



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Teemu Seppälä

Matalapainevalukoneen ja prosessilaitteiden investointien kannattavuus

Opinnäytetyö

Kevät 2024

Insinööri (ylempi AMK), Teknologiaosaamisen johtaminen



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Tutkinto-ohjelma: Insinööri (ylempi AMK), Teknologiaosaamisen johtaminen

Tekijä: Teemu Seppälä

Työn nimi: Matalapainevalukoneen ja prosessilaitteiden investointien kannattavuus

Ohjaaja: Jussi Yli-Hukkala

Vuosi: 2024

Sivumäärä: 55

Liitteiden lukumäärä: -

Opinnäytetyössä tutkittiin matalapainevalukoneen ja prosessilaitteiden investointien vaikutuksia sekä kannattavuutta Alteams Finland Oy:n Laihian valimolle. Tutkimuksessa syvennyttiin ensimmäisenä vanhan matalapainevaluprosessin haasteisiin ja kartoitettiin nykytila. Investointien käyttöönoton jälkeen lähdettiin tutkimaan sekä keräämään uuden matalapainevaluprosessin vaiheista numeraalista dataa, jota verrattiin vanhan prosessin vastaavaan dataan. Tutkimusaihe syntyi, koska investoinnit olivat strategisesti merkittäviä ja suuria Alteams Finland Oy:n Laihian valimolle.

Työn teoriaosuudessa käsitellään tutkimuksen investointityyppejä ja niiden teoreettisia tuottovaateita, alumiinin sulatusta ja energiatehokkuutta, alumiinin kaasuhuuhdelua- ja puhdistusta sekä matalapainevaluprosessin haasteita. Teoriaosuuden jälkeen syvennytään vanhan matalapainevaluprosessin nykytilaan ja haasteisiin. Nykytilan läpikäynnin jälkeen tutkitaan sekä aukaistaan investointien tuomia kehityksiä uuteen matalapainevaluprosessiin. Saaduista tutkimustuloksista luodaan yhteenveto uuden matalapainevaluprosessin vaikutuksista valitun tuotteen tuotannollisiin, taloudellisiin ja laadullisiin haasteisiin.

Tutkimusmenetelmänä käytettiin määrällistä sekä laadullista tutkimusta. Tutkimuksen aineistoa kerättiin energiankulutuksen mittauksella, alumiinisulan tiheysindeksin näytteillä, valitun tuotteen valamisen kiertoajoista, kone- ja laiteoimittajien materiaaleista ja asiantuntijoilta. Tutkimuksen aineistoja analysoitiin vertailemalla tilastollisesti niitä toisiinsa.

Tutkimuksen tuloksena saatiin selville investointien vaikutukset kokonaisuudessaan uuden matalapainevaluprosessin laadukkuuden kehitykselle sekä tutkimukseen valitun tuotteen valamisen tuotannollisten kustannuksien muutokset. Tutkimustulokset osoittivat, että energiatehokkuus, prosessin laadukkuus ja tehokkuus olivat merkittävimmät investointien tuomat kehitykset. Tutkimustuloksista voidaan päätellä, että investoinnit ovat olleet kannattavia.

¹ Asiasanat: investointi, sulatus, energiatehokkuus, alumiini, valu

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Degree programme: Master's Degree Programme in Technology Competence Management

Author: Teemu Seppälä

Title of thesis: The profitability of investments in low-pressure die casting machine and process equipment

Supervisor: Jussi Yli-Hukkala

Year: 2024

Number of pages: 55

Number of appendices: -

The thesis examined the effects and profitability of investments in a low-pressure die casting machine and process equipment at Alteams Finland Oy's foundry in Laihia. The first step was to study the challenges of the old low-pressure die casting process and assess the current situation. After the implementation of the investments, the focus shifted to investigating and gathering numerical data from the new low-pressure die casting process. The gathered data would be compared to the corresponding data from the old process. The thesis topic naturally arose because the investments were strategically significant for Alteams Finland Oy's foundry in Laihia.

The theoretical part of the thesis discussed the types of investments, their theoretical return requirements, aluminum melting and energy efficiency, aluminum degassing and cleaning, and challenges in the low-pressure die casting process. After the theoretical part the current state and challenges of the old low-pressure die casting process were examined. After reviewing the current state of the old process, the developments by the investments in the new low-pressure die casting process were presented. An effects summary of the new low-pressure die casting process on production, economic, and qualitative challenges of the selected product was created based on the thesis findings.

The thesis used both quantitative and qualitative methods. Data for the thesis were collected through the measurements of energy consumption, samples of aluminum melt density index, cycle times for the selected product, materials from machine and equipment suppliers, and expert consultations. The collected data were statistically analyzed and compared to each other.

As the result of the thesis, the overall effects of the investments on the quality improvement of the new low-pressure die casting process and the changes in the production costs of casting the selected product were obtained. The thesis findings indicated that energy efficiency, process quality, and efficiency were the most significant developments brought about by the investments. From the thesis results, it could be concluded that the investments were profitable.

¹ Keywords: investment, melting, energy efficiency, aluminium, casting

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä	2
Thesis abstract	3
SISÄLTÖ	4
Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo	6
1 JOHDANTO	7
1.1 Alteams Finland Oy ja työn tausta.....	7
1.2 Tutkimuksen tarkoitus ja hyöty	8
1.3 Tutkimusongelma ja kysymykset.....	8
2 INVESTOINTI.....	10
3 ALUMIININ SULATUS, KAASUHUUHTELU JA PUHDISTUS	11
3.1 Alumiinin sulatus	11
3.2 Alumiinin kaasuhuuhtelu	11
3.3 Alumiinisulan puhdistus.....	12
4 MATALAPAININVALU	14
4.1 Matalapainevaluprosessi.....	14
4.2 Matalapainevaluprosessin haasteet.....	15
5 MATALAPAININVALUPROSESSIN NYKYTILA	16
5.1 Prosessin vaiheet Borlilla	16
5.2 Sulatusuuni Borli	18
5.3 Alumiinisulan kaasuhuuhtelu ja puhdistus Borli.....	18
5.4 Lämpimänäpituuni Borli.....	19
5.5 Matalapainevalukone Borli	19
6 MATALAPAININVALUPROSESSI INVESTOINTIEN JÄLKEEN	21
6.1 Prosessin vaiheet Kurtz Ersä	21
6.2 Sulatusuunit Kurtz Ersä.....	24
6.3 Alumiinisulan kaasuhuuhtelu ja puhdistus Kurtz Ersä	24
6.4 Lämpimänäpituuni Kurtz Ersä	25
6.5 Matalapainevalukone Kurtz Ersä.....	26

7	INVESTOINTIEN VAIKUTUKSET	28
7.1	Sulatuksen kehitys	28
7.2	Alumiinin kaasuhuuhtelun ja pudistuksen kehitys.....	31
7.3	Lämpimänäpituunin ja täytön kehitys	36
7.4	Valamisen kehitys	42
7.5	Valmistuskustannuksien muutos tuotteella 1	47
8	YHTEENVETO	50
	LÄHTEET	52

Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuvio 1. Sähkönkulutuksen seuranta sähkösulatusuunissa.....	29
Kuvio 2. Vanhan lämpimänäpituunin energiankulutus.	36
Kuvio 3. Uuden lämpimänäpituunin energiankulutus.	38
Taulukko 1. Investoinnin taloudellinen vaikutus energiatehokkuuden kehitykseen.....	30
Taulukko 2. Kaasupitoisuudet vanhan ja uuden prosessien lämpimänäpituuneissa.....	35
Taulukko 3. Alumiinisulan lämpimänäpidon ja täytön tutkimustulosten vertailu.	42
Taulukko 4. Tuotteen 1 kiertoajat vanhalla ja uudella matalapainevalukoneella.	47
Taulukko 5. Tuotteen 1 valmistuskustannuksien muutoksien yhteenveto.....	49

1 JOHDANTO

1.1 Alteams Finland Oy ja työn tausta

Alteams Finland Oy (jatkossa Alteams) on osa Alteams Groupia, joka on kansainvälisesti toimiva alumiinivalimokonserni, jonka omistaa Kuusakoski Oy (Alteams, 2022). Alteams Group valmistaa strategiansa mukaisia pitkälle jalostettuja kevytmetallivaluja Suomessa, Puolassa, Kiinassa sekä Intiassa. Alteamsin tuotantoyksiköt Suomessa sijaitsevat Laihialla sekä Lopella. Laihian valimossa valmistustekniikkoina ovat matalapainevalu sekä korkeapainevalu, ja Lopen valimossa valmistustekniikkana on käytössä hiekkavalu. Alteams työllistää tällä hetkellä 138 henkilöä ja liikevaihto oli n. 16 miljoonaa euroa vuonna 2023. Laihian tuotantoyksikkö on myös Alteams Oy:n pääkonttori.

Alteamsin missio on olla asiakkaidensa strateginen yhteistyökumppani sähköistyvässä teollisuuden ratkaisuihin (Alteams, sisäinen tietolähde, 2024). Alteams tarjoaa asiakkailleen kaikki tuotteen valmistuksen vaiheet saman katon alta ilman välikäsiä alkaen tuotekehityksestä aina lopputuotteen toimitukseen (Alteams, 2022). Alteams on viimeisten vuosien aikana keskittänyt strategisen painopisteensä teknisesti vaativiin nestejäähdytettävihin kevytmetallivaluihin sähköistyvään teollisuuteen.

Alteamsin strateginen suuntaus sai alkunsa viisi vuotta sitten, kun yritys investoi uuteen valmistusteknologiaan, jolla mahdollistettiin suljettujen nestejäähdytyskiertojen valmistaminen kevytmetallivaluihin (Alteams, 2018). Investoinnin myötä Alteamsin strategian suunta on vahvistunut vuosi vuodelta, sekä oma paikka globaaleilla markkinoilla on vakautettu. Alteamsin liikevaihto koostuu pääosin nestejäähdytteisestä tehoelektroniikasta, taajuusmuuntajien rungoista sekä komponenteista sähköistyvään teollisuuteen etenkin raskaan liikenteen ajoneuvoihin ja koneisiin.

Asiakkaiden kasvava kysyntä on jatkunut usean vuoden ajan taukoamatta nopeasti kehityvässä sähköistyvässä teollisuudessa. Valtava kysyntä on ajanut Alteamsin tuotannon kapasiteetin ääri rajoille ja nykyisillä vanhemmilla koneilla on valmistuksessa havaittu tuotantonnollisia sekä laadullisia haasteita. Edellä mainittujen haasteiden ratkaisuksi Alteams teki alkuvuodesta 2023 päätöksen investoida uuden sukupolven matalapainevalukoneeseen

sekä prosessilaitteisiin Laihian tuotantoyksikköön. Investoinnilla halutaan vahvistaa nykyistä tuotannon kapasiteettiä, sekä taata tulevaisuudessa strategian mukaisten teknisesti haastavien kevytmetallivalutuotteiden kustannustehokas ja laadukas valmistus asiakkaille.

1.2 Tutkimuksen tarkoitus ja hyöty

Tarkoituksena opinnäytetyössä on tutkia uuden matalapainevalukoneen ja prosessilaitteiden investointien vaikutukset valitun tuotteen tuotannollisiin, taloudellisiin ja laadullisiin haasteisiin perustuen uusinta- ja laajennusinvestoinnin tuottovaateeseen. Teoreettista tuottovaadetta investointien tuomille parannuksille lähdetään seuraamaan tutkimalla, vertailemalla sekä analysoimalla nykyisistä koneista, laitteista sekä prosessista kerättyä dataa verraten niitä investointien käyttöönoton jälkeen saatavaan vertailukelpoiseen dataan. Tutkimuksessa kerätään numeraalista ja laadullista dataa tuotantoprosessista, formaalitietoa valmistajalta, teoriatietoa kirjallisuudesta sekä praktista tietoa tuotannosta ja asiantuntijoilta.

Tutkimuksen hyötynä saadaan numeraaliseen dataan perustuva analyysi uuden sekä vanhan koneen ja prosessin eroista tuotannollisesti, taloudellisesti ja laadullisesti valitun tuotteen osalta. Tutkimuksesta saadaan uutta praktista tietoa tuotannolle ja asiantuntijoille sekä parempi ymmärrys investointien tuomasta kehityksestä prosessivaiheisiin. Tällä mahdollistetaan ja tuetaan yrityksen kehitystä sekä henkilöstön jatkuvaa oppimista.

Tutkimuksesta saadaan hyötyä myös myynnin tarjousvaiheeseen, jossa pystytään tutkimuksen jälkeen huomioimaan vanhojen ja uuden matalapainevalukoneiden sekä prosessien valmistuskustannuksien erot hinnoittelussa. Tutkimuksesta saatavalla tiedolla nostetaan suoranaisesti kilpailukykyä tarjota strategian mukaisia teknisesti vaativia nestejäähdytteisiä tehoelektroniikkakomponentteja asiakkaiden erilaisiin tarpeisiin.

1.3 Tutkimusongelma ja kysymykset

Tutkimuksessa syvennytään nykytilan matalapainevaluprosessin koneiden ja laitteiden haasteisiin sekä rajoitteisiin. Vanhojen valukoneiden rajoitteina ovat teknisesti vaativien tuotteiden kohdalla se, että ne eivät salli kehittyneen teknologian mahdollistamien

muottitekniikkojen käyttöönottoa. Muotin optimoinneilla on olennainen vaikutus muotin täyttymiseen, metallin virtaukseen, lämpötilojen ja prosessin hallintaan. Optimoinnin puute vaativien tuotteiden muoteissa aiheuttaa sen, ettei prosessia pystytä ajamaan vaativan tuotteen valuteknillisten tarpeiden mukaisesti. Tuotteen valuteknillisten valmistuksen tarpeiden täyttämättömyys aiheuttaa prosessin kiertoaikojen tarpeetonta pitenemistä sekä laadullisia haasteita.

Alumiinisulan käsittelyssä ja lämpimänäpituunin täyttämässä vanhan prosessin aikana on omat rajoitteensa, jotka eivät auta laadullisissa haasteissa. Rajoitteet tuovat haasteita alumiinisulan kaasupitoisuuden ja epäpuhtauksien hallintaan. Alumiinisulan laadukas ja energiatehokas käsittely on yksi valimon perusedellytys. Uuden matalapainevalukoneen teknologian kehitys, alumiinisulan prosessointi sekä energiatehokkuuden parantaminen ovat tutkimuksen olennaisimmat aiheet.

Tutkimuksessa analysoidaan jo olemassa olevaa numeraalista dataa sekä asetetaan teoreettiset tuottovaateet teknologisesti kehittyneen prosessin investoinneille. Olemassa olevaa numeraalista dataa lähdetään vertailemaan investointien käyttöönoton jälkeen kerättävään vertailukelpoiseen numeraaliseen dataan, joihin perustuen tehdään yhteenveto investointien vaikutuksista huomioiden matalapainevaluprosessi kokonaisuudessaan. Tutkimuskysymykset työssä ovat:

1. Kuinka paljon valitun tuotteen tuotannollinen, taloudellinen ja laadullinen kannattavuus parani investointien myötä?
2. Miten paljon investoinneilla pystytään nostamaan kokonaisuudessaan prosessin laaduntuottokykyä?
3. Mitkä investointien osa-alueista ovat merkittävimpiä uudessa matalapainevaluprosessissa?

2 INVESTOINTI

Mitä investointi tarkoittaa ja mitkä sen tavoitteet ovat yrityksessä? Investointi tarkoittaa sitä, että yritys sijoittaa varallisuuttaan pääomaan tai toiminnan sellaiseen kehittämiseen, jolta odotetaan arvonnisäystä sekä tuottoja yritykselle (Martinsuo ym., 2016, luku 13). Yleisimmät investoinnit yrityksissä kohdistuvat rakennuksiin, tiloihin, laitteisiin tai prosesseihin.

Yrityksissä investointeja toteutetaan useasti projekteina (Martinsuo ym., 2016, luku 13). Investointiprojektit ovat tyypillisesti kertaluontoisia ja monimutkaisia, ja niihin liittyy aina epävarmuutta sekä riskejä. Investointiprojektin tavoitteisiin kuuluvat laajuus-, aika- ja kustannustavoitteet. Laajuustavoite määrittää mitä tehdään, aikatavoite määrittää milloin tehdään ja kustannustavoite määrittää kuka hoitaa tekemisen kustannukset ja resurssit.

Tutkimustyö kohdistuu Alteamsin strategiseen investointiin, joka kuuluu reaali-investointeihin. Reaali-investointi kohdistuu prosesseihin, koneisiin ja laitteisiin sekä niissä tapahtuvaan toimintaan (Martinsuo ym., 2016, luku 13). Tämän tutkimuksen investointityypit ovat uusinta- ja laajennusinvestoinnit. Uusintainvestoinnissa yritys korvaa vanhaa pääomaansa ja laajennusinvestoinnissa yritys nostaa tuotannon kapasiteettiaan (mt.).

Investointien kannattavuuden ja takaisinmaksuajan selvitykseen käytetään nettonykyarvomenetelmää, sisäistä korkokantamenetelmää ja takaisinmaksuaikamenetelmää (Koski, 2017, s. 49). Työn tutkimuksen uusintainvestoinnissa tuottovaateena Koski (mts. 28) käyttäisi 6–8 % vuodessa ja laajennusinvestoinnissa tuottovaade Kosken mukaan olisi 8–15 %. Ristiriitaisissa tuloksissa päätöksentekoon suositellaan nykyarvomenetelmän käyttämistä (Koski, 2017, s. 49; Martinsuon ym., 2016, luku 16).

Investointeja tehdään yrityksissä todellisuudessa todella kevyin päätöksin, ja siksi investointien takaisinmaksulaskelmat ovat vähintään, mitä voidaan tehdä (Koski, 2017, s. 19, 49). Investoinnin takaisinmaksulaskelma antaa vastauksen yrityksen johdolle, onko investointi kannattava vai ei. Investointilaskelmien ja päätöksentekojen valmistelut kuuluvat yrityksen johdon velvollisuuksiin.

3 ALUMIININ SULATUS, KAASUUHUTTELU JA PUHDISTUS

3.1 Alumiinin sulatus

Alumiinin sulattamisen taloudellisuus on valimoiden keskeinen taloudellinen tekijä (Campbell, 2015, s. 769). Sulatusprosessin hyvällä suunnittelulla ja kontrolloinnilla saavutetaan korkealaatuista alumiinisulaa valuprosessiin. Sulatuksen periaate on muuntaa kiinteät alumiiniharkot sulaan muotoon mahdollisimman energiatehokkaasti käyttäen siihen tarkoitettuja sulatusuuneja. Campbell (2015, s. 769) toteaa, että jos alumiini pystyttäisiin sulattamaan ilman lämpöhäviöitä 720 asteeseen energiaa kuluisi 320 kWh/t. Todellisen tarvittavan energian kulutus alumiinin sulattamiseen on hänen arvionsa mukaan 650–1300 kWh/t.

Alumiinisulan laatuun vaikuttavia tekijöitä ovat itse sulatus, sulan lämpimänäpito ja sulan siirtotekniikat (Campbell, 2015, s. 769). Edellä mainittujen sulan laatuun vaikuttavilla tekijöillä on suoranainen vaikutus tuotannon laatuun ja taloudellisuuteen.

Sulatusprosessi aloitetaan sulatusuunin valmistelulla. Sulatusuunin upokkaan seinämät puhdistetaan epäpuhtauksista, jotka kaavitaan lopuksi upokkaan pohjalta pois. Upokkaan puhdistuksen jälkeen uuni täytetään valettavan kappaleen valmistussuunnitelman mukaan. Sulatuksessa käytettävät alumiiniharkot ovat puhdasta alumiinia eli primääriharkkoa tai kierrätettyä alumiinia eli sekundääriharkkoa. Sulatusuunin täytön jälkeen uunin lämpötila nostetaan hetkellisesti ja alumiinisulan lämpötilan kehittymistä seurataan kosketusanturilla.

Sulatusuunin lämpötila nousee hetkellisesti 1100°C:seen. Alumiinisulan lämpötila sulatusuunissa on 720–760°C. Alumiinia voidaan tarpeiden mukaan seostaa sulatuksen jälkeen sulatusuuniin tai myöhemmin lämpimänäpituuniin. Seostuksen jälkeen sulan pinta puhdistetaan prosessin aikana kertyneistä epäpuhtauksista.

3.2 Alumiinin kaasuuhtelu

Vetykaasuja sekä oksideita muodostuu alumiinisulaan sen reagoiessa ilmankosteuden kanssa (Campbell, 2015, s. 777; Nath, 2018, s. 15–16). Alumiinin jähmettyessä vetykaasut vapautuvat ja aiheuttavat huokoisuutta, kerrostumia sekä heikentävät mekaanisia

ominaisuuksia alumiinissa. Vetykaasuista muodostuneet huokokset ovat yleisimpiä laadullisia ongelmia alumiinivaluissa.

Alumiinisulan kaasuhuuhtelu suoritetaan koneellisesti valimoissa (Vesuvius, sisäinen tietolähde, 2024, s. 23; Vesuvius, 2019c). Kaasuhuuhtelussa poistetaan alumiinisulasta vetykaasuja sekä epäpuhtauksia käyttämällä typpeä tai argonia. Kaasuhuuhtelua voidaan tehostaa käyttämällä tapauskohtaisesti valittua suolayhdistettä.

Alumiinisulan vetykaasupitoisuutta valimoissa testataan monilla eri tavoilla (Milne ym., 2003, s. 419–421). Heidän mukaansa testit voidaan jakaa kahteen ryhmään, jotka ovat alipainetestit ja perustestit. Alipainetestit perustuvat vedyn poistumiseen alumiinisulanäytteestä alipaineessa. Perustestit perustuvat typen sähkönjohtavuuden muutokseen, joka on mitattavissa, kun typpeä johdetaan alumiinisulaan.

3.3 Alumiinisulan puhdistus

Alumiinisulan puhdistukseen käytettävät fluksit ovat yhdistelmä suolaa ja muita seosaineita (HA Group, 2016, s. 2). Ainesosien yhdistelmä on suunniteltu sekoitettavaksi alumiinisulaan, jolloin fluksi saadaan reagoimaan alumiinisulan sisällä. Flukseja on käytetty parantamaan metallien laatua sekä lisäämään sulatuksen tehokkuutta sulattamisen historian alusta lähtien (mts. 1).

Reagoidessaan sulan alumiinin sisällä fluksi (HA Group, 2016, s. 1–2; Vesuvius, 2019b; Vesuvius, sisäinen tietolähde, i.a.)

- Poistaa oksideita
- Erottaa kuonaa
- Parantaa vetykaasujen poistumista
- Parantaa alumiinisulan rakennetta
- Suojaa alumiinisulaa hapettumiselta ja vetykaasulta
- Puhdistaa upokasta tai uunin seinämiä

Alumiinisulan puhdistaminen, suojaaminen sekä laadun varmistaminen on valimossa tärkeä työvaihe. Käyttökohteen mukaan oikein valitulla fluksilla pystytään vähentämään

alumiinin määrää poistettavassa kuonassa. Talouden näkökulmasta raaka-aineen hukan vähentäminen oikein valitulla fluksilla on erinomainen ominaisuus (Vesuvius, 2021, s. 2; Vesuvius, 2019a, 2019b, 2019c; i.a.).

4 MATALAPAINIVALU

4.1 Matalapainevaluprosessi

Matalapainevaluprosessin nimi tulee prosessin aikana käytettävästä suhteellisen pienestä ilmanpaineesta (Campbell, 2015, s. 842). Prosessin aikana tarvittava ilmanpaine muotin täyttämiseen on 0.3–0.5 bar. Alumiini nousee prosessin aikana 1 mbar paineessa 4 mm ylöspäin (Kurtz Ersa, sisäinen tietolähde, 2023a, s. 127). Matalapainevaluprosessia käytetään laajasti maailmassa autoteollisuuden komponenttien valmistamiseen mm. moottorilohkoihin, sylinterin kansiin sekä vanteisiin (Campbell, 2015, s. 842; Lumley, 2011, s. 150).

Matalapainevaluprosessin ensimmäinen vaihe on asetus (Lumley, 2011, s. 149; Kurtz Ersa, sisäinen tietolähde, 2023a, s. 24). Valumuotti asennetaan keskelle valukoneen pöytä. Muotin alaosa kiinnitetään kiinteään alapöytään ja yläosa liikkuvaan yläpöytään. Matalapainevalukoneen alle tuodaan lämpimänäpituuni täynnä alumiinisulaa. Lämpimänäpituunia ajetaan ylös, jolloin nousuputki tiivisteiden kanssa yhdistää valumuotin lämpimänäpituuniin.

Matalapainevalun toinen vaihe on muotin täyttäminen alumiinisulalla (Lumley, 2011, s. 149–150; Kurtz Ersa, sisäinen tietolähde, 2023a, s. 24). Lämpimänäpituuni paineistetaan paineilmalla. Alumiinisula nousee nousuputkea pitkin ja täyttää valumuotin. Lämpimänäpituunin painetta pidetään päällä, kunnes alumiinisula on jähmettynyt valumuottiin. Jähmettymistä voidaan tehostaa jäähdyttämällä valumuottia käyttämällä vettä, ilmaa tai näiden seosta. Alumiinisulan jähmettymisen jälkeen lämpimänäpituunista poistetaan paine ja alumiinisulan pinta laskee nousuputkessa.

Matalapainevalun kolmas vaihe on valukappaleen poisto (Kurtz Ersa, sisäinen tietolähde, 2023a, s. 24). Alumiinisulan jähmettymisen jälkeen valumuotti aukaistaan. Matalapainevalukoneen yläpöytä ajetaan ylös, jolloin muotti aukeaa. Matalapainevalukoneen poistolautanen käännetään koneen sisälle valukappaleen alle. Valumuotin ulostyöntö irrottaa valukappaleen valumuotin yläosasta. Valukappale putoaa poistolautaselle. Poistolautanen käännetään ulos koneen sisältä. Operaattori poistaa valukappaleen poistolautaselta ja käynnistää työkierron uudestaan.

4.2 Matalapainevaluprosessin haasteet

Matalapainevaluprosessin hyvien ominaisuuksien lisäksi täytyy muistaa prosessin haasteet, jotka voivat aiheuttaa tuotannossa suurta taloudellista menetystä (Campbell, 2015, s. 844). Haasteita syntyy monista erilaisista tekijöistä, joista kaikki tulee ottaa huomioon.

Campbell (2015, s. 844–845) listaa viisi haastetta prosessin onnistumiselle, jotka ovat

1. Lämpimänäpituunin täyttäminen
2. Lämpimänäpituunin esipaineistuksen puuttuminen
3. Nopea paineen laskeminen lämpimänäpituunissa
4. Tarpeettoman suuren paineen käyttäminen täytön aikana
5. Sulan lämmön johtuminen muottiin

5 MATALAPAINIVALUPROSESSIN NYKYTILA

5.1 Prosessin vaiheet Borlilla

1. Alumiinin sulatus

Prosessi alkaa alumiinin sulatuksesta valettavan tuotteen valmistussuunnitelman mukaan. Sulatusprosessi tapahtuu paikallisesti matalapainevalukoneelle kohdennetulla sulatusuunilla. Alumiinin sulattaminen tuotannossa kuuluu sulattajan toimenkuvaan.

Sulatusprosessi aloitetaan tyhjän sulatusuunin upokkaan seinien ja pohjan kaavinnalla. Upokkaan seinämille ja pohjalle kertyy epäpuhtauksia, jotka tulee poistaa aina ennen uuden erän sulattamista. Puhdistuksen jälkeen sulatusuuni täytetään valmistussuunnitelman mukaisesti primääriharkon ja kiertometallin sekoituksella.

Täytön jälkeen sulatusuuni asetetaan sulatustilaan, jolloin sulatusuunin lämmitystehoa nostetaan ajastetusti. Sulatustilassa lämpötila nousee uunin ilmatilassa 1100°C:seen. Sulatuksen aikana alumiinin lämpötilaa valvotaan kosketusanturilla. Alumiinisulan lämpötila pidetään sulatusuunissa 740–770°C välillä.

2. Alumiinisulan kaasuhuuhtelu ja puhdistus

Sulatusprosessin jälkeen sulatusuuni on täynnä alumiinisulaa. Seuraava vaihe on alumiinisulan kaasuhuuhtelu ja puhdistus. Kaasuhuuhtelu ja puhdistus kuuluvat sulattajan toimenkuvaan.

Sulatusuunin kansi käännetään hydraulisesti sivuun, ja alumiinisulan pinnalta poistetaan epäpuhtaudet kaapimalla. Epäpuhtauksia syntyy sulatusprosessissa alumiinisulan pinnalle, kun alumiini ja ilma reagoivat toisiensa kanssa. Pinnan puhdistuksen jälkeen voidaan aloittaa kaasuhuuhtelu.

Kaasuhuuhtelu suoritetaan koneellisesti siihen tarkoitettulla laitteistolla. Kaasuhuuhtelussa käytetään 2.5 laatuluokan tyypeä (Linde, i.a.-c). Sulattaja kääntää kaasuhuuhtelulaitteen puomin oikeaan asentoon ja lukitsee sen keskelle sulatusuunia.

Kaasuhuuhtelulaite käynnistetään, jolloin varsi ja roottori alkavat pyörimään. Roottori ajetaan sulaan alumiiniin, noin 500 mm päähän upokkaan pohjasta.

Kaasuhuuhtelulaitteen onttoa vartta pitkin typpi johdetaan pyörivän roottorin keskelle alumiinisulaan (Vesuvius, sisäinen tietolähde, 2024, s. 23). Kun roottori pyörii, se muodostaa alumiinisulaan pyörteen, jonka avulla typpi sekoitetaan alumiinisulaan. Typetyksen aikana alumiinisulasta erottuu vetykaasuja sekä epäpuhtauksia, jotka nousevat tyypin avulla pinnalle.

Typetystä tehostetaan annostelemalla prosessin aikana fluksia suoraan alumiinisulan pinnalle. Fluksi tehostaa epäpuhtauksien poistumista typetyksen aikana (HA Group, 2016, s. 1–2). Reagoidessaan fluksiin epäpuhtaudet nousevat pinnalle tummiksi jauhomaisiksi kokkareiksi. Kaasuhuuhtelu ja puhdistus suoritetaan kolme kertaa täyteen sulatusuuniin. Yksi käsittelykierros kestää 5 minuuttia. Alumiinisulan pinta puhdistetaan epäpuhtauksista jokaisen käsittelykerran jälkeen.

3. Alumiinisulan annostelu matalapainevalukoneen lämpimänäpituuniin

Matalapainevalukoneen lämpimänäpituunin täytön aikana valaja ja sulattaja työskentelevät yhdessä. Valaja pysäyttää matalapainevalukoneen sekä aukaisee lämpimänäpituunin täyttöluukun sulattajalle. Valaja kääntää keraamiset rännit paikoilleen lämpimänäpituunin suulle, jonka jälkeen sulattaja aloittaa alumiinisulan kaatamisen sulatusuunista. Alumiinisula annostellaan lämpimänäpituuniin keraamisten rännien avulla.

Valaja valvoo lämpimänäpituunin täyttymistä. Alumiinisulan saavuttaessa ylämerkin valaja antaa merkin sulattajalle kaadon lopettamiseksi. Lämpimänäpituunin täytön jälkeen valaja kääntää keraamiset rännit pois lämpimänäpituunilta.

4. Alumiinisulan puhdistus täytön jälkeen

Valaja kaappii alumiinisulan pinnalta täytön yhteydessä syntyneet ja kulkeutuneet epäpuhtaudet pois. Puhdistuksen jälkeen valaja sulkee lämpimänäpituunin luukun. Valaja kuittaa lämpimänäpituunin täytön valukoneen näytöltä suoritetuksi ja aloittaa valamisen uudelleen.

5.2 Sulatusuuni Borli

Thermconcept TAG1000/12/K on Saksassa valmistettu kaasusulatusuuni (Thermconcept, 2022; Thermconcept, i.a., s. 2). Kaasusulatusuunissa käytetään Weishauptsin kaasupoltinta. Polttimen teho on 450kW. Thermconcept TAG1000/12/K sulatusuunissa poltettavana kaasuna käytetään propaanikaasua. Thermconcept TAG1000/12/K sulatusuunissa on 1000 kg kapasiteetin upokas.

Thermconcept TAG1000/12/K sulatusuunissa poltin sijaitsee uunin sivulla alaosassa (Thermconcept, 2022; Thermconcept, i.a., s. 2). Käydessään poltin luo upokkaan ympärille spiraalisen pyörteen (Nabertherm, 2023, s. 6–7). Kuuma ilmavirta johdetaan uunin yläosan aukosta pakoputkeen. Thermconcept TAG1000/12/K on sivupoistoinen kaasusulatusuuni (Thermconcept, i.a., s. 2; Nabertherm, 2023, s. 6–7).

5.3 Alumiinisulan kaasuhuuhtelu ja puhdistus Borli

StrikoWestofen kaasuhuuhtelulaite on valmistettu Saksassa (StrikoWestofen, 2024). Kaasuhuuhtelulaite on varustettu kiinteällä lavalla, muita lisävarusteita laitteessa ei ole. StrikoWestofen kaasuhuuhtelulaitteessa käytetään 2.5 laatuluokan tyyppiä (Linde, i.a.-c). Kaasuhuuhtelulaitteessa ei ole rajoitettu typen tulopainetta, ainoastaan virtausnopeus on rajoitettu 16l/min.

StrikoWestofen kaasuhuuhtelulaitetta on muutettu alkuperäisestä kokoonpanosta Borleille. Alkuperäinen kaasuhuuhtelulaitteen tolppa on korvattu Demagin valmistamalla tolppalla sekä itse valmistetulla nivelvarrella, johon StrikoWestofen kaasuhuuhtelulaite on kiinnitetty. Muutokset ovat olleet välttämättömiä, koska kaasuhuuhtelulaitetta käytetään kahden matalapainevalukoneen sulatusuunien alumiinisulan kaasuhuuhteluun, jotka eivät ole samalla kääntösäteellä.

StrikoWestofen kaasuhuuhtelulaitteen roottorin korkeuden liikealue on säädetty pienemmän sähkösulatusuunin upokkaan pohjankorkeuden mukaan. Borli MK.167 kaasusulatusuunissa StrikoWestofen kaasuhuuhtelulaitteen roottori saadaan laskettua noin puoleen väliin upokasta, joka ei ole optimaalinen prosessille.

5.4 Lämpimänäpituuni Borli

Borli MK.167 on italialaisvalmisteinen sähkölämmitteinen lämpimänäpituuni (Borli, sisäinen tietolähde, 2007b, luku 3.3.1, s. 3–5; 3–6). Lämpimänäpituunin teho on 40kW. Lämpimänäpituunissa on kolme piikarbidisähkövastusta, jotka on suojattu keraamisilla suoja-putkilla. Lämpimänäpituunin kapasiteetti on 1450 kg. Borli MK.167 lämpimänäpituunin toiminta-alue on 0-2bar.

Borli MK.167 lämpimänäpituunin sisäpuolisissa metalliseinissä on 20 mm eristelevyt (Borli, sisäinen tietolähde, 2007b, luku 3.3.1, s. 3–6; 3–7). Eristelevyjen jälkeen lämpimänäpituunin vuorauksessa on useita kerroksia eristetiiltä. Eristetiilien päällä on kaksi kerrosta eristävää maalia. Eristävä maali tiivistää muurauksen sekä estää mikrohalkeamien syntymisen uunin sisäpuoleen. Päälimmäinen kerros eristävää maalia poltetaan uunin sisäpuolen pintaan, koska se on jatkuvassa kosketuksessa sulan alumiinin kanssa.

Borli MK.167 lämpimänäpituunin ilmanpainetta ohjataan proportionaaliventtiilillä (Borli, sisäinen tietolähde, 2007b, luku 3.3.1, s. 3–7; 3–8). Ilmanpainetta kompensoidaan lämpimänäpituunissa alumiinisulan tilavuuden muutoksen mukaan. Ilmanpaineen kompensoinnilla sulan alumiinin lähtötaso pysyy vakiona tilavuuden muutoksesta huolimatta.

5.5 Matalapainevalukone Borli

Borli MK.167 on italialaisvalmisteinen matalapainevalukone (Borli, sisäinen tietolähde, 2007b, luku 3.2, s. 3–3). Borli MK.167 on valmistettu vuonna 2007 ja käyttöön otettu vuonna 2008. Borli MK.167 yläpöydän liikealue sekä kokonaiskorkeus määräävät valumuotin minimikorkeuden. Kokonaiskorkeus Borli MK.167 on 6850 mm ja yläpöydän liikealue 1600 mm. Borli MK.167 valumuotin minimikorkeus on 500 mm.

Borli MK.167 yläpöydän mitat ovat 1954 mm x 1234 mm x 100 mm ja alapöydän mitat ovat 2300 x 1450 x 120 mm (Borli, sisäinen tietolähde, 2007b, luku 3.2, s. 3–3). Borli MK.167 aisojen välin mitat ovat 1550 x 830 mm. Matalapainevalukoneen aisojen väliset mitat määräävät valumuotin äärimitat.

Borli MK.167 hydraulikkajärjestelmä ohjaa matalapainevalukoneen yläpöydän, kappaleen hakulautasen, muottien keernojen ja lämpimänäpituunin liikeitä sekä kallistusta (Borli, sisäinen tietolähde, 2007b, luku 3.2, s. 3–3; luku 3.3.3, s. 3–10). Hydraulisyliinterien sulkuvoima on 220kN ja aukaisuvoima 178kN käytettäessä 110 bar painetta.

Borli MK.167 paineilmajärjestelmä tarvitsee toimiakseen 5–6 bar tulopainetta (Borli, sisäinen tietolähde, 2007b, luku 3.3.4, s. 3–11). Paineilmajärjestelmässä on 1 m³ varaaja ennen matalapainevalukonetta. Paineilmaa käytetään Borli MK.167 lämpimänäpituunin paineistukseen sekä valumuottien jäähtymiseen (Borli, sisäinen tietolähde, 2007b, luku 3.3.5, s. 3–12). Borli MK.167 on varustettu kahdeksalla jäähdytyspiirillä, joista neljä on koneen yläpöydässä ja neljä alapöydässä. Jäähdytyspiireissä voidaan käyttää ilmaa, vettä tai niiden sekoitusta muotin jäähtymiseen.

6 MATALAPAINIEVALUPROSESSI INVESTOINTIEN JÄLKEEN

6.1 Prosessin vaiheet Kurtz Ersä

1. Alumiinin sulatus

Alumiini sulatetaan uudelle matalapainevalukoneelle rakennetussa sulatusalueessa. Alumiinin sulattamiseen käytetään kahta uudelleen rakennettua sulatusuunia. Prosessi alkaa valettavan tuotteen alumiinin sulatuksella valmistussuunnitelman mukaisesti. Uudella sulatusalueella alumiinin sulattaminen kuuluu sulattajan toimenkuvaan.

Sulatusprosessi alkaa molempien sulatusuunien upokkaiden seinien sekä pohjan kaavinnalla. Kaavinnan jälkeen upokkaasta poistetaan irronneet epäpuhtaudet kauhalla. Upokkaat puhdistetaan aina ennen uuden erän sulattamisen aloittamista. Puhdistuksen jälkeen sulatusuunit täytetään valmistussuunnitelman mukaisesti primääriharkon ja kiertometallin sekoituksella.

Täytön jälkeen sulatusuunit asetetaan sulatustilaan, jonka aikana lämmitystehoa nostetaan ajastetusti. Lämpötila nousee sulatusuunin ilmatilassa 1100°C:seen. Sulatuksen aikana alumiinin lämpötilaa valvotaan kosketusanturilla. Alumiinisulan lämpötila pidetään sulatusuunissa 730–740°C välillä.

2. Alumiinisulan annostelu matalapainevalukoneen lämpimänäpituuniin

Sulatusprosessin jälkeen tyhjä lämpimänäpituuni nostetaan sulatusalueen täyttöasemaan. Lämpimänäpituuniin kiinnitetään lämpimänäpitoaseman virtakaapelit varmistamaan, ettei alumiinisulan lämpötila pääse laskemaan uunin täytön aikana. Lämpimänäpituunista irrotetaan nousuputkikansi sekä puhdistetaan itse nousuputki. Puhdistettu nousuputkikansi nostetaan omaan lämpimänäpitoasemaan odottamaan uudelleen asennusta.

Seuraavaksi lämpimänäpituunin päälle nostetaan suojakansi alumiinisulan täytön ajaksi. Suojakannen keraamisia rännejä pitkin alumiinisula pystytään annosteamaan

molemmista sulatusuuneista lämpimänäpituuniin. Lämpimänäpituuni täytetään aina ylämerkkiin asti. Täytön jälkeen suojakansi nostetaan pois lämpimänäpituunin päältä. Täyden lämpimänäpituunin alumiinisulan pinnalta poistetaan kaapimalla sulatusuuneista tulleet epäpuhtaudet. Sulattaja pystyy operoimaan kaiken itsenäisesti ilman valajan apua.

3. Alumiinin kaasuhuuhtelu ja puhdistus

Lämpimänäpituunin täytön jälkeen alumiinisula kaasuhuuhdellaan ja puhdistetaan. Kaasuhuuhtelu ja puhdistus suoritetaan koneellisesti uudella kaasuhuhtelulaitteistolla (Vesuvius, sisäinen tietolähde, 2024). Uudella laitteistolla kaasuhuhtelussa käytetään 5.0 laatuluokan tyyppiä (Linde, i.a.-b). Ennen prosessin käynnistämistä lämpimänäpituunin paineilmatulojen eteen asennetaan suojapelti sekä alumiinisulan lämpötila mitataan kosketusanturilla lämpimänäpituunista.

Alumiinisulan lämpötila syötetään kaasuhuhtelulaitteistoon, jonka jälkeen SMARTT automaatioajo käynnistetään. SMARTT-toiminto optimoi laitteen toimintoja prosessin aikana (Vesuvius, 2019a; Vesuvius, sisäinen tietolähde, 2024). Kaasuhuhtelulaitteisto kääntyy automaattisesti lämpimänäpituunin päälle, jonka jälkeen varsi sekä roottorin alkavat pyörimään. Laitteisto ajaa roottorin 100 mm päähän upokkaan pohjasta ennen typetyksen aloitusta.

Kaasuhuhtelulaitteen onttoa vartta pitkin typpi johdetaan pyörivän roottorin keskelle (Vesuvius, sisäinen tietolähde, 2024, s. 23). Roottori pyörii aluksi kovempaa muodostaen syvän pyörteen varren viereen (Vesuvius, 2019b). Pyörre ulottuu aina roottoriin asti lähelle upokkaan pohjaa. Laitteen automaattiannostelija jauhaa sekä annostelee fluksin suoraan pyörteeseen. Annostelun jälkeen laite ajaa automaattisesti keraamisen lavan sulaan pysäyttäen pyörteen.

Ominaisuuden avulla fluksi saadaan sekoittumaan ja reagoimaan alumiinisulaan upokkaan pohjalta asti (Vesuvius, 2019b). Kaasuhuuhtelu ja puhdistus suoritetaan täyteen lämpimänäpituuniin yhden kerran. Käsittelyaika uudella laitteistolla on 5 minuuttia. Käsittelyn jälkeen laite nousee kotiasemaan automaattisesti. Kaasuhuhtelulaite ajetaan huoltoasentoon, jossa varsi sekä roottori puhdistetaan käsittelyn jälkeen.

Lämpimänäpituunin paineilmatulojen suojaletti poistetaan ja alumiinisulan pinta puhdistetaan nousseista epäpuhtauksista kaapimalla. Lämpimänäpituunin yläosa sekä kannentiiviste imuroidaan ennen nousuputkikannen asentamista takaisin.

Täysinäinen valmiiksi käsitelty lämpimänäpituuni nostetaan pois täyttöasemasta. Lämpimänäpituuni siirretään matalapainevalukoneen viereen lämpimänäpitoasemaan odottamaan uunin vaihtoa. Sulattaja pystyy operoimaan kaikki valmistelut itsenäisesti ilman valajan apua.

4. Lämpimänäpituunin vaihto matalapainevalukoneeseen

Lämpimänäpituunin vaihto tapahtuu sulattajan sekä valajan yhteistyöllä. Lämpimänäpituunissa alumiinisulan pinnan lähestyessä nousuputken alareunaa valukoneella syttyy uunin vaihtovalo merkiksi sulattajalle (Kurtz Ersa, sisäinen tietolähde, 2023a). Lämpimänäpituunista viimeisen valukappaleen jälkeen valaja kuittaa uunin vaihdon aktiiviseksi koneen käyttöpaneelista. Sulattaja laskee uunin alas sekä ajaa sen vaihtoasemaan pois matalapainevalukoneen alta.

Vaihtoasemassa valaja irrottaa lämpimänäpituunista valukoneen virtakaapelit sekä paineilmaliiännät (Kurtz Ersa, sisäinen tietolähde, 2023a). Sulattaja kiinnittää samanaikaisesti nostoketjut lämpimänäpituunin nostolenkkeihin. Lämpimänäpituuni nostetaan pois siirtokelkasta ja siirretään täyttöasemaan sulatusalueelle. Valuri siirtää lämpimänäpitoasemassa olevasta täysinäisestä lämpimänäpituunista virtakaapelit tyhjään täyttöasemaan laskettuun lämpimänäpituuniin.

Sulattaja kiinnittää nostoketjut täysinäiseen lämpimänäpituuniin ja aloittaa uunin siirron matalapainevalukoneelle. Valaja auttaa sulattajaa täysinäisen lämpimänäpituunin siirrossa sekä uunin paikoittamisessa siirtokelkkaan. Sulattaja laskee lämpimänäpituunin paikoilleen sekä poistaa nostoketjut lämpimänäpituunista. Valaja asentaa uuden tiivsteen nousuputken päähän sekä kalibroi lämpimänäpituunin esipaineistuksen, jonka jälkeen valaja lähtee takaisin ylös koneen työtasolle (Kurtz Ersa, sisäinen tietolähde, 2023a). Sulattaja kiinnittää vielä valukoneen virtakaapelit sekä paineilmaliiännät takaisin lämpimänäpituuniin.

Sulattaja kuittaa lämpimänäpituunin vaihdon suoritetuksi alhaalta uunin vierestä (Kurtz Ersa, sisäinen tietolähde, 2023a). Valaja pystyy tämän jälkeen kuittaamaan lämpimänäpituunin vaihdon suoritetuksi matalapainevalukoneen käyttöpaneelistä. Sulattaja ajaa lämpimänäpituunin takaisin matalapainevalukoneen alle sekä nostaa uunin yläasentoon. Valaja tarkastaa valukoneen käyttöpaneelistä, että lämpimänäpituuni saavuttaa yläasennon. Valaja aloittaa valamisen uudelleen lämpimänäpituunin vaihdon jälkeen.

6.2 Sulatusuunit Kurtz Ersa

Nabertherm K240/12 ovat Saksassa valmistettuja sähkösulatusuuneja (Nabertherm, 2024, s. 11). Sähkösulatusuuneissa on 18 vapaasti säteilevää lämmitysvastusta kolmella sulatusuunin sivulla. Nabertherm sähkösulatusuunien tehot ovat 126kW. Nabertherm K240/12 sähkösulatusuuneissa on 578 kg kapasiteetin upokkaat.

Nabertherm K240/12 sähkösulatusuuneissa on yksinkertainen ja huoltoystävällinen rakenne (Nabertherm, 2024, s. 10). Sulatusuunin ulkokuoria vasten on 40 mm eristelevy. Eristelevyjen edessä on 123 mm tulikivikuori. Tulikivikuoreen on muurattu kannatinkivet, joihin lämmitysvastukset asennetaan.

6.3 Alumiinisulan kaasuhuuhtelu ja puhdistus Kurtz Ersa

Foseco FDU MTS 1500 kaasuhuuhtelulaite on valmistettu Saksassa (Vesuvius, sisäinen tietolähde, 2024). Kaasuhuuhtelulaite on varustettu SMARTT-prosessiohjauksella, wlan optiolla, alumiinisulan lämpötilan mittauksella, automaattisella annostelijalla ja lavalla. Foseco FDU MTS 1500 kaasuhuuhtelulaitteessa käytetään valmistajan vaatimuksen mukaisesti 4.6 laatuluokan tyyppiä 5 bar tulopaineella.

SMARTT-prosessiohjaus huomioi alumiiniseoksen, alumiinisulan lämpötilan, upokkaan tilavuuden, roottorin mallin, ympäristön ilmankosteuden sekä lämpötilan (Vesuvius, sisäinen tietolähde, 2024, luku 8.9; Vesuvius, 2019a; Vesuvius, i.a.). SMARTT-prosessiohjaus laskee muuttujien mukaan optimaaliset parametrit, kaasun virtauksen, fluksin määrän ja

käsittelyajan kaasuhuuhtelulle ja puhdistukselle. SMARTT-prosessiohjaus tallentaa jokaisen kaasuhuuhtelun ja puhdistuksen tiedot wlan optiolla pilveen.

Foseco FDU MTS 1500 kaasuhuuhtelulaite valvoo lämpötilan mittauksella alumiinisulan lämpötilaa käsittelyn aikana (Vesuvius, sisäinen tietolähde, 2024, Vesuvius 2019a; Vesuvius, i.a.). Kaasuhuuhtelulaitteessa on asetettu lämpötilojen raja-arvot käsittelyn aloittamiselle. Lämpötilan valvonnalla vakioidaan käsiteltävän alumiinisulan lämpötila.

Foseco FDU MTS 1500 kaasuhuuhtelulaitteessa on automaattinen fluksin annostelu (Vesuvius, sisäinen tietolähde, 2024, luku 8.9; Vesuvius, 2019a, 2019b, i.a.). Annostelulaite jauhaa ja annostelee SMARTT-prosessiohjauksen laskeman käsittelyyn vaadittavan fluksin määrän. Fluksi annostellaan suoraan pyörivän roottorin muodostamaan pyörteeseen. Pyörteen avulla fluksi saadaan annosteltua syvälle alumiinisulaan ja näin reagoimaan tasaisesti käsiteltävään alumiinisulaan upokkaan pohjalta asti.

Foseco FDU MTS 1500 kaasuhuuhtelulaitteessa on varusteena automaattilapa (Vesuvius, 2019a, 2019b, 2019c). Ominaisuus aktivoituu, kun SMARTT-prosessiohjaus on lisännyt alumiinisulan käsittelyyn vaadittavan määrän fluksia roottorin muodostamaan pyörteeseen. Automaattinen lapa laskeutuu alumiinisulaan pysäyttäen pyörteen.

Kaasuhuuhtelu aktivoituu pyörteen pysähtyessä, samalla fluksin reagointi rauhoittuu alumiinisulassa (Vesuvius, 2019a, 2019b, 2019c). Kaasuhuuhtelun aikana SMARTT-prosessiohjaus säättää roottorin pyörintänopeutta, jolloin typpikaasukuplat sekoittuvat tasaisesti alumiinisulaan. Tasainen typpikaasukuplien sekoittuminen alumiinisulaan saa fluksin reagoimaan sekä erottamaan epäpuhtauksia alumiinisulasta paremmin, jolloin epäpuhtaudet nousevat alumiinisulan pinnalle hienoksi jauhoksi.

6.4 Lämpimänäpituuni Kurtz Ersä

Balzer TEND1100s on saksalaisvalmisteinen sähkölämmitteinen lämpimänäpituuni (Balzer, sisäinen tietolähde, 2023a, s. 18–22). Balzer TEND1100s lämpimänäpituunissa on 12 kappaletta lämmityselementtejä, joiden lämmitysteho on 60kW. Lämmityselementit ja niiden välilevyt varastoivat itseensä lämmitysenergiaa. Lämpimänäpituunun kokonaisteho

on energianvarastoinnin kanssa 90kW. Lämpimänäpituunin kapasiteetti on 1100 kg. Blazer TEND1100s toiminta-alue on 0-1bar.

Blazer TEND1100s lämpimänäpituunin sisäpuolen eristeet on valmistettu erikoiskuiduista (Blazer, sisäinen tietolähde, 2023a, s. 21–22; Blazer, sisäinen tietolähde, 2023b). Eristelevyt kestävät 1200°C sekä ovat sähköä johtamattomat. Blazer TEND1100s lämpimänäpituunin metalliseiniä vasten on kaksi kerrosta eristettä. Ensimmäisen kerroksen vahvuus on 20 mm ja toisen 50 mm. Eristelevykerroksien edessä on eristetiilikerros, jossa vastuselementit ovat kiinni. Vastuselementtien ja lämpimänäpituunin kannen välitila on vuorattu eristelevyillä.

6.5 Matalapainevalukone Kurtz Ersä

Kurtz Ersä AL 13-13 SC on saksalaisvalmisteinen matalapainevalukone (Kurtz Ersä, sisäinen tietolähde, 2023a, 2023c, 2023d). Kurtz Ersä AL 13-13 SC on valmistettu ja käyttöön otettu vuonna 2023. Kurtz Ersä AL 13-13 SC yläpöydän liikealue ja kokonaiskorkeus määrittävät valumuotin minimikorkeuden. Kokonaiskorkeus Kurtz Ersä AL 13-13 SC on 6400 mm ja yläpöydän liikealue 1100 mm. Kurtz Ersä AL 13-13 SC valumuotin minimikorkeus on 750 mm.

Kurtz Ersä AL 13-13 SC yläpöydän mitat ovat 1700 mm x 1700 mm x 55 mm ja alapöydän mitat ovat 2000 mm x 1680 mm x 85 mm (Kurtz Ersä, sisäinen tietolähde, 2023a, 2023d, 2023e). Kurtz Ersä AL 13-13 SC aisojen välin mitat ovat 1350 mm x 1350 mm. Kurtz Ersä AL 13-13 SC voidaan asentaa maksimissaan 5000 kg painoinen valumuotti.

Kurtz Ersä AL 13-13 SC hydraulikkajärjestelmä ohjaa matalapainevalukoneen yläpöydän, hydraulisyntereiden, kappaleen hakulautasen, muotin keernanvetojen, lämpimänäpituunin sekä siirtokelkan liikkeitä (Kurtz Ersä, sisäinen tietolähde, 2023a). Hydraulisyntereiden sulkuvoima on 200 kN ja aukaisuvoima 200 kN käytettäessä 110 bar painetta.

Kurtz Ersä AL 13-13 SC paineilmajärjestelmä tarvitsee 6–8 bar tulopainetta (Kurtz Ersä, sisäinen tietolähde, 2023a, s. 26). Alteams tehtaan paineilmajärjestelmässä on ilman-kuivain ja 1 m³ varaaja ennen järjestelmän liittymistä matalapainevalukoneeseen.

Paineilmaa käytetään Kurtz Ersä AL 13-13 SC lämpimänäpituunin paineistukseen, paineilmaventtiilien ja sylintereiden käyttöön sekä valumuottien jäähdytykseen (mts.).

Kurtz Ersä AL 13-13 SC on yhteensä 16 jäähdytyspiiriä, joista 8 on matalapainevalukoneen yläpöydässä ja kahdeksan alapöydässä (Kurtz Ersä, sisäinen tietolähde, 2023a, s. 27). Jäähdytysvesijärjestelmä tarvitsee 5–8 bar tulopainetta toimiaksensa. Jäähdytyspiireissä voidaan käyttää paineilmaa, vettä tai niiden sekoitusta muotin jäähdytykseen (Kurtz Ersä, sisäinen tietolähde, 2023a, 2023f). Kurtz Ersä AL 13-13 SC jäähdytysjärjestelmän maksimi virtauksen kapasiteetti on 8 bar käytettäessä vedellä 14400l/h.

Kurtz Ersä AL 13-13 SC matalapainevalukoneetta voidaan käyttää ilman esipainetta tai esipaineistuksen kanssa (Kurtz Ersä, sisäinen tietolähde, 2023a s. 129–132; 2023g). Ilman esipainetta valettaessa alumiinisulan pinnantaso on nousuputkessa sama kuin upokkaassa olevan alumiinisulan pinnantaso. Ilman esipainetta valettaessa matalapainevalukoneen painekäyrän aloituspiste siirtyy alaspäin suhteessa jäljellä olevaan alumiinisulan pintaan upokkaassa. Alumiinisulan pinnantason siirtyminen alaspäin pidentää kiertoaikaa valussa, koska alumiinisulan täytyy lopuksi nousta nousuputken alaosaan asti nousuputken ja valumuotin liitoskohtaan.

Esipaineella valettaessa Kurtz Ersä AL 13-13 SC matalapainevalukone nostaa ilmanpainetta lämpimänäpituunissa määrityksen mukaan, jolloin alumiinisulan pinnantaso nousuputkessa pysyy aina samana (Kurtz Ersä, sisäinen tietolähde, 2023a s. 129–132). Esipainetta käytettäessä painekäyrän aloitusehdot pysyvät samana täydestä lämpimänäpituunista aina uuninvaihdon alarajaan asti. Määritetyllä esipaineella pystytään säätämään haluttu lähtötaso alumiinisulalle nousuputkessa valukappalekohtaisesti.

7 INVESTOINTIEN VAIKUTUKSET

7.1 Sulatuksen kehitys

Investointien vaikutusta alumiinin sulattamisen energiatehokkuuteen tutkittiin energiankulutuksen seurannalla. Investointien myötä uuteen prosessiin kuuluu kaksi sähkösulatusuunia. Sähkösulatusuunin energiatehokkuutta verrataan vanhan prosessin kaasusulatusuuniin. Energiatehokkuutta voidaan merkitä monella eri tavalla (Thiede, 2012, s. 30–31). Tässä tutkimuksessa merkintänä käytetään kilowattituntia yhtä alumiinikilogrammaa kohden (kWh/kg Al).

Vanhan prosessin kaasusulatusuunin energiatehokkuutta lähdettiin tutkimaan käytettyjen propaanikaasukilogrammojen määrää sulatettuihin alumiinikilogrammoihin nähden. Käytetyn kaasun määrä saatiin toimitetun kaasun rahtikirjoista sisäisestä kirjanpidosta. Sulatetut alumiinikilogrammat kaasusulatusuunilla saatiin tuotannon ohjausjärjestelmän kautta. Tuloksien luotettavuuden parantamiseksi ajanjaksoksi valikoitui 1.1.2023–29.2.2024.

Propaanikaasun kulutusta tutkittaessa selvisi, että kaasua käytetään tuotannossa myös kattolämmittimiin sekä tohoihin. Kattolämmittimien sekä tohojen kaasun kulutusta arvioitiin pidemmältä ajalta historiasta ennen kaasusulatusuunin käyttöönottoa. Kaasun kulutuksen historiaan perustuen kattolämmittimiin sekä tohoihin kohdistui 8 % koko vuoden kulutuksesta.

Energiatehokkuuden vertailussa propaanikaasukilogrammat täytyi muuntaa kilowattitunneiksi. Propaanikaasukilogramma sisältää 12,861 kWh energiaa (Linde, i-a.-a). Aikavälillä 1.1.2023–29.2.2024 käytetyn kaasun kokonaismäärä Z muunnettiin kaavalla (1), kilowattitunneiksi kertomalla se luvulla 12,861. Aikavälillä käytetyistä kaasukilogrammoista saatiin X kWh, josta miinustettiin vielä kaavan (2), mukaan kaasun kulutuksen historian perusteella 8 % kattolämmittimiin sekä tohoihin. Tulokseksi saatiin kaasusulatusuunin käyttämät kilowattitunnit C aikavälillä 1.1.2023–29.2.2024.

$$Z \times 12,861 = X \tag{1}$$

$$X \times 0.92 = C$$

(2)

Missä

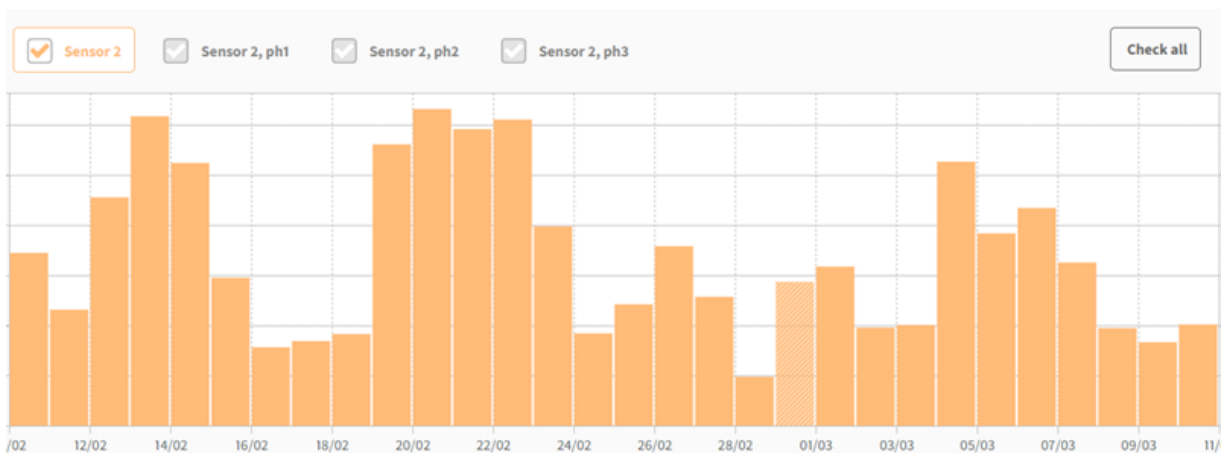
Z on käytetyn kaasun kokonaismäärä / kg

X on kaasukilojen muunnos kWh

C on aikavälillä käytetyt kWh

Uuden prosessin sähkösulatusuunien energiatehokkuutta tutkittiin sähkönkulutuksen seurannalla uunista. Yhteen sähkösulatusuuniin asennettiin etäluettava sähkönkulutusmittari, jolla kulutusta seurattiin kuukauden ajan 10.2.–10.3.2024. Sähkönkulutuksen seurannan aloitus ajoitettiin siten, että mittausaika vastaisi mahdollisimman hyvin normaalin kuukauden tuotannon kuormaa.

Sähkönkulutuksen mittaus onnistui suunnitellusti, eikä ajanjaksolle osunut mitään tuotantoa keskeyttävää. Mittauksen tulokset vastaavat siis todellisuutta sekä ovat luotettavia. Sähkönkulutuksen seurannasta saatiin suoraan uunin käyttämät kWh kuvion 1 mukaan. Sulatetut alumiinikilot saatiin sähkösulatusuunille tuotannon ohjausjärjestelmän kautta samalta aikaväliltä.



Kuvio 1. Sähkönkulutuksen seuranta sähkösulatusuunissa (T.Seppälä).

Kaasusulatusuunin ja sähkösulatusuunin energiankulutuksen tutkimisen, seurannan ja laskelmien perusteella pystyttiin vertailemaan investoinnin vaikutusta alumiinin sulattamisen energiatehokkuuteen. Sulatukseen käytetty energiamäärä jaetaan sulatetuilla alumiinikilogrammoilla kaavassa (3), jolloin saadaan tulokseksi se, paljonko energiaa on käytetty yhden alumiinikilon sulattamiseen. Taloudellinen vaikutus investoinnille lasketaan kaavalla (4), kun tiedetään hinta kilowattituntia kohden.

$$C \div V = B \quad (3)$$

$$B \times E = N \text{ (€/kg Al)} \quad (4)$$

Missä

C on käytetyt kWh sulatukseen

V on sulatetut alumiinikilot

B on kWh/kg Al

E on hinta per/kWh (sis. alv, siirtomaksut jne)

N on €/kg Al

Vanhan ja uuden alumiinin sulattamisen taloudellinen ero esitetään tutkimuksessa prosentteina. Taulukossa 1 on esitetty investoinnin vaikutus energiatehokkuuden kehitykseen vanhan ja uuden prosessin välillä.

Prosessi	Energia	Käytetyt kWh	Sulatetut kg Al	kWh/kg Al	€/kg Al	Erotus %
Vanha	Kaasu	C	V	B	N	0 %
Uusi	Sähkö	C x 2	V	B	N	-69 %

Taulukko 1. Investoinnin taloudellinen vaikutus energiatehokkuuden kehitykseen (T. Seppälä).

7.2 Alumiinin kaasuhuhtelun ja pudistuksen kehitys

Investointien vaikutusta alumiinisulan kaasupitoisuuden kehitykseen tutkittiin testaamalla alumiinisulan tiheysindeksiä. Testaukseen käytettiin Mk Industrievertretungenin 3VT LC DT ja MK 2210 LC mittauslaitteita (Mk-gmbh, 2014). Alumiinisulan kaasupitoisuus laskeetaan alumiinisulanäytteiden tiheysindeksin avulla kaavasta (5) (Alteams, sisäinen tietolähde, 2023):

$$DI = (dA - d80) \div dA \times 100\% \quad (5)$$

Missä

DI on kaasupitoisuus %

dA on normaalissa ilmanpaineessa jähmettynyt alumiinisula näyte

d80 on tyhjiössä jähmettynyt alumiinisula näyte

Ensimmäinen alumiinisulanäyte laitetaan kaasunmittauslaitteeseen, jossa se jähmettyy testin mukaan vakioidussa alipaineessa eli tyhjiössä (Campbell, 2011, luku 2.7, s. 19–21; Milne ym., 2003, s. 419–421; MK-gmbh, 2024; MK-gmbh, sisäinen tietolähde, 2014). Toinen alumiinisulanäyte annetaan jähmettyä normaalissa ilmanpaineessa.

Kaasupitoisuuden alipainetestit erotetaan kolmeen testiin (Milne ym., 2003, s. 419–421; MK-gmbh, 2024; MK-gmbh, sisäinen tietolähde, 2014):

1. Density Index testi, käytetään 80 mbar alipainetta
2. Straube-Pfeiffe testi, käytetään 30 mbar alipainetta
3. Dross testi, käytetään 5 mbar alipainetta

Alumiinisulan kaasupitoisuuden näytteet on otettu vanhassa prosessissa matalapainevalu-koneen lämpimänäpituunista täytön jälkeen. Investointien vaikutusta tutkittaessa näytteet

otettiin uuden prosessin lämpimänäpituunista alumiinisulan kaasuhuuhtelun ja puhdistuksen jälkeen. Molempien prosessien näytteiden tutkimisessa käytettiin Density Index testin 80 mbar alipainetta.

Vanhan prosessin kaasupitoisuuden mittaustulokset haettiin sisäisestä dokumentoinnista, joita verrattiin uuden prosessin mittaustuloksiin. Vanhasta prosessista otettiin vertailuun viimeiset 208 tulosta Borli MK.167 lämpimänäpituunista. Sisäisen dokumentoinnin 208 testituloksen perusteella vanhan prosessin alumiinisulan kaasupitoisuuden keskiarvoksi lämpimänäpituunissa saatiin DI% Borli.

Kaasupitoisuuden tuloksia Borli MK.167 lämpimänäpituunissa tutkimuksen aikana tukevat vanhan prosessin vaatimat toimintatavat ja haasteet. Kaasusulatusuunin alumiinisulan korkeampi lämpötila nostaa kaasupitoisuutta sitomalla vetykaasuja itseensä enemmän, kun lämpötila nousee yli 760°C (Tiryakioğlu, 2020, s. 2–3; Fruehan & Anyalebechi, 2008, s. 5). Borli Mk.167 lämpimänäpituunissa alumiinisulan lämpötila on vaihdellut mittaustuloksien välillä huomattavasti, mikä tukee kaasupitoisuuden tuloksia. Borli Mk.167 lämpimänäpituunin alumiinisulan lämpötilan keskiarvo oli kaasupitoisuuden mittaustuloksissa 763°C.

Alumiinisulan puutteellinen kaasuhuuhtelu ja puhdistus vaikuttavat suoranaisesti alumiinisulan kaasupitoisuuteen. Kaasuhuuhtelussa suositellaan käytettäväksi vähintään 4.6 laatuluokan tyyppiä takaamaan käsittelyn tehokkuus (Vesuvius, sisäinen tietolähde, 2024). Vanhassa prosessissa käytössä oli kuitenkin 2.5 laatuluokan tyyppi, joka on 10 kertaa epäpuhtaampaa kuin suositeltu laatuluokka (Linde i.a.-c).

Alumiinisulan kaasuhuuhtelussa roottorin lavan tulisi laskeutua kaasuhuuhdeltavassa uunissa uunin pohjasta noin 150 mm päähän (Vesuvius, sisäinen tietolähde, 2024). Vanhassa prosessissa kaasuhuuhtelulaitteen puutteellisen korkeudensäädön vuoksi roottori pystytään ajamaan noin 500 mm päähän upokkaan pohjasta, joka ei ole optimaalista kaasuhuuhtelun onnistumiselle. Kaasuhuuhtelua ei saada tämän vuoksi reagoimaan alumiinisulaan uunin pohjalta asti, jolloin kaasuhuuhtelu joudutaan toistamaan kolmesti jokaiselle uunilliselle. Prosessin puutteellisuus näkyy kaasupitoisuuden tuloksissa Borli MK.167 lämpimänäpituunissa.

Fluksin annostelu suoraan alumiinisulan pinnalle sekä automaattisen lavan puuttuminen ovat myös merkittävä puute alumiinisulan puhdistuksessa. Kaasusulatusuunin alumiinisulaa ei saada näin puhdistettua prosessin vaatimalla tavalla upokkaan pohjalta asti. Puutteellinen alumiinisulan puhdistus nostaa epäpuhtauksia ja kaasupitoisuutta sulassa.

Alumiinisulan siirtomatka kaasusulatusuunista Borli MK.167 lämpimänäpituuniin on noin neljä metriä. Alumiinisula jäähtyy, loiskuu ja kuohuu siirtomatalla keraamisessa rännissä sekä reagoi ilmankosteuden kanssa, mikä nostaa kaasupitoisuutta ja epäpuhtauksia alumiinisulassa. Lämpimänäpituunin täytön yhteydessä alumiinisulan siirtäminen, loiskuminen sekä kuohuminen ovat merkittäviä haasteita prosessissa (Campbell, 2015, s. 844).

Vanhan prosessin alumiinisulan kaasuhuuhtelu ja puhdistus ennen täyttöä Borli MK.167 lämpimänäpituuniin on puutteellista matalapainevaluprosessille. Kaasuhuuhtelun ja puhdistuksen puutteet tukevat tutkimuksen kaasupitoisuuden tuloksia Borli MK.167 lämpimänäpituunissa. Alumiinisulan kaasuhuuhtelu ja puhdistus ovat merkittäviä työvaiheita matalapainevaluprosessin onnistumiselle (Campbell, 2015, s. 844–845).

Uuden prosessin kaasupitoisuudelle asetettiin tavoite yhteistyössä kaasuhuuhtelulaitteen ja fluksin toimittajan kanssa. Kaasuhuuhtelulaitteen toimittaja teki syksyllä 2023 valmistelevia simulaatioita pohjautuen Alteamsin antamiin tietoihin käytettävästä materiaaliseoksesta, käsiteltävän alumiinisulan lämpötilasta, uuden lämpimänäpituunin upokkaan kapasiteetista ja halutusta kaasupitoisuusarvosta. Kaasupitoisuus haluttiin saada uudessa prosessissa $DI\% \text{ Kurtz Ersa} \leq DI\% \text{max}$.

Uudesta prosessista otettiin vertailuun viimeisimmät 53 alumiinisulanäytettä, jotka olivat ajalta 12.1.–28.3.2024. Alumiinisulanäytteitä oli otettu molemmista uuden prosessin lämpimänäpituuneista kaasuhuuhtelun ja puhdistuksen jälkeen. Näytteet testattiin MK 2210 LC tiheysindeksin mittauslaitteella laitteen manuaalin ohjeistuksen mukaan, joka laskee automaattisesti alumiinin alumiininäytteiden tiheyksien perusteella tiheysindeksin (MK-gmbh, sisäinen tietolähde, 2014):

1. Aukaise suojakansi laitteesta ja ota vaa'an päällä olevan vesiastian kansi pois.
2. Ota vaa'an päällä oleva vesiastia ja täytä se vedellä niin, että veden pinta jää noin yhden senttimetrin päähän astian yläreunasta.

3. Aseta täytetty vesiastia takaisin vaa'an päälle, laita vesiastian kansi takaisin paikoilleensa ja paina MK 2210 LC laitteen käynnistysnappia.
4. Aseta ensimmäisenä alipaineessa jähmettynyt alumiinisulanäyte vesiastian kannen päälle ja paina MK 2210 LC laitteen oikeanpuoleisinta nappia. Laite punnitsee näytteen.
5. Aseta seuraavaksi ensimmäinen näyte vesiastian kannen sisällä olevaan pidikkeeseen ja laske näyte veteen. Varmista, että näyte on kokonaan veden alla.
6. Paina MK 2210 LC laitteen oikeanpuoleista nappia, jolloin vaaka punnitsee näytteen vedessä ja laskee automaattisesti tiheyden näytteestä.
7. Ota näyte pois vesiastian kannen pidikkeestä ja aseta vesiastian kansi takaisin paikoilleensa.
8. Paina MK 2210 LC laitteen keskimmäistä nappia.
9. Toista kohdat 4–6 toiselle näytteelle, joka on jähmettynyt normaalissa ilmanpaineessa. Vaaka laskee automaattisesti tiheysindeksin, kun molemmat näytteet on punnittu ilmassa sekä vedessä.

Uuden prosessin alumiinisulan kaasupitoisuuden keskiarvoksi lämpimänäpituunissa saatiin 53 tutkitun alumiinisulanäytteen perusteella DI% Kurtz Ersa. Kaasupitoisuuden tuloksia Kurtz Ersa AL 13-13 SC lämpimänäpituunissa tutkimuksessa tukevat uuden prosessin toiminta- ja prosessivaiheiden muutokset.

Kaasupitoisuuden tuloksia uudessa prosessissa tukevat useat investoinnin tuomat kehitykset prosessiin. Sähkösulatusuuneissa alumiinisulan lämpötilaa ei tarvitse nostaa niin korkeaksi kuin kaasusulatusuunissa. Tutkimuksen aikana alumiinisulan lämpötila sähkösulatusuuneissa vaihteli 710–740°C välillä. Alumiinisulan alhaisempi lämpötila sitoo vähemmän vetykaasuja, jolloin alumiinisulan kaasupitoisuus pysyy alhaisempana prosessin alusta lähtien.

Alumiinisulan täyttö sähkösulatusuuneista lämpimänäpituuniin ennen kaasuhuuhtelua ja puhdistusta on yksi uuden prosessin toimintamuutos. Alumiinisulan siirtomatka sähkösulatusuuneista uuteen lämpimänäpituuniin minimoitiin hyvällä suunnittelulla ja toteutuksella.

Lyhyen siirtomatkan ansiosta alumiinisulan lämpötila ei ehdi laskemaan täytön aikana, jolloin sen ei tarvitse olla sähkösulatusuuneissa niin korkea ennen täyttöä.

Uuden prosessin hyvällä suunnittelulla ja toteutuksella optimoitiin alumiinisulan täytön kulma, jolla vähennettiin vanhan prosessin täyttömatkalla tapahtuvaa loiskumista sekä kuohumista alumiinisulalla. Lämpimänäpituunin täyttö ennen kaasuhuuhtelua ja puhdistusta, alumiinisulan lämpötilan laskeminen, siirtomatkan minimointi, täytön kulman optimointi, loiskumisen sekä kuohumisen vähentäminen tukevat uuden prosessin laadukkuutta. Edellä mainitut asiat ovat tärkeitä prosessin laadukkaalle onnistumiselle (Campbell, 2015, s. 844–845).

Alumiinisulan kaasuhuuhtelun ja puhdistuksen kehitykset tukevat tutkimuksen kaasupitoisuuden tuloksia. Uusi kaasuhuuhtelulaite ja sen monet automaattiset ominaisuudet sekä teknologiset parannukset takaavat laadukkaan kaasuhuuhtelun yhdellä viiden minuutin käsitteilykerralla. Alumiinisulan lämpötilan hallinta, älykäs kaasuhuuhtelun parametrien optimointi, roottorin optimaalinen korkeus, 5.0 laatuluokan tyyppi, uusi fluksi ja sen automaattinen annostelija sekä pyörteen rauhoittava automaattinen lapa. Näiden ominaisuuksien avulla kaasupitoisuus ja epäpuhtaudet saadaan poistettua tehokkaasti alumiinisulasta.

Kaasuhuuhtelu ja puhdistus ovat tärkeitä prosessin laadukkaaseen onnistumiseen vaikuttavia asioita (Campbell, 2015, s.844–845). Uudessa prosessissa hänen mainitsemat asiat on huomioitu selvästi. Vanhan ja uuden prosessin kaasupitoisuuden ero lämpimänäpituuneissa sekä asetetun kaasupitoisuustavoitteen onnistuminen uudelle prosessille on esitetty taulukossa 2.

Prosessi	Kaasu %	Kaasu % tavoite	Toteutuiko tavoite %	Erotus
Vanha	DI% Borli	-	-	0 %
Uusi	DI% Kurtz Ersa	DI% Kurtz Ersa ≤ DI%max	Kyllä	-95 %

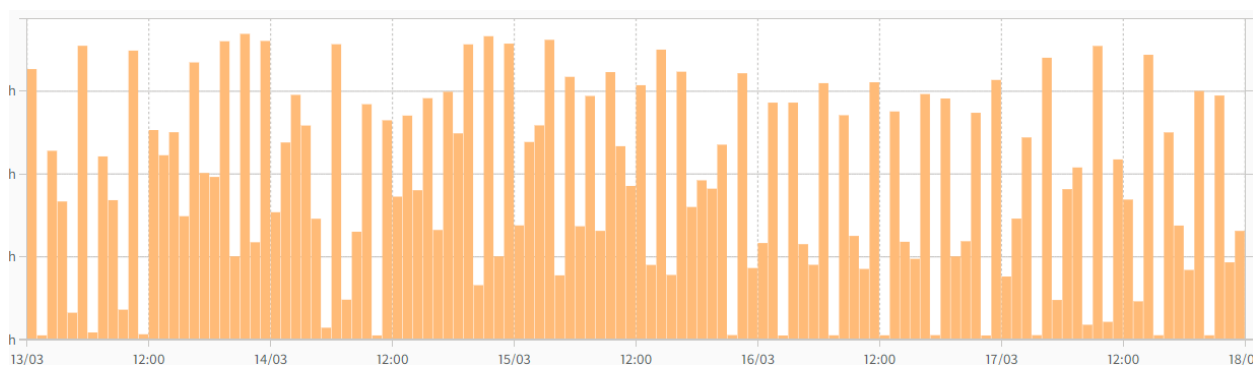
Taulukko 2. Kaasupitoisuudet vanhan ja uuden prosessien lämpimänäpituuneissa (T. Seppälä).

7.3 Lämpimänäpituunin ja täytön kehitys

Investointien vaikutusta alumiinisulan lämpimänäpitoon sekä täyttämiseen tutkittiin energiankulutuksen seurannalla, vertailemalla sulatusuunien käyttöastetta ja lämpimänäpituunien täyttöastetta. Investoimalla kahteen upokkaalla varustettuun lämpimänäpituuniin saatiin nostettua koko prosessin tehokkuutta sekä joustavuutta.

Vanhan lämpimänäpituunin energiatehokkuutta tutkittiin sähkönkulutuksen seurannalla. Lämpimänäpituuniin asennettiin myös etäluettava sähkönkulutusmittari, jolla seurattiin kulutusta 13.–17.3.2024. Sähkönkulutuksen mittausaika ajoitettiin siten, että mittaukseen saatiin normaalia tuotannon kuormaa viikolta, sekä viikonlopulta pelkästään alumiinisulan lämpimänäpidosta.

Sähkönmittaus onnistui suunnitellusti, eikä aikana ollut tuotannon katkoksia. Mittaustulokset vastaavat siis hyvin todellisuutta. Mittausaika olisi voinut olla pidempi, mutta mittauksen seurannan perusteella uunin lämmityskäyrä käyttäytyi toistuvasti samankaltaisesti. Tämän perusteella mittaus keskeytettiin. 13.–17.3.2024 mittausajan energiankulutus on esitetty kuviossa 2.



Kuvio 2. Vanhan lämpimänäpituunin energiankulutus (T. Seppälä).

Energiankulutuksen käyrästä pystyy näkemään toistuvan korkean energiapiikin, jonka jälkeen lämpimänäpituunin energiankulutus tippuu lähelle nollaa (kuvio 2). Viikonpäivinä 13.–15.3. tuotannon pyöriessä lämpimänäpituuni on käytössä toisin kuin viikonloppuna 16.–17.3, ja tämä näkyy hyvin energiankulutuksen käyrästä kuviossa 2.

Kuvion 2 energiankulutuksen käyrästä pystytään tulkitsemaan myös, että vanha lämpimänäpituuni tarvitsee hetkellisesti täyden tehon alumiinisulan pyyntilämmön säilyttämiseksi. Suurta energian tarvetta selittävät hyvin seuraavat kolme asiaa vanhassa prosessissa:

1. Alumiinisulan jäähtyminen täytön yhteydessä
2. Lämpimänäpituunin vastuksien teho ja sijainti uunin katossa
3. Lämpimänäpituunin täytön yhteydessä auki oleva uunin täyttöluukku

Alumiinisula jäähtyy lämpimänäpituunin täytön yhteydessä, kun se matkaa keraamista ränniä pitkin yli 4 metriä sulatusuunista lämpimänäpituuniin. Lämmitysvastuksien suhteellisen pieni teho lämpimänäpituunin kapasiteettiin nähden sekä teknisesti huono sijoittaminen uunin kattoon ei edesauta yhtään tapausta. Täyttöluukun auki oleminen lämpimänäpituunin täytön yhteydessä on välttämätöntä, mutta sen kautta myös hukataan lämpöä uunin sisältä.

Tutkimuksen aikana huomattiin, että vanhan lämpimänäpituunin täyttäminen on todella hektinen prosessivaihe. Valukoneen käyttäjän sekä sulattajan täytyy toimia saumattomasti ja ripeästi yhdessä, että alumiinisula pysyisi riittävän lämpimänä täytön aikana. Vanhassa lämpimänäpituunissa alumiinisulan lämpötilat vaihtelivat $730\pm 20^{\circ}\text{C}$ täytön aikana.

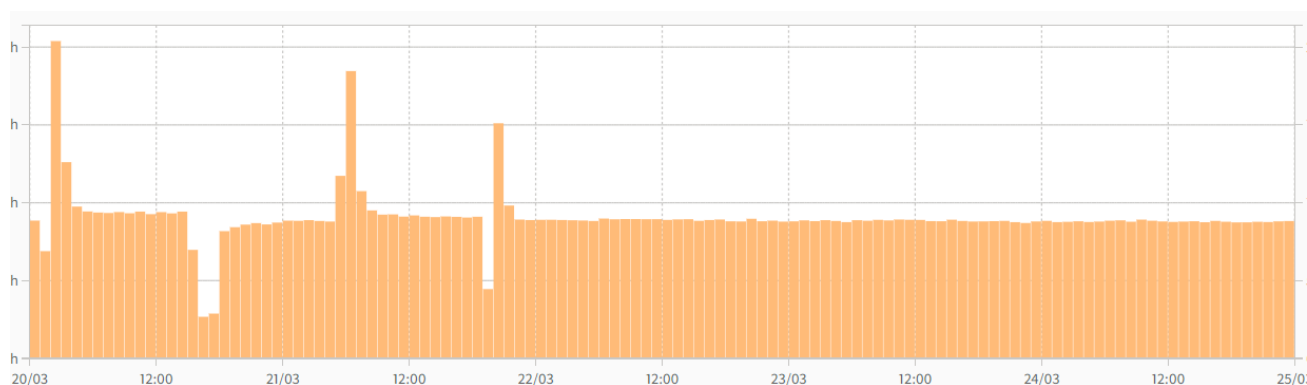
Vanhassa lämpimänäpituunissa pyyntilämpötila on $740\pm 5^{\circ}\text{C}$, joka tutkimuksen aikana selvensi kaasusulatusuunissa pidettävää korkeampaa alumiinisulan lämpötilaa. Alumiinisulan on oltava sulatusuunista kaadettaessa korkeampiasteista, koska prosessin aikana se jäähtyy matkalla ränniä pitkin lämpimänäpituuniin. Tutkimuksen aikana kaasusulatusuunin alumiinisulan lämpötila vaihteli $760\pm 10^{\circ}\text{C}$ välillä.

Vanhan lämpimänäpituuniin täyttömäärä on yleisesti noin 600 kg kerrallaan, joka on 60 % kaasusulatusuunin upokkaan kapasiteetista. Sulatusuunin upokkaan pohjalle jää vielä alumiinisulaa, joka helpottaa paljon primääriharkkojen sekä kiertometallin uudelleen täyttämistä sulatusuuniin. Kyseinen täyttömäärä ei ole optimaalinen, koska upokkaan pohjalle riittäisi 25 % maksimikapasiteetista alumiinisulaa nopeuttamaan sulatusprosessia. Vähäisempi alumiinisulan määrä sulatusuunissa vaikeuttaa

primääriharkkojen ja kiertometallin täyttämistä syvään upokkaaseen, tämän työntekijät pystyivät tutkimuksen aikana näyttämään konkreettisesti.

Uuden lämpimänäpituunin energiatehokkuutta tutkittiin samalla tavalla sähkönkulutuksen seurannalla. Lämpimänäpituuniin asennettiin sama etäluettava sähkönkulutusmittari. Uudesta lämpimänäpituunista kulutusta seurattiin samanlainen aikaväli kuin vanhemmasta lämpimänäpituunistakin. Sähkönkulutuksen seurannan aikaväli oli 20.–24.3.2024, johon kuului normaalia kuormaa tuotannosta ja viikonlopun ajalta pelkästä alumiinisulan lämpimänäpidosta.

Sähkönkulutuksen mittaus onnistui hyvin, eikä aikavälillä ollut tuotannon katkoksia. Saatuja tuloksia voidaan siis verrata vanhan lämpimänäpituunin tuloksiin. Sähkönkulutuksen seurannan mittausaika olisi voinut olla pidempi tässäkin tapauksessa, mutta seurannasta pystyttiin selvästi näkemään tuloksien eroavaisuudet ja mittaus keskeytettiin. 20.–24.3.2024 mittauksen energiankulutus on esitetty kuviossa 3.



Kuvio 3. Uuden lämpimänäpituunin energiankulutus (T. Seppälä).

Energiankulutuksen käyrästä (kuvio 3) pystytään näkemään selvä ero uuden ja vanhan lämpimänäpituunin välillä. Uuden lämpimänäpituunin energiankulutus on todella tasaista, käyrässä ei ole nähtävissä samanlaista sahausta ylös alas kuin taas vanhassa lämpimänäpituunissa kuviossa 2. Mittausajan energiankulutuksen piikit ja laskut olivat tutkimuksessa hetkiä, kun tuotannossa lämpimänäpituunin kansi irrotettiin uunin täytön ja sulan puhdistuksen ajaksi.

Kuvion 3 energiankulutuksen käyrästä voidaan tulkita, että uusi lämpimänäpituuni pysyy pitämään alumiinisulan pyyntilämpötilassa huomattavasti tasaisemmalla energiankulutuksella verrattuna vanhaan lämpimänäpituuniin. Selvästi tasaisempaan ja parempaan energiatehokkuuteen löydettiin tutkimuksessa useita syitä:

1. Alumiinisulan lämmönvaihtelun minimointi täytön yhteydessä
2. Lämmityselementtien sijoittelu ja lämmönvaraus
3. Uuden lämpimänäpituunin teho

Investoinnissa rakennettiin kokonaan uusi alumiinin sulatusalue prosessille, jossa otettiin huomioon kaikki vanhan prosessin haasteet. Sulatusalueen suunnittelussa huomion keskipisteenä oli olennaisesti uusien lämpimänäpituunien täyttäminen. Uudessa sulatusalueessa lämpimänäpituuni lasketaan 900 mm syvään täyttöasemaan, joka sijaitsee kahden sähkösulatusuunin keskellä. Lämpimänäpituunin laskeminen täyttöasemaan mahdollisti sen, että lämpimänäpituunista jäi lattiapinnan yläpuolelle vain 430 mm.

Täyttöaseman upottaminen mahdollisti, ettei sähkösulatusuuneja tarvinnut nostaa lattiapinnasta ylöspäin vaan ne saatiin kiinnittää suoraan betonilattiaan. Lämpimänäpituunin laskeminen 900 mm lattiapinnan alapuolelle mahdollisti sähkösulatusuunien sijoittamisen mahdollisimman lähelle täyttöaseman reunoja. Sähkösulatusuunien sijoitus mahdollisimman lähelle asemaa mahdollisti optimaalisen kulman alumiinisulan täyttöön sekä vain yhden metrin mittaisen rännin käyttämisen.

Alumiinisulan optimaalinen täyttökulma, sekä lyhyt ränni mahdollisti lämpimänäpituunin täyttämisen reippaasti paljon pienemmillä alumiinisulan lämpötilanvaihteluilla. Sähkösulatusuuneissa alumiinisulan lämpötila ei tarvinnut olla lämpimänäpituunin pyyntilämpötilaa $725\pm 5^{\circ}\text{C}$ paljoa suurempi, koska se ei ehtinyt jäähtymään täytön aikana samoin kuin vanhassa prosessissa. Sähkösulatusuuneissa alumiinisulan lämpötila oli tutkimuksen aikana $730\pm 10^{\circ}\text{C}$, ja tämä on monta kymmentä astetta vähemmän kuin vanhan prosessin kaasusulatusuunissa.

Uusi sulatusalue osoittautui tutkimuksen aikana todellakin toimivaksi ja hyvin suunnitelluksi. Sulatusalueen suunnittelussa pystyttiin erinomaisesti kitkemään vanhan prosessin

haasteita, parantamaan lämpimänäpituunin käsittelyä, nostamaan työturvallisuutta ja poistamaan vanhan prosessin hektisyys sekä irrottamaan vanhan prosessin vaatima toinen työntekijä kokonaan pois. Sulattaja pystyy operoimaan lämpimänäpituunin täytön itsenäisesti uudella sulatusalueella.

Energiankulutuksen mittauksessa (kuvio 3) eroa uuden lämpimänäpituunin eduksi tukevat tekniset rakenteet lämpimänäpituunissa. Uudessa lämpimänäpituunissa sähkölämmityselementit kiertävät lämmitettävän upokkaan ympärillä, jolloin upokas lämpiää tasaisesti sekä tehokkaasti (Blazer, sisäinen tietolähde, 2023a). Uuden lämpimänäpituunin 60kW teho suhteessa uunin upokkaan kapasiteettiin on myös parempi verrattuna vanhaan lämpimänäpituunin tehoon ja kapasiteettiin.

Uuden lämpimänäpituunin energiatehokkuutta on parannettu lämmityselementtien jokaiseen väliin asennetulla lämpöenergiaa varastoivalla levyllä (Blazer, sisäinen tietolähde, 2023a). Valmistaja ilmoittaa 12:n lämpöenergiaa varastoivan levyn yhteistehoksi 30kW. Uuden lämpimänäpituunin kokonaisteho on näin 90kW, joka koostuu 60kW lämmitystehosta ja 30kW varastoidusta lämmitysenergiasta. Lämpöenergiaa varastoitavista ja luovuttavista levyistä saadaan huomattavaa apua tasaamaan lämpimänäpituunin energiankulutusta sekä lämpötilavaihteluita täyttöjen yhteydessä.

Uuden lämpimänäpituunin täytön ja käytettävän alumiinisulan suhde osoittautui myös tutkimuksessa paremmaksi kuin vanhan lämpimänäpituunin. Uuden lämpimänäpituunin kapasiteetti on 1100 kg ja vanhan lämpimänäpituunin 1450 kg (Blazer, sisäinen tietolähde, 2023b; Borli, sisäinen tietolähde, 2007a). Uuden lämpimänäpituunin täyttömäärä on jokaisella kerralla 800 kg, kun taas vanhassa uunissa täyttömäärä oli noin 600 kg. Uuden lämpimänäpituunin täytösuhde on kapasiteettiinsa nähden 72,5 %, kun taas vanhan lämpimänäpituuniin 41,5 %.

Uuden lämpimänäpituunin täyttöön käytetään molempia uuden sulatusalueen sähkösulatusuuneja. Sulatusalueen molemmissa sähkösulatusuuneissa on 587 kg kapasiteetin upokkaat (Nabertherm, 2023, s. 11). Uuden lämpimänäpituunin 800 kg alumiinisulan täyttömäärä tarkoittaa, että molemmista sähkösulatusuuneista tarvitaan 400 kg

alumiinisulaa. Sähkösulatusuunien upokkaiden kapasiteetin käyttöaste on myös parempi kuin vanhan prosessin kaasusulatusuunissa.

Vanhan prosessin kaasusulatusuunin upokkaan kapasiteetista täytössä pääsääntöisesti käytettiin vain 54,5 %, kun taas uuden sulatusalueen sähkösulatusuunien upokkaiden kapasiteetistä käytetään aina 69 %. Uuden sulatusalueen sähkösulatusuuneissakin upokkaan pohjalle jää suuremmasta kapasiteetin käytöstä huolimatta juuri oikea määrä alumiinisulaa helpottamaan primääriharkkojen sekä kiertometallin uudelleen täyttämistä ja sulattamista. Alumiinisulan lämpimänäpidon ja täytön tutkimustulokset ovat esitetty taulukossa 3.

Sähkösulatusuunien optimaalinen käyttösuhte ja uuden lämpimänäpituunin täyttöön tarvittava alumiinisulan määrä otettiin myös alueen suunnittelussa hyvin huomioon ja sen toimivuus pystyttiin toteamaan tutkimuksen aikana tuotannossa useasti. Tutkimuksen aikana esille nousi myös hyvä kysymys: Miksi alueelle ei investoitu yhtä suurta sähkösulatusuunia kahden sijaan?

Vastaus oli helposti perusteltavissa, koska yksi erilainen sulatusuuni on huomattavasti haavoittuvaisempi erillisessä sulatusalueessa kuin kaksi samanlaista sulatusuunia. Kaksi sulatusuunia tuo varmuutta tuotannon pyörimiseen, koska on hyvin epätodennäköistä, että molempiin sulatusuuneihin tulisi tekninen vika samanaikaisesti. Kahden sulatusuunin investointia alueelle tuki myös se, että samanlaisia sähkösulatusuuneja on tuotannossa käytössä uusien lisäksi jo viisi kappaletta. Tämäkin vahvisti edelleen edellä mainittuja huollon sekä toiminnan käynnissä pitämistä tuotannossa.

Prosessi	Sulatusuuni/kg	Käyttöaste	Lämpötila	Lämp. lasku
Vanha	1100	54,5 %	760±10°C	0 %
Uusi	1156	69,0 %	730±10°C	-4 %
Prosessi	Lämp.pito uuni/kg	Täyttösuhde	Lämpötila	Lämp. lasku
Vanha	1450	41,5 %	740±10°C	0 %
Uusi	1100	72,5 %	725±5°C	-2 %
Prosessi	Lämp.pito teho/kW	Käytetyt kWh	Mittausaika	Erotus €/%
Vanha	40	C	13-17.3.2024	0 %
Uusi	60-90	C	20-24.3.2024	-58 %

Taulukko 3. Alumiinisulan lämpimänäpidon ja täytön tutkimustulosten vertailu (T. Sepälä).

7.4 Valamisen kehitys

Investointien vaikutuksia matalapainevalukappaleiden valmistuksen kehitykseen uudessa prosessissa tutkittiin kokonaisuutena. Valamisen kehitykseen vaikuttavat mm. alumiinin sulatus, lämpimänäpituunin täyttö, alumiinisulan laadukas käsittely, lämpötilojen hallinta sekä lämpimänäpituunin esipaineistus, alumiinisulan pinnankorkeuden vaihtelut, ilmanpaineen käyttäminen ja hallinta, alumiinisulan lämmön johtuminen sekä matalapainevalukoneen parametrien määrittäminen valumuotin täyttämiseen. Investoinnissa huomioitiin kokonaisuudessa tehokkaan prosessin toiminnan edellyttävät tarpeet unohtamatta laadukkuutta sekä joustavuutta.

Alumiinin sulatuksen energiatehokkuus ja varmuus on investointien kautta luonut vakaan pohjan valamisen kehitykselle uudessa prosessissa. Uuden prosessin lämpimänäpituunien täytön joustavuuden kehityksellä on nostettu uuden prosessin valamisen tehokkuutta. Alumiinisulan laadukas kaasuhuuhtelu, puhdistus ja prosessin lämpötilojen hallinta uudessa prosessissa tukevat valamisen laadun kehitystä.

Vanhan prosessin Borli MK.167 matalapainevalukoneessa ei ole esipaineistusta, joka on yksi prosessin hallinnan haasteista (Campbell, 2015, s. 844–845). Esipaineistuksen

puuttuessa vanhan prosessin matalapainevalukoneessa alumiinisulan pinta laskee samassa suhteessa nousuputken sisällä, kuin matalapainevalukoneen lämpimänäpituunissa. Alumiinisulan pinnan lasku nousuputkessa tarkoittaa, että menetetty korkeus täytyy korvata paineen nostamisella itse matalapainevaluprosessissa.

Vanhassa prosessissa alumiinisulan korkeuden määrittäminen matalapainevalukoneen lämpimänäpituunissa on todella haastavaa, koska esipaineistusta ei ole käytettävissä siihen. Alumiinisulan pinnankorkeuden määrittäminen tehdään silmämääräisesti lämpimänäpituunin täytön yhteydessä. Lämpimänäpituunin täyttäminen on yksi prosessin useista haasteista (Campbell, 2015, s. 844–845). Lämpimänäpituunin täytön jälkeen matalapainevalukoneelle kerrotaan lämpimänäpituunin olevan täynnä.

Vanhassa matalapainevalukoneessa oletuksena on, että lämpimänäpituuni on täytetty aina samalle korkeudelle. Matalapainevalukone laskee asetettujen lämpimänäpituunin parametrien mukaan tarvittavan paineen nousun lisäyksen jokaisen valukierron jälkeen.

Vanhan matalapainevalukoneen lämpimänäpituunin täyttöjen yhteydessä huomattiin, ettei alumiinisulan pinta tule aina samalle korkeudelle. Alumiinisulan pinnankorkeuteen lämpimänäpituunissa vaikutti olennaisesti se, kuinka paljon alumiinisulaa täytön yhteydessä kaadettiin lämpimänäpituuniin sekä kuinka hyvin sulattaja ja valaja pystyivät arvioimaan alumiinisulan pinnankorkeuden lämpimänäpituunin täyttöluukun suulla. Tutkimuksen aikana huomattiin, että alumiinisulan pinnankorkeus vaihteli ± 0 –20 mm välillä vanhassa lämpimänäpituunissa.

Alumiinisulan pinnankorkeuden määrittämisen jälkeen matalapainevalukone tietää, mistä tasosta alumiinisulaa lähdetään nostamaan valukierron käynnistyessä. Alumiinisulan pinnankorkeuden määrittäminen sekä tiedostaminen lämpimänäpituunissa on perusedellytys valumuotin täyttämisen hallintaan sekä valuparametrien määrittämiselle.

Tarpeettoman suuren ilmanpaineen käyttäminen matalapainevaluprosessissa on myös prosessinhallinnan haaste (Campbell, 2015, s. 844–845). Suuren ilmanpaineen käyttämisen sekä esipaineistuksen puuttumisen yhteisvaikutuksesta alumiinisulan pinta laskee paljon ja nopeasti vanhan prosessin matalapainevalukoneen lämpimänäpituunissa valukierron päätyttyä. Vanhan prosessin matalapainevalukoneessa lämpimänäpituunin ollessa

melkein tyhjä alumiinisulan pinta laskee valukierron päätyttyä jopa B mm (Borli, sisäinen tietolähde, 2007a).

Seuraavan valukierron alkaessa alumiinisulan pinta nousee nousuputkea pitkin uudelleen muottiin, jonne on hyvin korkea matka. Suuren ilmanpaineen käytön, paineen nopean las-
kun ja alumiinisulan pinnankorkeuden suuret vaihtelut ovat matalapainevaluprosessin haasteita (Campbell, 2015, s. 844–845).

Uuden prosessin matalapainevalukoneen esipaineistuksella saadaan määritettyä tarkasti alumiinisulan pinnan lähtötaso, vältetään alumiinisulan pinnankorkeuden vaihtelut nousu-
putkessa sekä tarpeettoman suuren paineen käyttö, parannetaan valumuotin täyttämisen hallintaa sekä lyhennetään valun kiertoaikaa. Kurtz Ersä AI 13–13 SC matalapainevalu-
koneessa käytetään laitevalmistajan suosittamaa esipainetta, jolla alumiinisulan pinta va-
kioidaan K mm päähän nousuputken päästä (Kurtz Ersä, sisäinen tietolähde, 2023a s. 129–132; 2023g).

Uuden prosessin matalapainevalukoneessa alumiinisulan korkeuden määrittämiseen käy-
tään edellä mainittua esipaineistuksen ominaisuutta. Uuden matalapainevalukoneen läm-
pimänäpituunin esipaineistuksen määrittäminen tehdään aina jokaisen lämpimänäpituunin
vaihdon yhteydessä (Kurtz Ersä, sisäinen tietolähde, 2023a s. 129–132). Matalapainevalu-
koneen lämpimänäpituunin käsiohjaimesta nostetaan esipaineistuksen millibaareja sa-
malla tarkkaillen, kunnes alumiinisulan pinta saavuttaa nousuputken pään. Esipaineistuk-
sen määrittäminen nollataan, kun alumiinisulan pinta on nousuputken päässä, näin matalapaine-
valukone tietää yhden millibaarin tarkkuudella, missä alumiinisulan pinnantasoo on lämpi-
mänäpituunissa.

Asetettua esipainetta nostetaan ainoastaan lämpimänäpituunissa uudessa prosessissa
valukierron jälkeen (Kurtz Ersä, sisäinen tietolähde, 2023a s. 129–132). Tarvittavan esipai-
neen määrän uusi matalapainevalukone laskee asetettujen lämpimänäpituunin paramet-
rien mukaan. Esipaineistuksen vaikutus kasvaa uudella matalapainevalukoneella samassa
suhteessa, kuin alumiinisulan pinnantasoo laskee lämpimänäpituunissa valun aikana.

Uudella matalapainevalukoneella olisi täydellä lämpimänäpituunilla lähtötasossa eroa
vain K1 mm esipaineistuksen puuttuessa, mutta alarajalla eroa olisi K2 mm (Kurtz Ersä,

sisäinen tietolähde, 2023b, 2023g). Esipaineistuksella uudessa matalapainevalukoneessa vakioidaan alumiinisulan pinnankorkeus nousuputkessa sekä poistetaan nopeat paineen laskut prosessista, joilla ratkaistaan prosessin haasteita (Campbell, 2015, s. 844–845).

Tarpeettoman suuren ilmanpaineen käytön ja hallinnan haaste pystytään poistamaan esipaineistuksella uudessa matalapainevalukoneessa (Campbell, 2015, s. 844–845). Määritetty esipaine kompensoi automaattisesti itseään lämpimänäpituunissa alumiinisulan pinnantason laskiessa, jolloin alumiinisulan pinnantason lähtöpiste pysyy vakiona nousuputkessa. Ilmanpaineen kompensointia ei siis sisällytetä uudella matalapainevalukoneella valettavan kappaleen painekäyrään kompensoimaan alumiinisulan pinnantason muutosta lämpimänäpituunissa.

Vanhan prosessin matalapainevalukoneessa alumiinisulan lämmön johtumiseen valumuotin rakenteisiin on käytetty pääsääntöisesti paineilmaa tai vesisumua, jossa paineilma ja vesi sekoitetaan toisiinsa. Uuden prosessin matalapainevalukoneessa alumiinisulan lämmön johtumisen jäähdytykseen suositeltiin pelkästään veden käyttämistä jäähdytystä tarvittavissa paikoissa, koska se on huomattavasti tehokkaampi kuin sumu tai pelkkä paineilma. Alumiinisulan lämmön johtumisen hallinta on myös haaste matalapainevaluprosessissa (Campbell, 2015, s. 844–845).

Uuden matalapainevalukoneen jäähdytysjärjestelmässä on kaksi kertaa enemmän jäähdytyspiirejä kuin vanhassa matalapainevalukoneessa. Uuden matalapainevalukoneen jäähdytysvesijärjestelmässä pystytään käyttämään myös kaksi kertaa suurempaa veden painetta jäähdytykseen, mikä nostaa jäähdytyksen tehoa uuden prosessin matalapainevalukoneessa. Tehokkaalla ja oikea-aikaisella jäähdytyksellä matalapainevaluprosessissa saadaan alumiinisulan lämmön johtuminen hallittua matalapainevaluprosessissa sekä lyhennettyä valukappaleiden kiertoaikaa merkittävästi, jolla nostetaan prosessin tehokkuutta sekä kapasiteettiä.

Investointien kautta uuden prosessin matalapainevalukoneen toimittaja koulutti Alteamsin henkilökuntaa valumuotin täyttymisen laskentaan sekä paineen hallintaan muotin täyttymisen aikana. Valumuotin laskennan koulutuksesta saatiin tärkeää uutta praktista tietoa käyttöön asiantuntijoille. Koulutuksen jälkeen laskettuja parametrejä testattiin

matalapainevalukoneella, jolloin teoreettisten parametrien määrytyksien toimivuus pystyttiin toteamaan matalapainevalukoneella.

Uuden prosessin matalapainevalukoneella valumuotin täyttäminen pystytään hallitsemaan yhden millibaarin tarkkuudella. Matalapainevalukoneen toimittajan kouluttaja opetti, että alumiinisulan pinta on hyvä rauhoittaa juuri ennen valukappaleen täytön aloitusta muotin sisällä. Uuden matalapainevalukoneen paineenhallinnan tarkkuudella, opituilla valumuotin täyttämisen perusteilla sekä laskennalla pystytään määrittämään teknisesti vaativien valukappaleiden muottien täyttyminen niiden vaatimusten mukaisesti.

Uuden prosessin matalapainevalukoneen käyttöastetta sekä joustavuutta nostettiin merkittävästi investoimalla yhden lämpimänäpituunin sijasta kahteen. Yhdellä lämpimänäpituunilla prosessissa olisi jouduttu seisottamaan uutta matalapainevalukonetta sen aikaa, kun lämpimänäpituuni olisi täytetty, kaasuhuhdeltu, puhdistettu sekä siirretty takaisin matalapainevalukoneen alle.

Kahden lämpimänäpituunin investoinnilla uudelle matalapainevalukoneelle lyhennettiin odotusaikaa 66 %. Lämpimänäpituunin vaihtoja tulee keskimäärin kerran jokaisessa työvuorossa, joten toisen lämpimänäpituunin investoinnilla nostettiin matalapainevalukoneen käyttöaikaa vuorokaudessa 8 %.

Vanhan prosessin matalapainevalukoneen lämpimänäpituunin kapasiteetti on 32 % suurempi, kuin uuden prosessin matalapainevalukoneen lämpimänäpituunit. Vanhan prosessin matalapainevalukoneen käyttöaste on kuitenkin alhaisempi, koska uuden prosessin lämpimänäpituunien käyttösuhte kapasiteettiinsa nähden on 31 % parempi. Paremmalla käyttösuhteella pidennetään uuden prosessin matalapainevalukoneen yhtämittaista käyntiaikaa, jonka vaikutuksesta prosessin kapasiteettia saadaan nostettua.

Uuden prosessin matalapainevalukoneen esipaineistuksella, täyttämisen hallinnalla, tehokkaalla jäähdytyksellä ja alumiinisulan lämpötilan laskemisella on lyhennetty valukappaleiden kiertoaikoja. Investointien vaikutusta tutkittiin mittaamalla uuden sekä vanhan matalapainevalukoneen tuotteen 1 valamisen kiertoaikaa. Uudella matalapainevalukoneella mittaustulokseksi saatiin tuotteen 1 kiertoajaksi keskimäärin T2 sekuntia, jolloin tuotetta 1 pystytään valmistamaan P2 kappaletta tunnissa.

Vanhan prosessin matalapainevalukoneella valettaessa tuotetta 1 kiertoaajaksi saatiin mitauksissa keskimäärin T1 sekuntia, jolloin tuotetta 1 pystytään valmistamaan P1 kappaletta tunnissa. Kiertoaikojen mittaustuloksien perusteella (taulukko 4) uuden prosessin matalapainevalukoneella pystytään valmistamaan tuotetta 1 42 % lyhyemmällä kiertoaajalla kuin vanhan prosessin matalapainevalukoneella. Kiertoaikojen lyhentymisellä nostetaan uuden matalapainevalukoneen käytösuhdetta sekä kapasiteettia valmistaa sekä enemmän, että laadukkaampia valukappaleita verrattuna vanhan prosessin matalapainevalukoneeseen.

Prosessi	Valukappale	Kiertoaika / s	Kpl / tunnissa	Erotus %
Vanha	Tuote 1	T1	P1	0 %
Uusi	Tuote 1	T2	P2	-42 %

Taulukko 4. Tuotteen 1 kiertoaajat vanhalla ja uudella matalapainevalukoneella (T. Sepälä).

7.5 Valmistuskustannuksien muutos tuotteella 1

Investointien vaikutusta valettavan tuotteen 1 valmistuskustannuksien muutokseen käytettiin tutkimuksessa uudesta sekä vanhasta matalapainevaluprosessista mitattuja tuloksia sekä sisäisiä dokumentointeja. Tutkimuksen kohteeksi valitun tuotteen 1 matalapainevaluprosessin valmistuskustannuksiin vaikuttavia tarkasteltuja tekijöitä ovat alumiinin sulatus, alumiinisulan lämpötilan ylläpitäminen, alumiinisulan kaasuhuuhtelu ja puhdistus, lämpimänäpituunin käytösuhde ja tuotteen kiertoaika matalapainevalukoneella.

Tutkimuksen valmistuskustannuksien muutosten tarkasteluun valitun tuotteen 1 paino on M kg. Tutkimuksesta saatujen energiankulutusmittausten perusteella alumiinin sulattamisen energiakustannukset laskivat uudessa prosessissa K1 € / Al kg. Tuotteen 1 valmistukseen vaaditun alumiinin sulatuksen energiankustannukset laskivat 69 % kappaleelta verrattaessa sitä vanhan prosessin alumiinin sulatukseen.

Tutkimuksessa alumiinisulan lämpötilan ylläpidon energiankustannukset uudessa lämpimänäpituunissa laskivat K2 € / Al kg. Uuden prosessin lämpimänäpituunin kapasiteetti sekä energiankulutus suhteutettiin vanhan prosessin lämpimänäpituuniin

vastaaviin tekijöihin, jonka perusteella tuotteen 1 kokonaispainolla alumiinisulan ylläpidon kustannukset laskivat 23 % kappaleelta.

Tutkimuksessa kerättyjen uuden sekä vanhan prosessin alumiinisulan kaasuhuuhtelun ja puhdistuksen vaikutuksia tutkittiin sisäisistä dokumentoinneista tuotteen 1 kohdalla. Hylätyistä tuotteista tuotteen 1 kohdalla huokoisuuden vuoksi hylättiin vanhassa prosessissa 17 % valamisen jälkeen ja uudessa prosessissa 6,6 %. Uudessa prosessissa valjetun kappaleen huokoisuuden hylkäysprosentti väheni 61 % vanhaan prosessiin verrattuna.

Tutkimuksessa lämpimänäpituunien käyttösuhdetta vertailtiin vanhan sekä uuden prosessien välillä. Lämpimänäpituunin käyttösuhteella on suorainen vaikutus, kuinka pitkään matalapainevalukonetta pystytään ajamaan yhtäjaksoisesti, joka nostaa prosessin tehokkuutta sekä tuottavuutta. Uuden prosessin lämpimänäpituunin kapasiteetin käyttösuhte vanhan prosessin lämpimänäpituuniin oli 31 % parempi. Lämpimänäpituunin kapasiteetin käyttösuhteen kehitys tuotteen 1 painoon suhteutettuna tarkoittaa, että jokaisesta uuden prosessin lämpimänäpituunista pystytään valmistamaan yhtäjaksoisesti 33 % enemmän kappaleita, kuin vanhan prosessin lämpimänäpituunista.

Tutkimuksessa uuden ja vanhan prosessin matalapainevalukoneiden kiertoaikoja tutkittiin tuotteen 1 kohdalla. Vanhan prosessin matalapainevalukoneella tuotteen 1 kokonaiskiertoaika oli keskimäärin T1 sekuntia. Uuden prosessin matalapainevalukoneella tuotteen 1 kokonaiskiertoaika oli tutkimuksessa keskimäärin T2 sekuntia. Kiertoaikojen tutkimustuloksiin perustuen uuden prosessin matalapainevalukoneella pystytään valmistamaan 42 % lyhyemmällä kiertoajalla tuotetta 1. Uuden matalapainevalukoneen kiertoaikaan vaikuttaa kokonaisuudessaan jokaisen prosessin osa-alueen kehitys investointien myötä.

Tutkimuksien tulosten perusteella vanhan prosessin valukappaleen valmistuskustannukset olivat tuotteen 1 kohdalla B €. Investointien jälkeen uudesta prosessista saatuihin tuloksiin perustuen valukappaleen valmistuskustannukset tuotteen 1 kohdalle laskivat K €. Saatuihin tuloksiin perustuen tuotteen 1 valmistuskustannukset laskivat uudessa prosessissa 44 %. Tutkimukseen asetetut Kosken (2017, s. 28) esittämät

teoreettiset tuottovaateet eri investointityypeille toteutuivat. Tuotteen 1 valmistuskustannuksien muutokset on esitetty tiivistetysti taulukossa 5. Valmistuskustannuksien laskeminen jakautui prosessin energiantehokkuuden kehitykselle 46 % ja tuotteen 1 valmistusprosessin laadukkuuden sekä tehokkuuden kehitykselle 54 %.

Vanha matalapainevaluprosessi			Uusi matalapainevaluprosessi		
Tuote 1.			Tuote 1.		Muutos %
Paino / kg	M		Paino / kg	M	0 %
Sulatus / Al kg / €	B1		Sulatus / Al kg / €	K1	-69 %
Al kg lämp.pito / €	B2		Al kg lämp.pito / €	K2	-23 %
Kpl / lämp.p.uuni	L1		Kpl / lämp.p.uuni	L2	33 %
Kiertoaika / s	T1		Kiertoaika/s	T2	-42 %
Kappaleita / h	P1		Kappaleita / h	P2	73 %
Borli € / h	HintaB		Kurtz € / h	HintaK	13 %
Hinta / kpl / €	P1€		Hinta / kpl / €	P2€	-35 %
Yhteensä:	B		Yhteensä:	K	-44 %

Taulukko 5. Tuotteen 1 valmistuskustannuksien muutoksien yhteenveto (T. Seppälä).

8 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia matalapainevalukoneen ja prosessilaitteiden investointien kannattavuutta niiden käyttöönoton jälkeen tuotannollisiin, taloudellisiin ja laadullisiin haasteisiin. Investointien käyttöönoton jälkeen tutkimuksista saatavia tuloksia lähdettäisiin vertailemaan vanhaan prosessiin, prosessilaitteisiin ja matalapainevalukoneeseen. Tutkimustuloksien vertailujen jälkeen yhden tuotteen valmistuskustannuksien muutokset selvitetäisiin vanhan ja uuden prosessin välillä. Valmistuskustannuksien mahdollisiin muutoksiin perustuen arvioitaisiin ja pohdittaisiin investointien kannattavuutta niiden teoreettisiin tuottovaadeodotuksiin.

Opinnäytetyön tutkimukset aloitettiin perehtymällä vanhaan matalapainevaluprosessiin ja siihen sisältyviin prosessivaiheisiin. Matalapainevaluprosessiin perehtyminen oli välttämätöntä, koska tutkimuksen tekijällä ei ollut aikaisempaa teknistä kokemusta aiheesta. Perehtymisen jälkeen luotiin kuvaus vanhan matalapainevaluprosessin nykytilasta sekä siihen liittyvistä haasteista. Vanhan matalapainevaluprosessin nykytilasta nousi tutkimuksen kohteiksi alumiinin sulatus, lämpimänäpituunin täyttö, alumiinisulan kaasuhuuhtelu ja puhdistus sekä valukappaleen kiertoaika matalapainevalukoneella.

Nykytilasta nousseisiin haasteisiin keskityttiin erityisesti uuden matalapainevaluprosessin toimintaa suunniteltaessa. Investointiin sisältyi myös uuden matalapainevalukoneen sekä prosessilaitteiden toiminnan vaatimat rakenteelliset muutokset tehdashallin pohjaan sekä LVIS-tekniikkaan. Vanhan matalapainevaluprosessin haasteet pystyttiin poistamaan erinomaisesti uudesta matalapainevaluprosessista hyvällä toteutuksen suunnittelulla yhteistyössä koko yrityksen henkilöstön kanssa.

Investointien käyttöönoton jälkeen tutkimukset aloitettiin vanhasta matalapainevaluprosessista tunnistetuille kohteille. Alumiinin sulatuksen tutkimuksessa pääkohteeksi nousi energiankulutus sulatusuuneissa. Tutkimuksessa löydettiin merkittäviä eroja kaasu- ja sähkösulatuksen energiantehokkuudessa, jota ei ollut tunnistettu yrityksessä aikaisemmin.

Seuraava tutkimuskohde oli alumiinisulan kaasuhuuhtelu ja puhdistus uudessa matalapainevaluprosessissa. Tiheysindeksin tutkimustulokset alumiinisulan kaasupitoisuuden ja

puhtauden eroista vanhan ja uuden matalapainevaluprosessin välillä kertovat investoinnin merkittävyydestä alumiinisulan laadukkuuden parantamiseen.

Kolmas tutkimuskohde oli lämpimänäpituuni ja täyttö. Energiatehokkuus lämpimänäpituunien välillä vanhassa ja uudessa matalapainevaluprosessissa oli looginen jatkuma sulausuuuninen energiategokkuuden tutkimiselle. Energiankulutuksen mittauksien jälkeen pystyttiin vertailemalla toteamaan, että uudet lämpimänäpituunit ovat merkittävästi energiategokkaampia kuin vanhat.

Lämpimänäpituunin täyttö vanhassa matalapainevaluprosessissa tehdään kaasuhuuhtelun ja puhdistuksen jälkeen, koska prosessikoneiden ja -laitteiden sijoittelu on sen määrittänyt. Uuden matalapainevaluprosessin lämpimänäpituuni sekä prosessivaiheiden uudelleen suunnittelu mahdollisti kaasuhuuhtelun ja puhdistuksen tekemisen lämpimänäpituuniin sen täytön jälkeen.

Neljäs tutkimuskohde oli uudella matalapainevalukoneella valukappaleen kiertoajan mittaust. Valukappaleen kiertoaikaan uudella matalapainevalukoneella vaikutti kokonaisuudessaan kaikki aiempien prosessivaiheiden kehitykset ja uuden matalapainevalukoneen ominaisuudet, joita ei ole vanhoissa matalapainevalukoneissa. Tutkimustulokset vahvistivat, että uudella matalapainevalukoneella valukappaleen kiertoaika lyheni merkittävästi vanhaan matalapainevalukoneeseen verrattaessa.

Tutkimuksen lopuksi tarkasteltiin kokonaisuudessaan investointien tuomia kehitystuloksien vaikutuksia valun valmiskustannuksiin tuotteella 1. Tutkimustuloksiin perustuen investoinneilla saatiin laskettua merkittävästi valun valmistuskustannuksia uudessa matalapainevaluprosessissa. Valmistuskustannuksien laskemisen vaikutukset syntyivät investointien tuomasta energiategokkuuden, laadukkuuden sekä prosessin tehokkuuden kehityksistä uuteen matalapainevaluprosessiin.

LÄHTEET

- Alteams. (2018). *Alteams News: Friction stir welding opens new business opportunities and manufacturing methods for cooling solutions*. <https://www.alteams.com/friction-stir-welding-opens-up-new-business-opportunities-and-manufacturing-methods-for-cooling-solutions/>
- Alteams. (2022). *Alteams Brochure: Alteams_brochure_en_122022_web_spread.pdf*. https://www.alteams.com/wp-content/uploads/2022/12/Alteams_brochure_en_122022_web_spread.pdf
- Alteams. (2023). *Alteams Intra: AFI laihian sulan laadunseuranta*. (Kaasu.png).
- Alteams. (2024). *Alteams Intra: Alteams strategy*. (Alteams Strategy (AG) (0057) (ID 2168).pdf).
- Blazer. (2023a). *Low-pressure crucible furnace with switch cabinet: TEND 1100 A23074 & A23168 Switch Cabinet A22411*. (1–10_Betriebsanleitung TEND1100-_A23074_A23168_A23146_ENG.pdf).
- Blazer. (2023b). *Low-pressure furnace: 12_602-0485C Aufstellung TEND1100*. (12_602-0485C Aufstellung TEND1100.pdf).
- Borli. (2007a). *Low Pressure Casting Machine: MK. 167 Holding Furnace Drawing*. (490AFR001B.pdf).
- Borli. (2007b). *Low Pressure Casting Machine: MK. 167 User and Maintenance Manual*. (MK_167_-_User_and_maintenance_manual.pdf).
- Campbell, J. (2011). *Complete casting handbook: Metal casting processes, metallurgy, techniques and design*. Elsevier.
- Campbell, J. (2015). *Complete casting handbook: Metal casting processes, metallurgy, techniques, and design* (2.p.). Butterworth-Heinemann.
- Fruehan, R. J., & Anyalebechi, P. N. (2008). Gases in Metals. Teoksessa S. Viswanathan, D. Apelian, R. DasGupta, M. Gywn, J. L. Jorstad, R. W. Monroe, T. E. Prucha, M. Sahoo, E. S. Szekeres, & D. Twarog (toim.) ASM Handbook Volume 15: Casting (s. 64–73). ASM International. https://www.researchgate.net/publication/354434114_Gases_in_Metals
- HA Group. (2016). *Chemical Metallurgical Products for Application with Ferrous and Non-Ferrous Alloys*. https://beijers.fi/wp-content/uploads/2021/03/ha_brochure_metallurgical_products_for_fe_and_nf_alloys.pdf

- Koski, T. (2017). *Pk-yrityksen strateginen talousjohtaminen* (2.p.). Kauppakamari.
- Kurtz Ersä. (2023a). *Low-pressure die casting machine: AL 13-13 SC* (20231031_FM1000304_CPU1500_Operating_Instructions_FI.pdf).
- Kurtz Ersä. (2023b). *Low-pressure die casting machine: AL 13-13 SC* (20230515-Ofenschnitt_SR-Länge.pdf).
- Kurtz Ersä. (2023c). *Low-pressure die casting machine: AL 13-13 SC* (20231108-AK96.00.297.00_001-LP_casting_machine_AL13-13SC_FM1000304.pdf).
- Kurtz Ersä. (2023d). *Low-pressure die casting machine: AL 13-13 SC* (20230412_ground plate.pdf).
- Kurtz Ersä. (2023e). *Low-pressure die casting machine: AL 13-13 SC* (20230412_moveable.pdf).
- Kurtz Ersä. (2023f). *Low-pressure die casting machine: AL 13-13 SC* (20231016-AK96.00.297.00_001-Layout_LP_casting_machine_AL13-13SC_Alteams_FI.pdf).
- Kurtz Ersä. (2023g). *Low-pressure die casting machine: AL 13-13 SC* (20231102-AK96.00.297.00_002-setting pre-pressure LP-furnace TEND 1100_Alteams_FI.pdf).
- Linde. (i.a.-a). *AGA nestekaasu: propaanin fysikaaliset ominaisuudet*. https://www.linde-gas.fi/fi/images/Linde_AGAn%20nestekaasu_tcm634-153756.pdf
- Linde. (i.a.-b). *Product data sheet nitrogen: Linde HiQ specialty gases portfolio*. https://www.linde-gas.fi/fi/images/Linde_Nitrogen_product_datasheet_EN_tcm634-579347.pdf
- Linde. (i.a.-c) *Internal product specification: Liquid nitrogen 102730*. (LIN INDUSTRIAL example.pdf).
- Lumley, R. (2011). *Fundamentals of aluminium metallurgy: Production, processing and applications*. Woodhead.
- Martinsuo, M., Mäkinen, S., Suomala, P., & Lyly-Yrjänäinen, J. (2016). *Teollisuustalouden kehittyvässä liiketoiminnassa*. Edita.
- Milne, I., Ritchie, R. O., & Karihaloo, B. L. (2003). *Comprehensive structural integrity*. Pergamon; Elsevier.
- Mk Industrievertretungen. (2014). *Vacuum density tester: 3VT LC DT & MK2210-500198* (Operating Manuals).

- Mk Industrievertretungen. (2024). *Combi package basic: Vacuum density tester 3VT basic & Electronic density index balance MK 3000*. https://www.mk-gmbh.de/fileadmin/user_upload/produktbilder/Produkte/Dichte-Index/Stationaere_Messstation_ba-sic/Brochure_Combi-Package_basic_EN.pdf
- Nabertherm. (2023). *Furnaces for foundry*. https://nabertherm.com/sites/default/files/2023-02/foundry_english.pdf
- Nabertherm. (2024). *Alteams tarjous: sisäinen tietolähde*. (Nabertherm_Alteams_tarjous_27032023.pdf).
- Nath, J. (2018). *Aluminum Castings Engineering Guide*.
- StrikoWestofen. (2024). *A Norican Technology*. <https://www.strikowestofen.com/>
- Thermconcept. (2022). *Operating Instructions: TAG1000/12/K*. (220111_Betriebsanleitung_TAG_1000_12_K_ENG.pdf).
- Thermconcept. (i.a.). *Technical data: Gas heated tilting furnaces*. https://www.thermconcept.com/data/files/375/en/Technical_Data_Gas_TiltingFurnace_TAG18012K-TAG100012K_english.pdf
- Thiede, S. A. (2012). *Energy Efficiency in Manufacturing Systems*. Springer.
- Tiryakioğlu, M. (2020). *The Effect of Hydrogen on Pore Formation in Aluminum Alloy Castings: Myth Versus Reality*. *Metals*, 10(3), 368. <https://doi.org/10.3390/met10030368>
- Vesuvius. (2019a). *Melt Treatment Products for Aluminium, Copper, Magnesium and Zinc Alloys: Related documents*. (SMARTT_brochure_en.pdf). <https://www.vesuvius.com/en/our-solutions/international/foundry/non-ferrous-foundry/melt-treatment.html#titleLink-1>
- Vesuvius. (2019b). *Melt Treatment Products for Aluminium, Copper, Magnesium and Zinc Alloys: Related documents*. (MTS-e.pdf). <https://www.vesuvius.com/en/our-solutions/international/foundry/non-ferrous-foundry/melt-treatment.html#titleLink-2>
- Vesuvius. (2019c). *Melt Treatment Products for Aluminium, Copper, Magnesium and Zinc Alloys: Related documents*. (FDU-e.pdf). <https://www.vesuvius.com/en/our-solutions/international/foundry/non-ferrous-foundry/melt-treatment.html#titleLink-3>

Vesuvius. (2019 i.a.). *Melt Treatment Products for Aluminium, Copper, Magnesium and Zinc Alloys: Related documents*. (FP SMARTT (e).pdf). <https://www.vesuvius.com/en/our-solutions/international/foundry/non-ferrous-foundry/melt-treatment.html#titleLink>

Vesuvius. (2021). *Aluminium – Products for chemical melt treatment of aluminium alloys*. <https://www.vesuvius.com/content/dam/vesuvius/corporate/Our-solutions/our-solutions-master-english/foundry/non-ferrous-foundry/melt-treatment/brochures/coveral-e.pdf.downloadasset.pdf>

Vesuvius. (2024). *Kaasunpoistoyksikkö: FDU Rotoschwenk MTS 1500*. (Käyttöohjeet.pdf).

Vesuvius. (i.a.). *Foseco: Metal treatment of aluminium and aluminium alloys*. (Metal treatment of aluminium and aluminium alloys_573017.pdf).