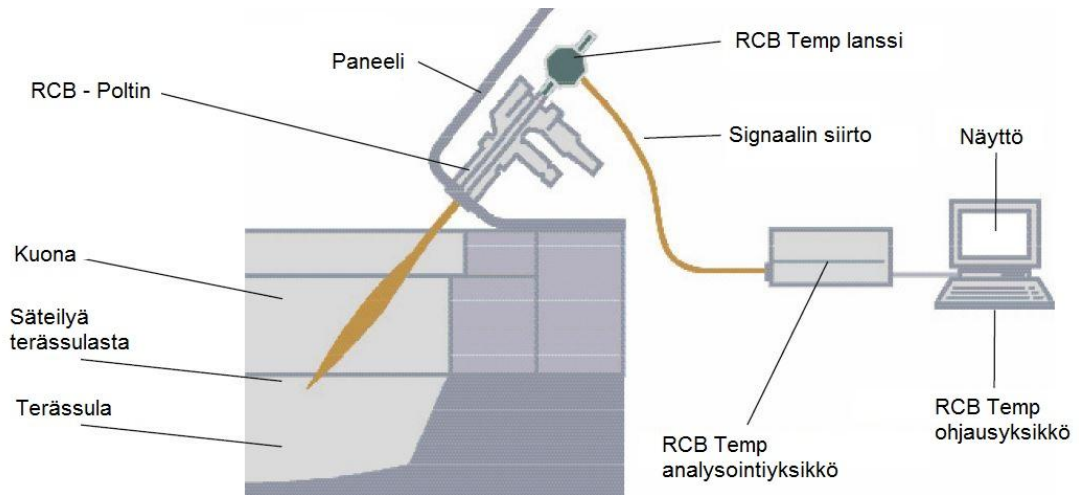
6.1 Pyrometrilanssi

Pyrometrilanssi on yhdistetty lanssi ja pyrometri. Lanssilla tarkoitetaan putkea, joka mahdollistaa ylettymisen lähelle sulaa. Lanssin avulla voidaan upottaa terässulaan termoparianturi tai puhalttaa siihen happea tai kaasua. Yhdistämällä lanssiin pyrometri, voidaan puhaltamalla kaasua tehdä aukko kuonaan, jolloin pyrometrille tulee näkyvyys sulaan.

6.1.1 Siemens-VAI Simetal RCB Temp

RCB Temp on yhdistetty poltin (Refining combined burner) ja optinen lämpötilanmittausjärjestelmä. Järjestelmässä on kolme eri vaihetta; poltin, happipuhallus ja lämpötilanmittaus. Poltinta voidaan käyttää nopeuttamaan teräksen sulatusta ja lanssi puhalttaa happea sulaan teräkseen nostaakseen sen lämpötilaa.

Lämpötilaa mitattaessa lanssi puhalttaa inerttiä kaasua, tässä tapauksessa typpeä, kuonaan ja terässulaan. Kaasu kulkee yli äänen nopeudella ja tämän kineettinen energia leikkaa kuonaan aukon. Tämä mahdollistaa infrapunasäteilyn terässulasta integroidulle optiikalle, jossa säteily mitataan. Analysointiyksikkö laskee säteilyarvoista sulan lämpötilan, jonka jälkeen tieto siirtyy ohjausyksikön näytölle. RCB Temp on käytössä esimerkiksi Saksassa Stahlwerk Bous GmbH:n terästehtaalla. Kuva 17 esittää leikkauskuvan asennetusta järjestelmästä ja kuva 18 esittää RCB Temp:n ja polttimen uunin ulkopuolelta. (Siemens 2011, hakupäivä 25.3.2014.)



Kuva 17 RCB Temp kuvaus (Siemens VAI 2011, hakupäivä 25.3.2014).



Kuva 18 RCB Temp asennettuna (Siemens VAI 2011. Hakupäivä 25.3.2014).

6.1.2 Soveltuvuus

RCB Temp antaisi toimiessaan mahdollisuuden jatkuvalle lämpötilanmittaukselle. Optisen järjestelmän käyttökustannukset ovat mahdollisesti matalat, koska siinä ei ole jatkuvasti vaihdettavia osia. Optinen mittaus on myös helposti toistettavissa. Mittaus tapahtuu terässulan pinnalta, joka saattaa olla epäsuotuisa kohta mittausta ajatellen. Hyvä

puoli on jatkuvan mittauksen mahdollisuus, mutta mittaustarkkuus ei ole yhtä hyvä, kuin termopareilla.

RCB-Temp:n mittaustarkkuus on noin 1,5 % sulan mittaukselle 1600 °C lämpötilassa, eli mittaustarkkuudeksi saadaan laskettua $\pm 0,015 \cdot 1600 = \pm 24$ °C (Heikkilä 2014, sähköpostiviesti). Vaikka tämä ei saavuta alkuperäistä ± 10 °C tavoitetta, niin mittaustarkkuus on riittävä (Vallo 2014).

6.1.3 Suunnitelma

RCB Temp:n mittausmenetelmän testaus voisi olla toteutettavissa pyrometrin ja inertin kaasun puhalluksen avulla. Tämä voisi tapahtua asentamalla putki samalla periaatteella, kuin RCB Temp:n lanssi kuvassa 17. Putken voisi asentaa osoittamaan sulaan uunin holviin tehdyn reiän läpi tai kaatoaukon kautta. Putken kyljestä tuodaan kaasua, esim. tyypeä paineella jolloin se puhaltaa kuonaan aukon. Pyrometri asennetaan putken päähän, jonka läpi säteily pääsee kulkemaan. Kaasun tuottama paine putkessa estää ehkä myös savukaasujen pääsyn pyrometrin linssiin. Jos pyrometrin linssi likaantuu, eikä mittausta voida suorittaa, laitteen voisi sijoittaa toiseen kohtaan suojaan kaasuista, josta sillä olisi näkyvyys puhalluksen tekemälle aukolle ja terässulan pinnalle.

Riskinä testaukselle ovat mahdollinen kuumuuden ja kaasujen pääseminen putkeen ja niistä aiheutuvat haitat pyrometrille. Kaasun puhallus pitäisi mahdollisesti aina olla päällä, kun uuni on käynnissä, jotta kuumuus ja kaasut eivät pääsisi putkeen. Jos pyrometri sijaitisi toisella paikalla, riskinä taas on, että pöly pääsee likaamaan sen linssin. Tämä olisi kuitenkin helposti korjattavissa vaihdettavien linssinsuojuksien avulla.

6.2 Upotusanturit

Nykyään ihmisen suorittama mittaus halutaan poistaa koska uuni joudutaan tällöin pysäyttämään mittauksen ajaksi ja olosuhteet eivät ole kovin turvallisia. Mittaustyöhön on siksi kehitetty robotteja, jotka ovat opetettu suorittamaan mittaus ja vaihtamaan kerta-käyttöpatruuna, joka sisältää anturin.

6.2.1 Siemens Simetal LiquiRob

Kuuden akselin ympäri liikkuva teollisuusrobotti soveltuu lämpötilanmittauksiin valokaariuunissa. Joustavuus mahdollistaa käytön ahtaissakin tiloissa, ja robotti pystyy suorittamaan mittaukset ja patruunanvaihdot lyhyessä ajassa.

Kuvassa 19 näkyy Siemens Simetal Liquirob -teollisuusrobotti, joka on suunniteltu suorittamaan mittaustehtäviä valokaariuuneilla. Robotti suorittaa mittaukset kertakäyttöisellä upotustermoparilla, jonka se vaihtaa seuraavaa mittausta varten. Kuten kuvassa 19 näkyy, robotilla on kuumuudelta ja pölyltä suojaava puku. Liquirob on käytössä valokaariuunilla Ranskassa Riva Group Neuves-Maisons:n tehtaalla, sekä Brasiliassa Thyssenkrup CSA:n kahdessa LD konvertterissa.



Kuva 19 Siemens Simetal Liquirob suoja-pukuineen. (Siemens VAI 2013, hakupäivä 26.3.2014.)

6.2.2 BSE TempSamp Manipulator

BSE:n tarjoama TempSamp Manipulator on periaatteeltaan samantyyppinen kuin aikaisemmin mainittu Liquirob. Robotti on suunniteltu käytettäväksi valokaariuunilla ja käyttää mittaukseen vaihdettavia termoparikärkiä. BSE:n ratkaisuja on laajalti käytössä

ja referenssejä mainitaan jopa 78 kappaletta (BSE 2014, referenssilista). Robotti on esitettyä kuvassa 20. (BSE:n www-sivut, hakupäivä 22.4.2014.)



Kuva 20 BSE TempSamp Manipulator (BSE:n www-sivut, hakupäivä 22.4.2014)

6.2.3 Soveltuvuus

Kertakäyttöiset termoparianturit antavat tarkan mittaustuloksen lämpötilasta. Robotin ansiosta mittauskohta voidaan määrittellä ja mittaus tapahtuu aina samasta kohdasta.

Haittapuolena on, että mittaustapahtuma ei ole jatkuva vaan ajallisesti pistemäinen. Robotisoitu lämpötilanmittaus on laajalti käytössä oleva menetelmä, josta monella tehtaalla on kokemusta.

6.2.4 Suunnitelma

Käytettäessä kertakäyttöisiä termopariantureita, oleellista on testata robotin toimivuus valokaariuunin ympäristössä. Pitää myös selvittää miten robotin ohjaama mittaustapahtuma onnistuu.

Tämä voidaan suorittaa esimerkiksi testaamalla käytettyä robottia ja sen toimivuutta valokaariuunin ympäristössä. Robotti pitää suojata putoavalta romulta ja mahdollisesti myös pölyltä. Robotille voi myös pakkaneen tai korkeat lämpötilat olla haitallista, jolloin nämäkin tekijät pitää huomioida.

6.3 Pudotussondijärjestelmä

Pudotussondijärjestelmän periaate on kertakäyttöisen anturin pudottaminen terässulaan ja lämpötilatiedon kerääminen ennen kuin anturi on tuhoutunut. Lämpötilatieto kulkeutuu johtoja pitkin, jotka ovat kiinnitettyinä pudotettaviin antureihin. Oulun yliopistossa tutkitaan myös pudotusantureilta, jotka lähettäisivät tiedon langattomasti (Vallo 2014, haastattelu).

6.3.1 Heraeus Electro-Nite QuiK-Tap järjestelmä

”Automaattinen anturinsyöttöjärjestelmä” (ADSS) on kehitetty Rautaruukin ja Heraeus Electro-Nite:n yhteistyönä. Sen keskeiset osat ovat kertakäyttöiset anturit, signaalin vastaanotto- ja näyttöjärjestelmä, sekä siirtojärjestelmä, joka automaattisesti siirtää anturit kasetista valmiustilaan pudottamista varten. Syöttöjärjestelmää ohjaa ohjelmoitava logiikka ja siinä on pneumaattinen voimansiirto. QuiK-Tap-järjestelmä on ollut käytössä Raahessa Rautaruukin LD konvertterissa vuodesta 1999 ja on siellä todettu toimivaksi. Sen jälkeen järjestelmää on kehitetty ja nykyään on saatavilla modernimpi versio. (Ollila, Kelchtermans & Stone 1999; Bartsch, 2014.)

Electro-Nite:n QuiK-Tap järjestelmä käyttää QuiK-Tap -anturia. Kun käyttäjä laukaisee mekanismin, järjestelmä pudottaa anturin, joka on suunniteltu uppoamaan terässulaan. Anturi mittaa lämpötilan alle viidessä sekunnissa ja signaali kulkee kaapelia pitkin Multilab III QuiK-Tap tietojärjestelmään ja antaa tiedon lämpötilasta. Tietojärjestelmä pysyy tallentamaan muistiin yli 3000 mittausta ja tiedot ovat siirrettävissä tehtaan LAN verkkoon. Viimeiseksi logiikka irrottaa johdon anturista ja uusi anturi tulee valmiusasemaan. (Ollila, Kelchtermans & Stone 1999; Ylönen & Jauhola & Lilja & Marttio & Ollila & Palmu 1999.)

QuiK-Tap anturissa on B-tyypin termopari, jonka mittaustarkkuus on $0/+4$ °C 1554 °C asteessa. Antureita on kolme eri tyyppiä: lämpötilan- (T), lämpötilan ja happiaktiviteetin- (TO) ja lämpötilan ja hiilipitoisuuden (TC) mittausta. Anturit ovat 750mm pitkiä ja niiden ulkohalkaisijat ovat 104mm. Kaapelinpituudet ovat joko 25,3m tai 35m. Yksi

anturi 25,3m johdon kanssa painaa 7,12kg (TC anturi painaa 9,39kg) ja 35m johdon kanssa 7,98kg (TC anturi 10,25kg).

Irrotettava anturikasettiyksikkö sijoittuu siirtoyksikön päälle. Kasettiyksikköön mahtuu 45 tai 36 kappaletta antureita. Täysi 45 anturin kasetti painaa 750 kg ja 36 anturin kasetti painaa 609kg.

6.3.2 Soveltuvuus

Pudotettavan anturin heikkoutena on mm. se, että mittauskohtaa ei voida määrittää, vaan se mittaa sieltä mihin se sattuu uppoamaan. Järjestelmä ei myöskään mahdollista jatkuvaa mittausdata, vaan mittausdata on ajallisesti pistemäinen ja uutta lämpötilatietoa varten pitää suorittaa uusi mittaus.

Järjestelmän haittapuolena on myös, että se on melko tilaa vievä ratkaisu. Yksiköt on asennettava uunin holvin päälle, joten niihin kohdistuu korkeita lämpötiloja. Uunin lämpötila holvin alla nousee n. 1400 °C saakka. Hyvänä puolena on termoparien mittaustarkkuus ja se, että sondi uppoaa terässulaan, josta mittaus tapahtuu.

(Bowman & Krüger 2009.)

6.3.3 Suunnitelma

Menetelmää voitaisiin testata kiinnittämällä kertakäyttöinen termoparianturi riittävän raskaan putken pohjaan, jotta putken paino upottaa anturin terässulaan kuonan läpi. Putken sisältä kulkevat anturille johdot, joita pitkin lämpötilatieto saadaan.

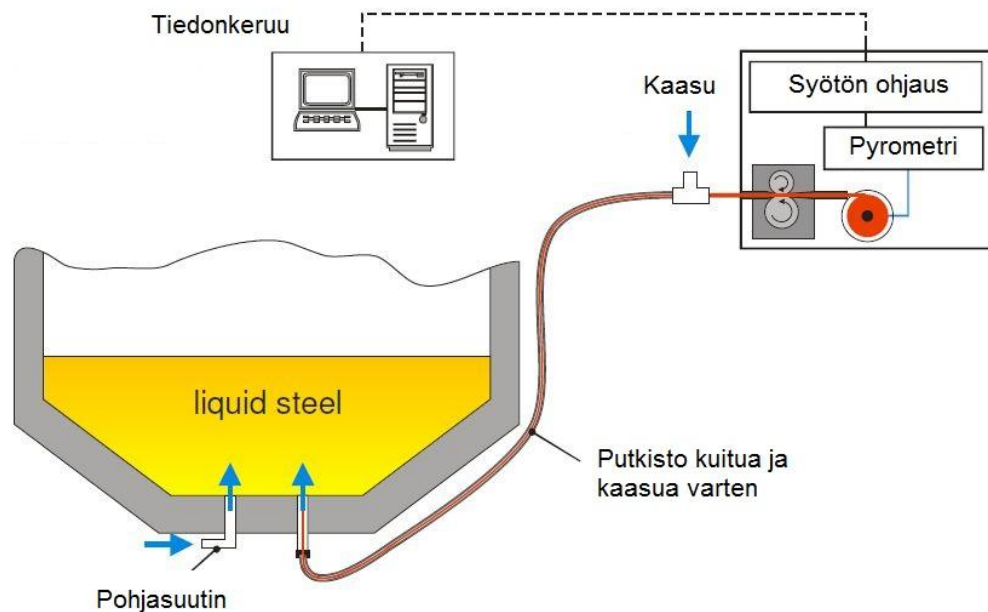
Testausta varten pitäisi järjestää mekanismi, joka pudottaa putken uuniin ja joka voidaan laukaista etäältä. Putkea kiinni pitävä tappi voisi olla irrotettavissa sähköisesti, pneumaattisesti tai mekaanisesti, jolloin se putoaisi sulaan.

6.4 Optinen mittaus valokuidun avulla

Euroopan komission rahoittamassa tutkimuksessa selvitettiin vuonna 2007 mahdollisuutta mitata terässulan lämpötilaa valmistusprosessissa. Menetelmä perustuu siihen, että uuniin syötetään valokuitua, joka tulee suoraan kosketukseen sulan kanssa. Säteily kulkee valokuitua pitkin optiselle tunnistimelle, joka muuntaa säteilyn sähköiseksi viestiksi. Informaatio kerätään ja tallennetaan, jotta sitä voidaan hyödyntää valvomossa prosessin ohjausta varten.

6.4.1 Minco Group DynKonTemp

Valokuitu voidaan syöttää uuniin pohjassa olevien suuttimien kautta. Suuttimien kautta syötetään samalla kaasua, joka suojaa valokuitua sekä ehkäisee suuttimien tukkeutumista. Periaatekuva järjestelmästä on esitettyä kuvassa 21. (Lachmund & Xie & Lamp & Köchner, 2007.)



Kuva 21 DynKonTemp periaatekuva (Lachmund ym. 2007)

Tutkimuksessa havaittiin ongelmalliseksi suuttimien tukkeutuminen, josta seurasi, että tuotannon hallinta lämpötilan avulla onnistui vain 46 % sulatuskerroista ja lämpötilan

mittaus onnistui 60 %:sti. Jos suuttimet eivät tukkeutuneet, mittaus onnistui 98 %:sti. (Lachmund ym. 2007.)

Optiselle valokuitumittaukselle ilmoitettiin vuonna 2007 $\pm 9,5$ °C mittaustarkkuus sulan teräksen mittausalueella. Vuonna 2008 ilmoitettiin mittaustarkkuudeksi ± 4 °C. (Lachmund ym. 2007, 26; Minco Group 2008)

DynKonTemp projekti on vuoden 2008 jälkeen edennyt hitaasti Euroopassa vallinneen huonon taloustilanteen vuoksi. Mikäli järjestelmä päätettäisiin ottaa käyttöön Outokummun Tornion tehtailla, tämä tapahtuisi mahdollisesti Trial -projektin muodossa. (Asikainen 22.4.2014, haastattelu)

6.4.2 Soveltuvuus

Kuidun syöttöjärjestelmälle ei ole vielä tarjolla valmista tuotetta käytettäväksi valokaa-riuunilla. Tästä syystä soveltuvuus on vielä epävarmaa.

Järjestelmän toimiessa sen etuna on mahdollisuus jatkuvalle lämpötilanmittaukselle. Mittausjärjestelmän haittapuolena on, että suuttimien tukkeutuessa mittauksia ei voida jatkaa, ennen kuin ne päästään puhdistamaan. Tästä syystä käytettävyys saattaa olla erittäin huono.

6.4.3 Suunnitelma

Menetelmä voitaisiin testata syöttämällä suojaavan putken kautta optista kuitua ja suo-
jakaasua uunin pohjan läpi menevän suuttimen kautta. Optisen kuidun toiseen päähän kulkeutuva säteily mitattaisiin pyrometrilla.

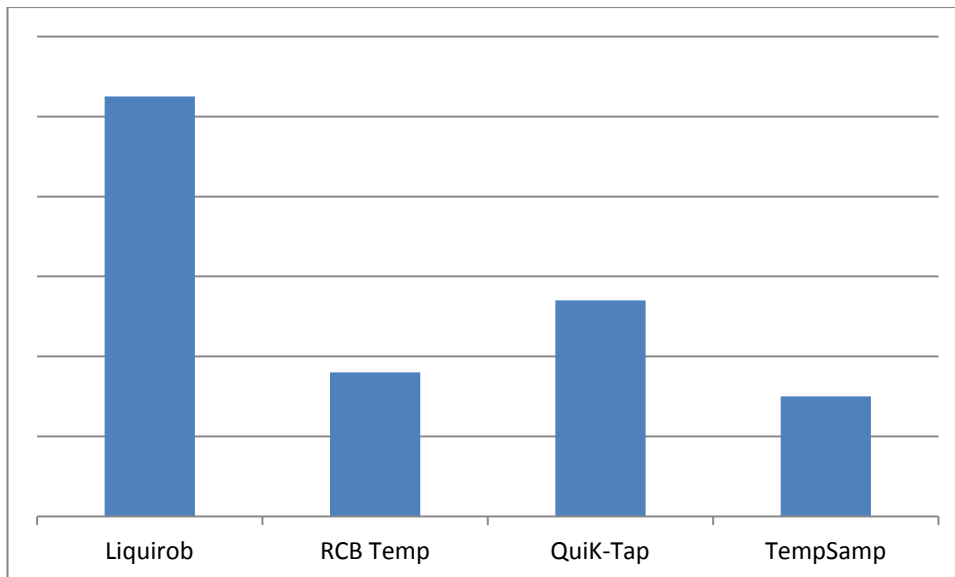
Kuidun syöttämistä varten tarvitaan jonkinlainen syöttöjärjestelmä, joka syöttää kuitua halutulla nopeudella. On myös huomioitava, vaikuttaako kuidun pituuden muutos rat-
kaisevasti lämpötilatietoon. Suhdepyrometrille säteilyintensiteetin ei pitäisi vaikuttaa mittaustulokseen.

7 LOPPUTULOS

7.1 Hinta

Kuvassa 22 on esitetty kolmen eri ratkaisuvaihtoehdon hinnat suhteessa toisiinsa. Itse hintatiedot on päätetty jättää julkaisematta. Kustannusarviot pyörivät satojen tuhansien eurojen välillä.

Lämpötilanmittauksia suorittaville roboteille hinnat vaihtelevat suuresti, sillä niistä löytyvät vertailun halvin sekä kallein järjestelmä. DynKonTemp -järjestelmälle ei osattu sanoa vielä hintatietoa, mutta puhelinhaastattelun mukaan se on melko arvokas järjestelmä. (Asikainen 22.4.2014, haastattelu)



Kuva 22 Ratkaisujen hintavertailu

7.2 Käytettävyys

Käytettävyyttä on vaikea arvioida menetelmiä testaamatta. Voidaan kuitenkin raporttien mukaan (Lachmund ym. 2007) todeta, että DynKonTemp:llä on ollut vaikeuksia käytettävyyden kanssa. Siemens VAI:n RCB Temp:in luvataan toimivan, kunhan sen suutin pysyy puhtaana.

Termoelementteihin perustuvista mittausmenetelmistä ei ole tietoa ongelmista käytettävyyden kannalta. Quik-Tap:lla kerrotaan olevan hyvä käytettävyys (Bartsch, 2014). BSE kertoo myös TempSamp robotin käytettävyyden olevan hyvä (BSE:n www-sivut, hakupäivä 22.4.2014).

7.3 Tarkkuus

RCB-Temp:n mittaustarkkuus on noin ± 24 °C, kun mittava lämpötila on 1600 °C. Järjestelmä ei ole yhtä tarkka kuin termoparianturilla mitattaessa.

DynKonTemp:lle mittaustarkkuudeksi ilmoitetaan ± 4 °C, kuten myös Quik-Tap järjestelmälle. Robotisoidulla järjestelmällä tarkkuus riippuu käytettävästä termoparianturista. Käyttäessä yhtä tarkkaa anturia kuin Quik-Tap-järjestelmä, on tarkkuus myös yhtä hyvä.

7.4 Testattavuus

Quik-Tap järjestelmän periaatetta voitaisiin testata pudottamalla sulaan kertakäyttöinen termoparianturi, johon olisi kiinnitettynä johdot lämpötilatietojen tallentamiseen. RCB-Temp:n toimintaperiaatetta voisi testata puhaltamalla kuonaan aukko, jonka läpi mitattaisiin lämpötila suhteellisen halvalla pyrometrilla. Näiden kohdalla testaus voisi olla toteutettavissa, vaikka on hieman hankalaa.

DynKonTemp:in toimintaperiaatteen testaaminen voidaan kenties toteuttaa syöttämällä optista kuitua pohjasuuttimen läpi ja mitata pyrometrilla kuidun toiseen päähän kulkeutuvaa säteilyä. Liquirob:in toiminnan testaus on myös hankalaa, mutta esimerkiksi käytetyn teollisuusrobotin toimivuutta voisi testata valokaariuunin ympäristössä.

8 POHDINTA

Työssä selvitettiin eri lämpötilanmittausmenetelmiä ja niiden soveltuvuutta terässulan lämpötilanmittaukseen valokaariuunissa. Lisäksi arvioitiin menetelmien käytettävyyttä, tarkkuutta, hintaa ja testattavuutta.

Aihe oli mielenkiintoinen ja opettavainen, mutta myös haastava. Kyseiseen ympäristöön ei kovin paljon eri ratkaisuja ole. Nykyisellään tunnettuja menetelmiä valokaariuunin terässulan lämpötilanmittaukseen ovat joko pyrometrit tai termoelementtitekniikalla toteutetut ratkaisut. Se, miten näitä teknologioita sovelletaan käytettäviksi valokaariuunilla erottaa ratkaisut toisistaan.

Luultavasti pyrometritekniikka, eli optinen mittaus on tulevaisuuden menetelmä mitata terässulan lämpötilaa valokaariuuneilla johtuen sen nopeasta vasteajasta, säätömahdollisuudesta, tarkkuudesta sekä sen vähäisestä huollon tarpeesta (ei liikkuvia osia). Asennus- ja käyttökustannukset ovat luultavasti myös halpenemassa tarjonnan kasvaessa.

Termoelementtitekniikka on kuitenkin vanha ja hyvin tunnettu lämpötilanmittausmenetelmä. Sitä on testattu paljon ja todettu hyväksi. Termoelementit ovat halpoja, mutta menetelmä millä ne viedään valokaariuuniin ja terässulaan ovat kalliimpia. Jatkossa voitaisiin tehdä lisäselvityksiä, jossa tarkastellaan ratkaisujen käytettävyyttä valokaariuunilla.

Tästä opinnäytetyöstä on Outokummulle hyötyä, mikäli aiotaan hankkia lämpötilanmittausjärjestelmä valokaariuunille. Työstä käy ilmi minkälaisia vaihtoehtoja lämpötilanmittaukselle on ja millaisia ne ovat ominaisuuksiltaan. Työstä on myös hyötyä, mikäli jatkossa tehdään lisäselvitystä samantyyppisistä aiheista.

Työtä tehdessä olen oppinut terässulaton prosessista ja varsinkin valokaariuunin toiminnasta. Olen myös oppinut lämpötilanmittauksissa huomioitavista asioista ja tutustunut teollisuudelle laitteita toimittaviin yrityksiin. Lisäksi olen saanut kokemusta siitä, minkälaista projektin tekeminen työelämässä voisi olla.

LÄHTEET

- Asikainen, Hannu, Minco Oy, Puhelinhaastattelu 22.4.2014.
 AST:n www-sivut, hakupäivä 17.4.2014 < <http://www accuratesensors.com>>
- Bartsch, Johanna, Toimistopäällikkö, Heraeus Electro-Nite Intl. NV, puhelinhaastattelu 27.3.2014.
- Bowman, Ben & Krüger, Klaus 2009. Arc Furnace Physics. Düsseldorf: Verlag Stahleisen GmbH
- BSE:n www-sivut 2014, hakupäivä 22.4.2014. <http://www.bse-kehl.de/wEnglisch/Technical_Services/Measurement_Control/TSM_EAF/tsm_eaf.php?navanchor=10001>
- BSE 2014, BSE Reference List for Temperature / Sampling Manipulators. <http://www.bse-kehl.de/wEnglisch/Downloads/references_pdf/reference_list_tsm_apr14.pdf>
- Glitscher, Wolfgang, johtaja, tuoteapplikaatiot, rauta ja teräs, Heraeus Electro-Nite International N. V. Re: Questions about Contilance & AOD. Sähköpostiviesti kimmo.vallo@outokumpu.com
- Glitscher, Wolfgang & Kendall, Martin 2008. Thermocouple-based continuous temperature measurement systems in continuous casting operations. Hakupäivä 26.3.2014. <http://heraeus-electro-nite.com/media/webmedia_local/media/downloads/steel_2/temperaturecontrol/continuous temperaturesystems.pdf>
- Halko, Pekka & Härkönen, Sakari & Lähteenmäki, Ilkka & Välimaa, Taisto 1990. Teollisuuden mittaustekniikka. Perusmittauksia. 4. painos. Helsinki: Painatuskeskus Oy
- Heikkilä, Hannu, Siemens Oy, RCB-Temp lämpötilatarkkuus, sähköpostiviesti toni.ahava@edu.lapinamk.fi 23.4.2014.
- Ollila, Seppo & Kelchtermans, Rik & Stone, Randall P 1999. Implementation of an automated drop in sensor system at Rautaruukki Steel Raahe Steel Works. Hakupäivä 5.3.2014. <http://heraeus-electro-nite.com/media/webmedia_local/media/downloads/steel_2/sublanceanddropsensors/rautaruukki_steelmaking_conf_1999.pdf>
- Ylönen, Heikki & Jauhola, Markus & Lilja, Jarmo & Marttio, Seppo & Ollila, Seppo & Palmu, Petri 1999. The use of novel technologies at a steel plant to improve process control and performance. Hakupäivä 5.3.2014. <http://heraeus-electro-nite.com/media/webmedia_local/media/downloads/steel_2/sublanceanddropsensors/rautaruukki_steelscanmeti_june_1999.pdf>
- Keller MSR 2011. hakupäivä 10.04.2014. <<http://www.keller-msr.com/cms/download.php?download=true&file=05319ce5dbd082552f1f59ed657f9f7c&anticache=0e7f471e6c396d899239c339a336b0a0>>
- Metallinjalostajat ry 2009. Teräskirja. 8. Painos. Tampere: Esa Print Oy.
- Meyervastuksen www-sivut. hakupäivä 17.4.2014 < <http://www.meyervastus.fi>>
- Minco Group 2008, Myyntipalaverin powerpointesitys 12.12.2008.
- Nuova Fima:n www-sivut 2014, hakupäivä 10.3.2014. <<http://www.nuovafima.com/en/>>
- Lachmund, H & Xie, Y & Lamp, T & Köchner, H 2007. Application of direct optical temperature measurement in the steelmaking process (DOT-Application). Final report. European Commission. Research Fund for Coal and Steel, Luxemburg.

Pihkala, Juhani 2010. Prosessisuureiden mittaustekniikka. 2. painos. Opetushallitus: Helsinki.

Räsänen, Jouko 1993. Automaatiotekniikan mittauksia. Helsinki: Painatuskeskus Oy.

Siemens VAI 2011.. SIMETAL RCB Temp. Hakupäivä 25.3.2014.

<http://www.industry.siemens.com/datapool/industry/industrysolutions/metals/simetal/en/SIMETAL-RCB-Temp-en.pdf>

Vallo, Kimmo, Kehitysinsinööri, Outokumpu Stainless Oy. Keskustelut kevään 2014 aikana.

Van der Perre, W 2000. Temperature measurement in liquid metal. Hakupäivä

26.3.2014. <<http://heraeus-electro->

[ni-](http://heraeus-electro-)

[te.com/media/webmedia_local/media/downloads/steel_2/temperaturecontrol/temperature_wvdp_2000.pdf](http://heraeus-electro-)>