



TYHJÖJUOTOSPROSESSIN TEHOSTUSKARTOITUS

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan diplomityö

2024

Jani-Pekka Ketolainen

Tarkastajat: Apulaisprofessori Jouni Ritvanen

Tutkijaopettaja Markku Nikku

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Jani-Pekka Ketolainen

Tyhjöjuotosprosessin tehostuskartoitus

Energiatekniikan diplomityö

2024

83 sivua, 31 kuvaa, 7 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastajat: Apulaisprofessori Jouni Ritvanen ja Tutkijaopettaja Markku Nikku

Avainsanat: kovajuotos, juotostuki, lämmönsiirto, energiatehokkuus, tuotantotehokkuus

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli kartoittaa Loviisassa toimivan Loval Oy:n tyhjöjuotosprosessin tehostamismahdollisuuksia. Tehostuspotentiaalikartoitus toteutettiin kirjallisuustutkimuksen sekä asiakasyrityksen juotosprosessin lähtöselvityksen pohjalta.

Tyhjöjuotettavien lopputuotteiden rakennekomponenttien muokkauksella voidaan vaikuttaa juotosprosessin energiantarpeeseen ja näitä tehostustoimenpiteitä on mahdollista toteuttaa, tietyissä rajoissa, ilman tuoteriskiä. Rakennekomponenttien muokkaus vaatii kuitenkin aina tuotteiden uudelleen verifiointin, joka on mittava prosessi.

Konvektiivisen lämmönsiirron mahdollistavien lisälaitteiden hankinta tyhjöuuneihin on varteen otettava prosessintehostuskeino, mutta kustannustehokkaasti toteutettavissa ainoastaan uusien uuni-investointien yhteydessä. Prosessilaitteiden investointipäätökset edellyttävät vahvoja perusteita sekä aikaa toteutuakseen.

Juotettavien uunikuormien rakenteen muokkauksella voidaan vaikuttaa juotosprosessin tehokkuuteen. Nykyaikaiset runkorakennemateriaalit mahdollistavat suuremmat kuormakoonpanot sekä tehokkaamman hyötykuorman sijoittelun. Tämä nostaa juotosprosessin tuotanto- sekä energiatehokkuutta. Kuormarakenteen muokkausta on mahdollista toteuttaa ilman tuote- tai prosessilaitemuutoksia, jolloin vältetään lopputuotteiden uudelleen hyväksyntäprosessit sekä kalliit ja aikaa vievät laiteinvestoinnit. Tutkimuksen yhteydessä suoritettiin koeajo, jossa vertailtiin kuormarakenteen vaikutusta juotosprosessin lämmitysvaiheen tehokkuuteen. Koeajo osoittaa, että siirryttäessä perinteisestä teräsrunkoisesta uunikuormarakenteesta grafiitti- ja hiilikuiturunkoiseen rakenteeseen tyhjöjuotoksen lämmitysvaiheen tuotantoteho kasvaa yli 60 % ja energiatehokkuus yli 40 %. Tämä edellä esitetty tehokkuushyöty on kuitenkin hyötykuormakohtainen.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Jani-Pekka Ketolainen

Vacuum brazing process efficiency improvement study

Master's thesis

2024

83 pages, 31 figures, 7 tables and 1 appendix

Examiners: Associate professor (tenure track) Jouni Ritvanen and Associate professor Markku Nikku

Keywords: brazing, brazing fixture, heat transfer, energy efficiency, production efficiency

The aim of this study was to explore opportunities to improve the efficiency of the vacuum brazing process of Loviisa-based Loval Oy. The efficiency potential study was carried out based on literature research and the initial study of the customer company's brazing process.

The modification of the structural components of vacuum brazed end products can affect the energy requirements of the brazing process and these efficiency measures can be implemented, within certain limits, without product risk. However, modifying structural components always requires re-verification of end products, which is an extensive process.

The purchase of additional equipment enabling convective heat transfer to vacuum furnaces is a viable method of increasing process efficiency but can only be implemented cost-effectively in connection with new furnace investments. Investment decisions for process equipment require strong grounds and time to be realized.

By modifying the structure of the brazing furnace loads, the efficiency of the brazing process can be affected. Modern frame construction materials enable larger load sizes and more efficient payload placement. This increases the production and energy efficiency of the brazing process. It is possible to modify the load structure without product or process equipment changes, which avoids end-product reapproval processes and expensive and time-consuming equipment investments. In connection with the study, a test run was carried out to compare the effect of the load structure on the efficiency of the heating phase of the brazing process. A test run shows that when switching from a traditional steel-framed furnace load to the graphite and carbon fiber frame structure, the production capacity of the heating phase increased by more than 60 % and energy efficiency by more than 40 %. However, this efficiency improvement described above is payload specific.

KIITOKSET

Pitkäaikainen haave jatko-opinnoista ja itsensä kehittämisestä on nyt tältä osin saatu maaliin, päällimmäiset tuntemukset ovat helpotus ja onnellisuus. Matka on vaatinut paljon, mutta se on myös antanut valtavasti. Kantokyvyn rajoja on koeteltu moneen otteeseen ja varsinkin viimeiset metrit opintiellä olivat kivikkoiset ja raskaat.

Ensimmäisenä haluan kiittää perhettäni ja etenkin rakasta vaimoani valtavasta työstä, jonka hän on tehnyt mahdollistaakseen tämän yhtälön toteutumisen. Perhearjen pyörittäminen on opintojen ajan ollut pääasiassa hänen vastuullaan, ja tehtävää ei ole ainakaan helpottanut koulu-tehtävien parissa kiukutteleva opiskelijapoika. Tästä jatketaan vahvempina yhdessä kohti uusia koitoksia.

Kiitettävän arvosanan saa myös Loyal Oy, joka on omalta osaltaan luonut edellytykset tutkimusprojektin onnistumiselle. Talon oma ”tyhjäjuotos professori” Teemu Salo ansaitsee erityismaininnan tässä kiitosten listassa, sillä hän on mahdollistanut koeajojen käytännön toteutumisen. Lisäksi Teemu on matkan varrella tarjoillut sopivasti konkretiaa teoreettisen tarkastelun rinnalle. Toivottavasti yhteistyömme jatkuu edelleen uusien juotos- ja uuniprojektien parissa.

Omalta osaltaan kivikkoista koulutietä on tasoittanut hienosti toteutettu koulutusohjelma, jonka suorittaminen on tehty erittäin sujuvaksi. Tätä on lisäksi edesauttanut opettajien ja muiden opiskelijoiden pyyteetön apu aina tarvittaessa, joten kiitos lähtee myös koko tälle ryhmälle.

Vielä kerran iso kiitos kaikille kouluprojektissa mukana olleille ja myötä eläjille yhdessä sekä erikseen, ilman teitä tämä ei olisi ollut mahdollista. Nyt vedetään hieman happea ja ladataan akut nauttien tasaisesta perhearjesta, mutta uusia mielenkiintoisia projekteja on varmasti vielä kasapäin edessä.

Kotkassa 26.2.2024

Jani Ketolainen

SYMBOLILUETTELO

Roomalaiset

A	pinta-ala	m^2
c	ominaislämpökapasiteetti	$J/(kgK)$
E_e	emittoitua lämpösäteily	W/m^2
E	energia	J, Wh
G	irradianssi	W/m^2
h	lämmönsiirtokerroin	$W/(m^2K)$
I	virta	A
J	eksitaanssi	W/m^2
m	massa	kg
P	teho	W
q	lämpövirta	W
t	aika	s
T	lämpötila	°C, K
U	jännite	V
V	tilavuus	m^3
W_a	adheesiovoima	N/m
W_k	koheesiovoima	N/m

Kreikkalaiset

γ	pintajännitys	N/m
----------	---------------	-----

δ	virtauksen rajakerroksen paksuus	m
ΔT	lämpötilaero	°C, K
$\Delta T/\Delta x$	lämpötilagradientti	K/m
θ	kontaktikulma	°
θ^*	vaikuttava kontaktikulma	°
ρ	tiheys	kg/m ³
λ	lämmönjohtavuus	W/(mK)

Vakiot

g	maan vetovoiman kiihtyvyys	9,81 m/s ²
σ	Stefan-Bolzmanning vakio	5,67 · 10 ⁻⁸ W/(m ² K ⁴)

Dimensiottomat luvut

F	näkyvyyskerroin
r	karhean ja sileän juotospinnan pinta-alojen suhde
x	hyötykuorman osuus uunikuormassa
α	absorptiosuhde
ε	emissiviteetti
η	uunikuormaan siirtyvän lämpöenergian osuus
τ	läpäisysuhde
ω	heijastuskerroin

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Symboliluettelo

1	Johdanto.....	10
1.1	Tutkimuksen tavoite ja toteutus.....	11
1.2	Tutkimuksen rakenne ja soveltaminen	11
2	Juotos.....	12
2.1	Juotoksen fysiikka.....	12
2.1.1	Vettymisen teoria.....	12
2.1.2	Vettyminen juotoksessa	15
3	Juotokseen vaikuttavat tekijät.....	17
3.1	Pintakäsittely.....	17
3.1.1	Puhdistus.....	17
3.1.2	Pinnankarheus	18
3.2	Juoteaine	18
3.2.1	Juoteaineen sulaminen	19
3.2.2	Juoteainemateriaalit ja -muodot.....	20
3.3	Juotosatmosfääri	20
3.3.1	Pelkistävä kaasuatmosfääri	22
3.3.2	Neutraali kaasuatmosfääri.....	23
3.3.3	Tyhjätmosfääri	23
3.4	Perusmateriaalit	26
3.4.1	Oksidoituminen.....	26
3.4.2	Höyrynpaine.....	26
3.4.3	Seostuminen.....	27
3.4.4	Haurausilmiöt.....	27
3.4.5	Jännityssäröily	28
4	Tyhjöjuotos.....	29

4.1	Tyhjöuuni.....	29
4.1.1	Uunikammio	30
4.1.2	Tyhjöjärjestelmä	30
4.1.3	Jäähdytysjärjestelmä	31
4.1.4	Kaasujärjestelmä.....	31
4.2	Tyhjöjuotossykli	31
5	Lämmönsiirto tyhjöuunissa	34
5.1	Säteily	34
5.2	Johtuminen.....	35
5.3	Konvektio.....	37
6	Loval Oy juotettavat tuotteet ja tyhjöjuotosprosessi	39
6.1	Juotettavat lopputuotteet	39
6.1.1	Putkivastus	41
6.2	Juotosprosessi	42
6.2.1	Pintakäsittely.....	43
6.2.2	Perusmateriaalit	43
6.2.3	Juoteaineet	44
6.2.4	Juotosatmosfääri	45
6.2.5	Juotossykli ja uuninohjaus sekä uunikuorman rakenne.....	45
7	Tyhjöjuotosprosessin tehostamispotentiaali	47
7.1	Tyhjöjuotoksen pääkomponentit.....	47
7.1.1	Perusmateriaalit	47
7.1.2	Juoteaineet	49
7.1.3	Juotosatmosfääri	50
7.2	Konvektiivinen lämmönsiirto	51
7.3	Uunikuorman rakenne.....	51
7.3.1	Uunikuorman koko	52
7.3.2	Hyötykuorman osuus	53
8	Lisätutkimus ja koeajot.....	55
8.1	Uunikuorman rakenneanalyysi	55
8.1.1	Uunikuormatyypit.....	55
8.1.2	Hyötykuorma	56
8.1.3	Menetelmät ja välineet.....	57

8.2	Tyhjöuunin lämmitysvaiheen tehokkuus	60
8.2.1	Menetelmät ja välineet	61
9	Tulokset	64
9.1	Uunikuorman rakenneanalyysi	64
9.1.1	Uunipohja.....	65
9.1.2	Kuorman tukirakenne	66
9.1.3	Hyötykuorma	67
9.1.4	Uunikuorman tilavuus ja massa	67
9.1.5	Kuorman lämpösäteilyä vastaanottava pinta-ala	68
9.2	Juotoskoeajot	69
9.2.1	Tyhjöuunin lämmityksen ohjaus ja syöttöteho	69
9.2.2	Uunikuormaan ja hyötykuormaan siirtyvä lämpöteho.....	72
9.2.3	Vertailulaskelma	73
9.3	Jatkotutkimus	75
9.3.1	Uunipohja.....	75
9.3.2	Uunikuorman pinta-ala	76
9.3.3	Tyhjöuunin syöttöteho	77
10	Yhteenveto.....	78
	Lähteet	81

Liitteet

Liite 1. Uunikuorman rakenneanalyysien tulokset

1 Johdanto

Maailmanlaajuiset pyrkimykset kohti kestävästä kehitystä ohjaavat myös lämmitysratkaisuja ekologisempaan suuntaan. Fossiilisten polttoaineiden korvaaminen lämmitysjärjestelmissä on usein tehokasta toteuttaa erilaisten sähkölämmityssovellusten avulla. Tämä näkyy esimerkiksi lämpöpumppujärjestelmien kysynnän räjähdysmäisenä kasvuna Euroopassa. Kasvu heijastuu suoraan myös laitekomponenttien kysyntään ja haastaa tuotantolaitokset, jotka pyrkivät vastaamaan muuttuvaan asiakastarpeeseen.

Komponentti- ja laitevalmistajat pyrkivät mukautumaan kasvuhaasteisiin sopeuttamalla tuotantokapasiteettiaan. Monessa tapauksessa kapasiteetin nosto vaatii mittavia linjainvestointeja, mutta valmistusprosessin tehokkuuden parannus olemassa olevaa prosessia optimoimalla on usein nopeampi ja edullisempi vaihtoehto.

Loviisassa toimiva Loval Oy on vuonna 1960 perustettu yritys, jonka ydinosuutta on erilaiset lämmönsiirtoratkaisut sekä tyhjöjuotostekniikka. Lovalin valmistamat sähkölämmittimet perustuvat putkivastustekniikkaan ja tuotteiden pysyvät teräslitokset toteutetaan kovuuttamalla. Perheyriksenä aloittanut Loval Oy on tänä päivänä osa Nibe Industrier AB-konsernia ja yksi Euroopan merkittävimmistä lämmityselementtien valmistajista.

Yli puolet Lovalin valmistamista lopputuotteista kuuluu lämpöpumpputeollisuudessa, joka käyttää levylämmönsiirtimiä sekä läpivirtauslämmittimiä osakomponentteinaan. Pääasiassa säiliölämmittimiä sekä laippavastuksia käyttävät elintarviketeollisuuden laitevalmistajat ovat toinen merkittävä asiakasryhmä yritykselle, yhdessä lämpöpumpputeollisuuden kanssa ne vastaavat noin 75 % Lovalin kokonaistuotannosta. Edellä mainittujen lisäksi Loval Oy suunnittelee ja valmistaa pienempiä määriä lämmönsiirtosovelluksia muille teollisuuden aloille sekä tyhjöjuotukseen perustuvia erikoisjuotoksia. (Loval Oy 2023a.)

Tyhjöjuotostekniikka käytetään erilaisten materiaalien pysyvien liitosten muodostamiseen ja teknologia tarjoaakin monia etuja muihin juotos- sekä hitsausmenetelmiin verrattuna, mutta siinä on myös haasteita. Tyhjöjuotos on yleensä panosprosessi, jossa koko juotettavan uunikuorman lämpötila nostetaan juoteaineen sulamisalueen yläpuolelle, mikä tarkoittaa, että prosessi on äärimmäisen energiantensiivinen. Lisäksi panosprosessi jatkuvatoimisen kokonaisprosessin keskellä tekee tuotevirtauksesta pulssimaista, mikä hankaloittaa

tuotannon tehokasta virtautusta. Juotosvaiheen toimivuus ja tehokkuus onkin keskeisessä roolissa koko valmistusprosessin sujuvuuden kannalta.

1.1 Tutkimuksen tavoite ja toteutus

Tämän tutkimuksen tavoitteena on kartoittaa Loyal Oy:n tyhjöjuotosprosessin käyttämätön tehostuspotentiaali, jotta muuttuneen markkinatilanteen aiheuttamaa tuotantokapasiteetin vajetta saadaan kevennettyä ja tulevaisuuden investoinnit voidaan toteuttaa mahdollisimman tehokkaasti. Juotosprosessin tehokkuuden nosto on usein monimutkainen optimointiyhtälö. Yleensä juotoskoonpanon komponenttivalintoja ei tehdä juotettavuuden tai prosessitehokkuuden ehdolla vaan perusmateriaalit määräytyvät lopputuotteiden teknisten vaatimusten ohjaamana. Materiaalivalinnat ja käytettävä prosessilaitteisto taas ohjaavat prosessiparametrien valintaa.

Tehostuspotentiaalin kartoitus on toteutettu kirjallisuustutkimuksen sekä asiakasyrityksen juotosprosessin lähtöselvityksen perusteella ja siinä on pyritty huomioimaan mahdolliset riskitiedat lopputuotteiden ja olemassa olevan prosessilaitteiston asettamien rajoitteiden sekä ehdotettujen tehostusmenetelmien välillä. Kartoitukseen pohjautuva kokeellinen tarkastelu keskittyy uunikuorman rakennemuuttajien ja tyhjöjuotoksen lämmitysvaiheen tehokkuuden välisiin riippuvuussuhteisiin, jossa tehostamisen näkökulmasta kiinnostavia muuttujia ovat saanto sekä energiatehokkuus.

1.2 Tutkimuksen rakenne ja soveltaminen

Työn alkuosa esittelee juotoksen liitännämenetelmänä ja kokoaa yhteen prosessin fysikaaliset periaatteet sekä juotostulokseen vaikuttavat päätekijät. Tämän jälkeen syvennyttään tyhjöjuotosprosessiin, prosessilaitteistoon sekä tyhjöuunin lämmönsiirron mekanismeihin. Kirjallisuustutkimuksen jälkeen tarkastellaan asiakasyrityksen juotosprosessin lähtötilannetta sekä näiden pohjalta laadittua juotosprosessin tehostuskartoitusta. Lopuksi käydään läpi tehostuskartoitukseen pohjautuva käytännön tutkimus ja sen tulokset sekä työn yhteenveto. Tutkimus on toteutettu räätälöitynä asiakasyrityksen tarpeisiin, mutta työssä esitetyt prosessin toiminnallisuuden vaikuttavat tekijät ja niiden riippuvuus suhteet sekä tehokkuuden nostomekanismit ovat sovellettavissa yleisesti juotosprosessissa.

2 Juotos

Juotos on materiaalien pysyvä yhteen liitos, joka perustuu juoteaineena käytettävän metallin tai metalliseoksen sulaaessaan muodostamiin sidoksiin perusmateriaalien kanssa. Juotteen sulamislämpötila-alue on perusmateriaalia alhaisempi, jolloin juotosprosessissa ainoastaan juoteaine sulaa. (Linde AG 2023.)

Juotosmenetelmät voidaan jakaa työlämpötilan mukaan kova- ja pehmytjuottoon. Pehmytjuotoksessa käytettävät juoteaineet sulavat alle 450 °C lämpötilassa ja muodostuvat liitokset perustuvat pääosin mekaanisiin sidoksiin. Kovajuotoksen työlämpötilat ovat 450 °C yläpuolella ja materiaalien välille muodostuvat sidokset ovat sekä mekaanisia että kemiallisia. Työlämpötilan lisäksi juotosmenetelmät voidaan jakaa lämmitystavan sekä suoja-atmosfääriin mukaan useisiin eri menetelmiin, mutta juotosprosessin toiminnallisuus perustuu kuitenkin aina samoihin lainalaisuuksiin. (Linde AG 2023.)

2.1 Juotoksen fysiikka

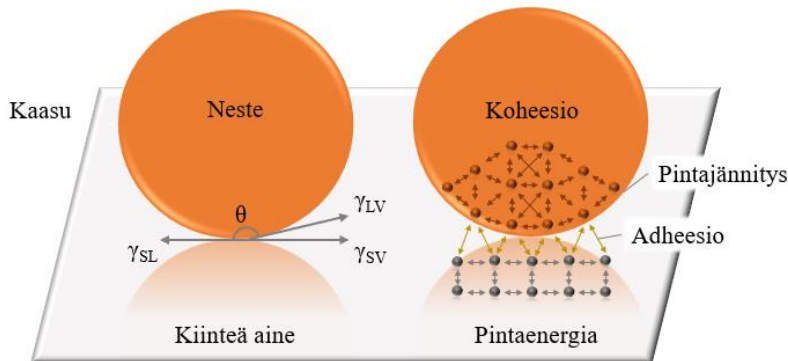
Juotoksessa liitettävän kokoonpanon lämpötila nostetaan juoteaineen sulamislämpötila-alueen yläpuolelle, jolloin juote sulaa ja täyttää perusmateriaalien muodostaman juotosvälin. Jäähtyessään juoteaine kiinteytyy ja sitoo materiaalit mekaanisesti sekä metallurgisilla sidoksilla, jotta juotteen leviäminen ja sidosten muodostuminen on mahdollista, täytyy sulalla juoteaineella olla kyky kastella juotettavat pinnat. (Linde AG 2023.)

2.1.1 Vettymisen teoria

Juoteaineen kykyä kastella liitettävät perusmateriaalit voidaan kuvata kontaktikulman avulla. Kontaktikulma on kiinteän perusmateriaalin sekä sulan juoteaineen tangentin pintojen välinen kulma, jonka suuruuteen vaikuttaa sulan juoteaineen, juotettavan perusmateriaalin sekä ympäröivän kaasuatmosfäärin väliset pintajännitykset. Kontaktikulman ja pintajännitysten välinen riippuvuus käy ilmi Youngin yhtälöstä (1) ja kuva 1 kokoa yhteen vettymiseen vaikuttavat muuttujat.

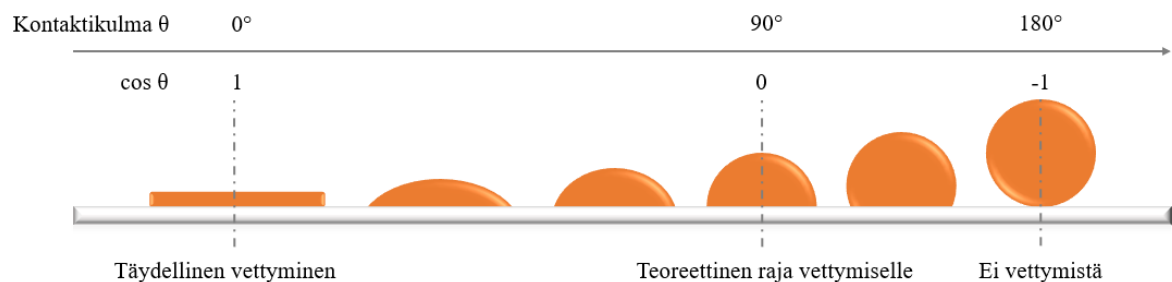
$$\gamma_{SV} - \gamma_{SL} = \gamma_{LV} \cos \theta \quad (1)$$

Jossa γ_{SV} on pintajännitys kiinteän ja kaasufaasin välillä [N/m], γ_{SL} on pintajännitys kiinteän ja nestefaasin välillä [N/m], γ_{LV} on pintajännitys neste- ja kaasufaasin välillä [N/m] ja θ on kontaktikulma [°]. (Linde AG 2023.)



Kuva 1. Faasien väliset pintajännitykset tasapainotilassa. (muokattu lähteestä American Welding Society 2007)

Kolmen voimavektorin tasapainotilassa muodostuvan kontaktikulman ollessa alle 90° juoteaine kykenee kastelemaan juotettavat pinnat ja juotos on teoriassa mahdollinen, mutta käytännössä hyvän juotossauman muodostumisen edellytyksenä on alle 60° kontaktikulma. (Linde AG 2023.) Kuva 2 esittää kontaktikulman ja vettymisen välisen yhteyden.



Kuva 2. Kontaktikulman vaikutus vettymiseen. (muokattu lähteestä American Welding Society 2007)

Vettymistä voidaan tarkastella myös adheesio- ja koheesiovoimien avulla. Nestemäisen juotteen koossa pitävä koheesiovoima sekä juoteaineen ja perusmateriaalin välinen adheesiovoima määrittävät muodostuvan kontaktikulman. (Eustathopoulos et al. 1999.)

Juotteessa vaikuttavan koheesiovoiman suuruus on kaksinkertainen sulan juoteaineen pintajännitykseen verrattuna.

$$W_k = 2\gamma_{LV} \quad (2)$$

Jossa W_k on koheesiovoima sulassa juoteaineessa [N/m].

Duprén yhtälön mukaan pintojen välinen adheesiovoima voidaan määrittää faasien pintajännitysten avulla.

$$W_a = \gamma_{LV} + \gamma_{SV} - \gamma_{SL} \quad (3)$$

Jossa W_a on adheesiovoima sulan juoteaineen ja perusmateriaalin välillä [N/m]. (Contreras Cuevas et al. 2018.)

Kun Duprén yhtälöön (3) sijoitetaan Youngin yhtälö (1), saadaan koheesio- ja adheesiovoimia tarkasteltua yhteinen tekijän avulla.

$$W_a = \gamma_{LV}(1 + \cos\theta) \quad (4)$$

Tätä yhtälöä kutsutaan Young-Duprén yhtälöksi. (Eustathopoulos et al. 1999.)

Edellä esitettyjen yhtälöiden pohjalta voidaan todeta seuraavaa:

1. Juotettavan perusmateriaalin ja sulan juoteaineen välisen adheesiovoiman tulisi olla vähintään juoteaineen pintajännityksen suuruinen, jotta vettyminen on mahdollista.
2. Täydellinen perusmateriaalin kostuminen vaatii, että adheesiovoima juotossaumassa on juoteaineen sisäisen koheesiovoiman suuruinen tai suurempi.
3. Juotettavan perusmateriaalin vettymistä voidaan tehostaa kasvattamalla sen pintajännitystä, muutoin faasien välisten pintajännitysten laskeminen on juotostuloksen kannalta edullisinta.

Juotettavien kokoonpanojen materiaalivalinnat ei yleensä perustu juotoksen optimointiin, vaan käyttökohde määrittää materiaalit ja prosessimuuttujilla pyritään kompensoimaan juotoksen kannalta epäedullisia valintoja.

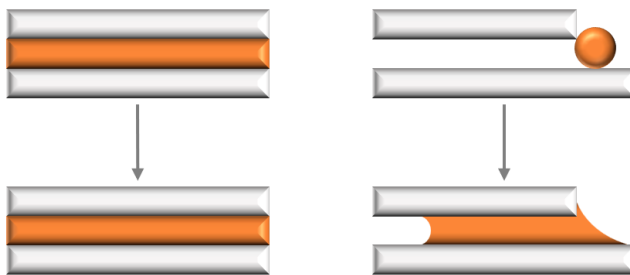
Juotostulokseen vaikuttavia prosessimuuttujia ovat:

1. Metalliset perusmateriaalit rakentuvat vahvoista sidoksista ja näin ollen niiden pintajännitykset ovat juotokseen hyvin sopivia, mutta pinnalla olevat epäpuhtaudet vaikuttavat negatiivisesti pintajännitykseen. Perusmateriaalin puhdistus ja puhtaiden pintojen ylläpito on keino parantaa vettymisen edellytyksiä.

2. Sulan juoteaineen pintajännitykseen voidaan vaikuttaa kaasuatmosfäärin valinnalla, mutta myös kaasun paineen pudotuksella saadaan juoteaineen pintajännitys lasketua.
3. Juoteaineen ja perusmateriaalin välistä pintaenergiaa voidaan laskea nostamalla prosessilämpötilaa. (Jacobson 2005.)

2.1.2 Vettyminen juotoksessa

Juotos voidaan toteuttaa asettamalla juoteaine suoraan juotettavien pintojen väliin tai juokuttamalla se kapillaarisesti juotossaumaan (kuva 3). Kapillaarinen juoteaineen levitys on toimiva menetelmä monimutkaisissa saumarakenteissa, mutta vaatii hyvän vettymisen ominaisuudet, jotta sula juote täyttää liitossauman kauttaaltaan.



Kuva 3. Juotteen annostelutavat liitossaumaan (muokattu lähteestä Sekulić 2013)

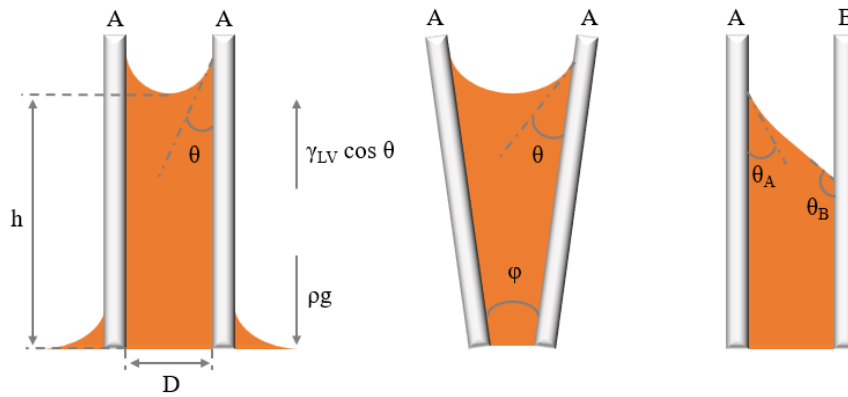
Kapillaarista juotteen leviämistä voidaan kuvata seuraavan yhtälön (5) avulla. Yhtälö on validi, kun juotettavat pinnat ovat ominaisuuksiltaan identtiset sekä yhdensuuntaiset.

$$h = \frac{2\gamma_{LV}\cos\theta}{\rho g D} \quad (5)$$

Jossa h on juotteen kapillaarinen nousukorkeus [m], on ρ on juoteaineen tiheys [kg/m^3], g on maan vetovoiman kiihtyvyys $9,81$ [m/s^2] ja D on juotossauman leveys [m]. (Sekulić 2013.)

Yhtälöstä 5 nähdään, että kontaktikulman täytyy olla pienempi kuin 90° , jotta kapillaarinen juotteen leviäminen on mahdollista, jos juotettavat liitospinnat eivät ole yhdensuuntaiset pienentää se sallittua kontaktikulmaa sauman avautumiskulman puolikkaan verran. Kun juotettavat materiaalit ovat ominaisuuksiltaan erilaiset niin kontaktikulmien summan täytyy alittaa

180°, jotta kapillaarinen juotteen leviäminen on mahdollista. Kuvassa 4 on esitetty edellä mainitut liitoskoonpanot. (Sekulić 2013.)



Kuva 4. Kapillaarinen juotteen eteneminen liitossaumassa (muokattu lähteestä Sekulić 2013)

Vaikka juote on asetettu suoraan juotospinnoille ja kapillaarista juotteen siirtymistä ei tarvita perusmateriaalin vettymisellä ja sitä kuvaavalla kontaktikulmalla on ratkaiseva merkitys juotossauman laatuun. Korkeilla kontaktikulmilla sula juote ei mukaudu perusmateriaalin pintaan ja juotos jää lujuudeltaan heikoksi. Juotesauma jää myös helposti huokoiseksi, mikä osaltaan vaikuttaa negatiivisesti lujuusominaisuuksiin. (Sekulić 2013.)

3 Juotokseen vaikuttavat tekijät

Juotostulokseen vaikuttavat pääkomponentit ovat juotettava perusmateriaali, käytetty juoteaine sekä juotostapahtumassa vaikuttava atmosfääri. Juotostulos ei kuitenkaan yleensä ole päätekijä valittaessa näitä komponentteja, vaan lopputuotteen vaatimukset ohjaavat ensisijaisesti valintoja. Lisäksi käytetty juotosmenetelmä sekä prosessilaitteisto voivat toimia rajoittavana tekijänä. Juotostulokseen vaikuttavien tekijöiden tuntemus sekä riippuvuussuhteiden ymmärtäminen mahdollistaa juotostuloksen optimoinnin.

3.1 Pintakäsittely

Pintakäsittelyllä tarkoitetaan juotettavan perusmateriaalin puhdistusta tai pinnan ominaisuuksien muokkaamista juotokselle edulliseen muotoon. Käsittelymenetelmät voidaan jakaa kemiallisiin ja mekaanisiin menetelmiin sekä näiden yhdistelmiin.

3.1.1 Puhdistus

Puhtaat liitospinnat ovat edellytys juotoksen onnistumiselle. Epäpuhtaudet laskevat materiaalin pintajännitystä, mikä haittaa vettymistä sekä juotteen leviämistä. Kemialliset puhdistusmenetelmät ovat yleisesti käytössä, poistettaessa orgaanisia yhdistettä juotettavien kappaleiden pinnoilta. Nämä orgaaniset epäpuhtaudet ovat pääosin kappaleiden valmistuksessa käytettäviä työstönesteitä sekä voiteluaineita, jotka poistetaan erilaisilla pesukäsittelyillä. (American Welding Society 2007.)

Kemikaalikäsittelyä käytetään toisinaan myös oksidipinnan poistoon, mutta mekaaniset puhdistusmenetelmät ovat myös mahdollisia. Erilaiset hionta, harjaus sekä puhallusmenetelmät poistavat tehokkaasti juotokselle haitallisen oksidikerroksen juotettavan perusmateriaalin pinnalta. Mekaanisella puhdistuksella voidaan myös muovata perusmateriaalin pintaa juotosta edistävään suuntaan. (American Welding Society 2007.)

Juotostulos heikkenee pintakäsittelyn jälkeisen odotusajan funktiona. Juotettava materiaali, käyttöympäristö sekä pintakäsittelymenetelmät määrittävät odotusajan vaikuttavuuden.

Optimaalisen juotostuloksen saavuttamiseksi odotusaika pintakäsittelyn ja juotoksen välillä on minimoitava. (American Welding Society 2007.)

3.1.2 Pinnankarheus

Pinnankarheus vaikuttaa juotteen leviämiseen sekä perusmateriaalin vettymiseen. Riippuvuussuhde voidaan kuvata matemaattisesti.

$$\cos\theta^* = r \cos\theta \quad (6)$$

Jossa θ^* on vaikuttava kontaktikulma [°] ja r on karheen ja sileän juotospinnan pinta-alojen suhde.

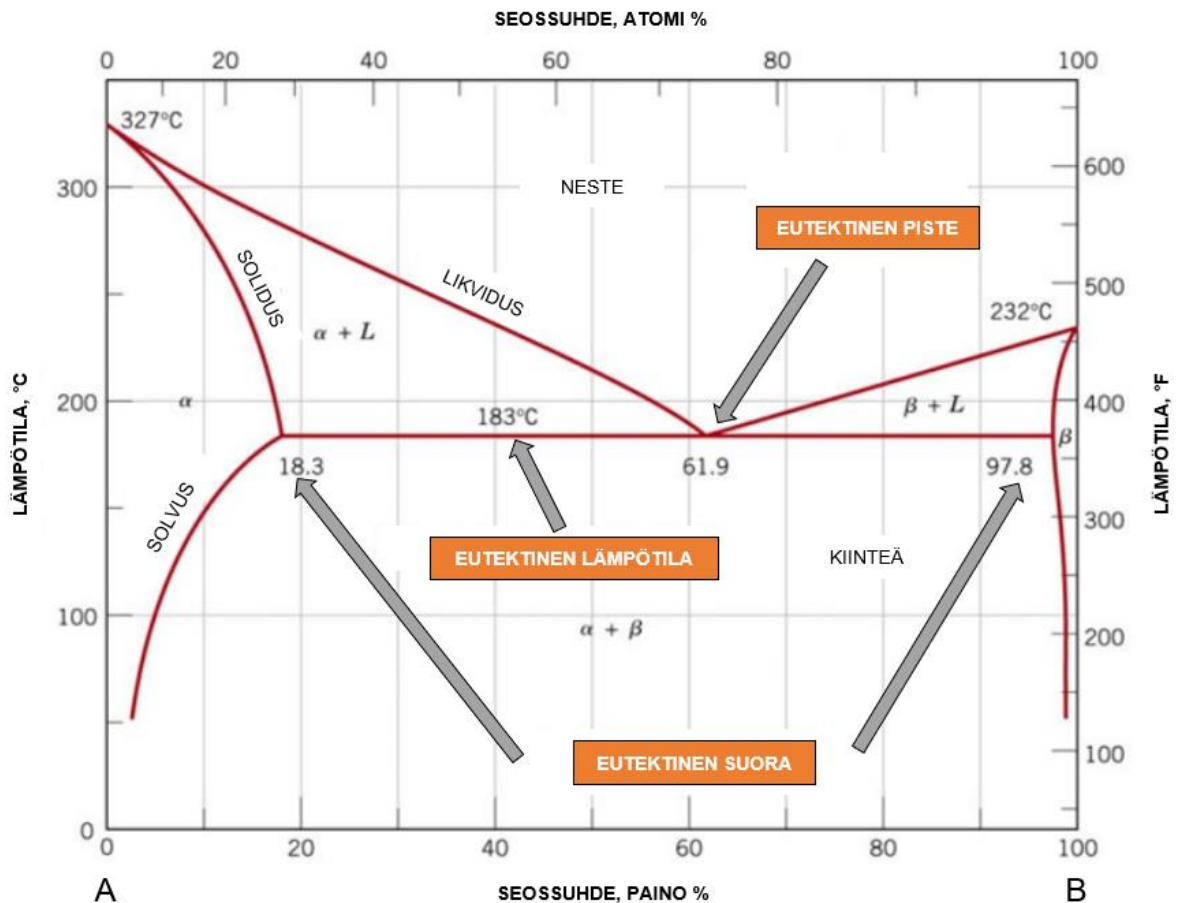
Yhtälön (6) mukaan hyvin vettyvillä materiaaleilla pinnankarheus edesauttaa juotteen leviämistä. Tämä ei kuitenkaan ole täysin yksiselitteistä, sillä pinnankarheuden kasvaessa myös haittavaikutukset lisääntyvät. Karheapinta ohjaa juotevirran urien suuntaisesti, jolloin juotteen leviäminen on epätasaista. Juote myös etenee hitaammin karhealla pinnalla, mikä lisää seostumisriskiä. Juotteen ja perusmateriaalin seostuminen nostaa yleensä sulamispistettä, mikä jähmettää seosta ja sen leviäminen vaikeutuu. (Contreras Cuevas et al. 2018; Jacobson 2005.)

3.2 Juoteaine

Juoteaine on metalli tai metalliseos, joka sulaa juotoslämpötilassa muodostaen pysyvän liitoksen juotettavien materiaalien kanssa. Juotemetallin tulee olla yhteensopiva perusmateriaalien kanssa, jotta vettyminen sekä sidosten muodostuminen on mahdollista. Tämän lisäksi pyritään välttämään perusmateriaalien sekä juoteaineiden seostumisesta johtuvia haittavaikutuksia ja edistämään positiivisia vaikutuksia. Hauraat faasit ja perusmateriaalin eroosio ovat tyypillisiä seostumisesta aiheutuvia haittavaikutuksia, kun taas sulamispisteen nousu on toivottu ominaisuus. Juotossovelluksen mekaaniset ja fysikaaliset vaatimukset ohjaavat juoteaineen valintaa. (American Welding Society 2007.)

3.2.1 Juoteainen sulaminen

Puhtaat metallit sulavat yhdessä pisteessä ja ovat juoksevia, kun taas metalliseoksilla on sulamisalue, joka riippuu seostussuhteesta. Juotoksessa pyritään hyödyntämään eutektisia seoksia, koska ne käyttäytyvät puhtaiden metallien tavoin. Eutektisessä seoksessa rakennekomponenttien osuudet jakautuvat siten, että seoksen sulamispiste on mahdollisimman alhainen. Alhainen sulamispiste ei ole itsetarkoitus, vaan tällä pyritään kaventamaan juotteen sulamisaluetta. (American Welding Society 2007.) Kuvassa 5 on esitetty seossuhteen vaikutus juotteen sulamisalueeseen.



Kuva 5. Periaatteellinen kuva juoteaineseoksen faasidiagrammista (muokattu lähteestä Jokinen 2019)

Faasidiagrammista (kuva 5) on esitetty kuinka seossuhde vaikuttaa materiaalin sulamisalueeseen. Seoksen sulamisalueella juoteainen osakomponenttien faasimuutokset tapahtuvat eri vaiheissa. Tämä voi johtaa faasienerottumiseen ja seostusasteen vaihteluun juotosaumassa. Juoteainen faasienerottumista voidaan ehkäistä nopealla seoksen sulamisalueen

ohituksella lämmitysvaiheessa. Juotoskokoontalon lämpötilan tasaisuus on myös kriittinen osatekijä faasimuutoslämpötiloissa sekä raja-alueilla. (American Welding Society 2007.)

3.2.2 Juoteainemateriaalit ja -muodot

Erilaisia juoteaineita on tarjolla runsaasti ja niiden jaotteluun on käytössä monia menetelmiä. ISO 17672:2016 standardin mukaan juoteaineet jakautuvat seuraavasti. Alumiinipohjaiset juotteet ovat juoteryhmä, joka on suunniteltu matalanlämpötilan kovajuotosprosesseihin ja pitää sisällään myös magnesiumipohjaiset juotteet. Hopeajuoteryhmän kuuluvat juoteseokset, jotka sisältävät hopeaa. Tämän ryhmän juotteet ovat hyviä yleisjuotteita ja ne sopivat yhteen monien perusmateriaalien kanssa, mutta käyttöä rajoittaa materiaalin arvokkuus. Kuparipohjaiset juotteet on jaettu kahteen osaan, fosforia sisältävät juoteseokset on erotettu omaksi ryhmäkseen. Fosforilla seostetut kuparijuotteet on pääasiassa tarkoitettu kupari pitoisten perusmateriaalin juottamiseen. Muita kuin fosforiseosteisia kuparipohjaisia juotteita on laaja kirjo eri sovelluskohteisiin. Korkeaan lämpötilaan tarkoitettuja juoteaineita ovat nikkelipohjaiset juotteet, jotka pitävät sisällään myös kobolttipohjaiset seokset, sekä palladium- ja kultapitoiset juoteaineryhmät. Kaikkien näiden kolmen juoteryhmän seokset ovat kiinteitä vielä 800 °C lämpötilassa. (Way et al. 2019.)

Juoteaineita on saatavilla useissa muodoissa: lanka, tanko, levy, nauha ja jauhe. Näistä voidaan valmistaa juotokseen sopivia esitaivutettuja ja leikattuja muotoja. Jauheista muodostetaan sideaineiden kanssa juotepastaseoksia, jotka annostella ruiskuttamalla liitossaumaan. Myös erilaiset pinnoitusmenetelmät ovat mahdollisia. (American Welding Society 2007.)

3.3 Juotosatmosfääri

Juotosatmosfäärin tehtävä on ehkäistä oksidien ja muiden haitallisten yhdisteiden muodostuminen juotosprosessin aikana, sekä poistaa jo muodostuneita yhdisteitä, jotka haittaavat juotostapahtumaa. Atmosfäärin hallinta perustuu suojakaasuseoksen sisältämän hapen ja hiilen, sekä jossain määrin myös typen ja vedyn, välisten reaktioiden tasapainon säätöön juotettavien metallien tai metalliseosten kanssa. (Linde AG 2023.)

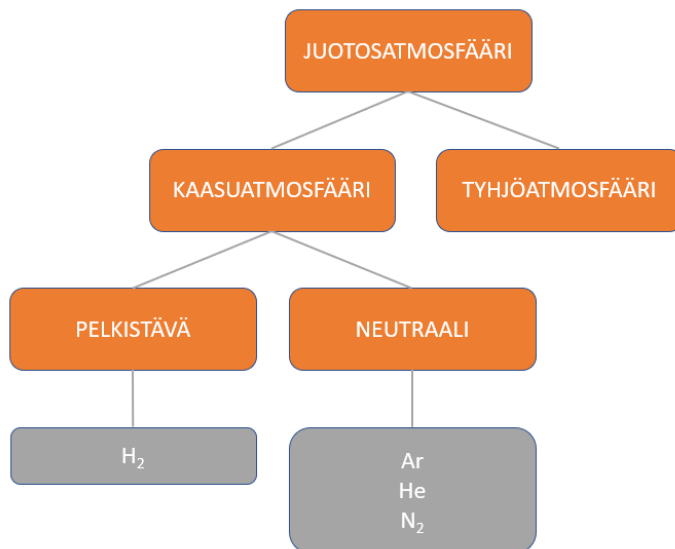
Juotosatmosfäärin komponentit voivat olla joko aktiivisia tai neutraaleja. Aktiivisilla kaasuseoksen osilla säädetään prosessin happi- sekä hiilitasapainoa. Neutraalit kaasut eivät

reagoi juotostapahtumassa vaan syrjäyttävät haitalliset kaasukomponentit ja estävät niiden osallistumisen prosessiin. Neutraalit kaasut toimivat kantajakaasuina aktiivisille kaasukomponenteille ja niitä käytetään myös laimentamaan palavia kaasuja, jotta niiden käyttö on turvallista. Taulukossa 1 on esitetty kaasuatmosfäärin komponentit ja niiden osallisuus reaktiotasapainon muodostumiseen.

Taulukko 1. Kaasuatmosfäärin komponentit ja niiden toiminnallisuus (muokattu lähteestä Linde AG 2023)

Aktiiviset kaasut				Neutraalit kaasut
Pelkistävät	Hapettavat	Hiilettävät	Hiilikatoa edistävät	
H ₂	H ₂ O	CO	H ₂ O	N ₂
CO	CO ₂	C _x H _y	CO ₂	Ar
	O ₂		O ₂	He

Juotoksessa käytettävät atmosfäärit voidaan jakaa kolmeen päätyyppiin: pelkistävä, neutraali sekä tyhjä. Kuvassa 6 on kaavioesitys juotosatmosfääreistä sekä niiden pääasiallisista kaasukomponenteista.



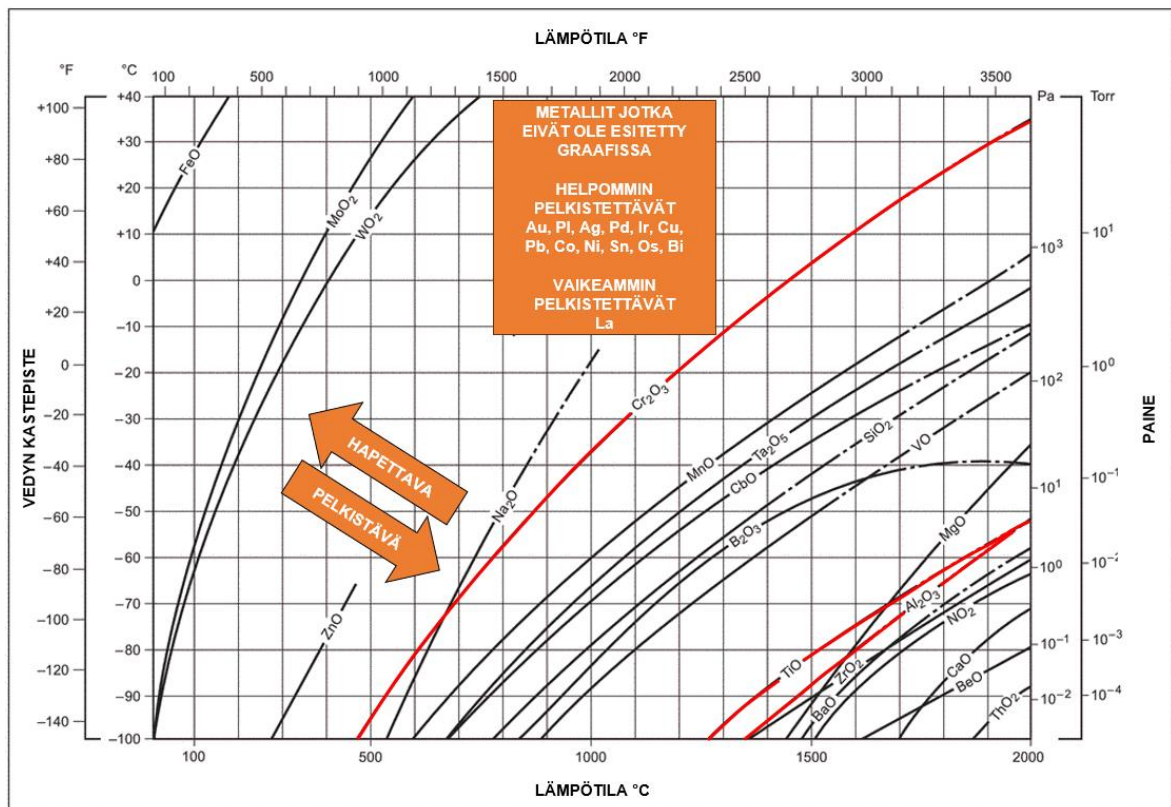
Kuva 6. Juotosatmosfäärit (muokattu lähteestä Linde AG 2023)

Neutraali juotosatmosfääri ehkäisee oksidien sekä haitallisten yhdisteiden muodustumista syrjäyttämällä ei-toivotut kaasukomponentit juotosympäristöstä. Pelkistävä suojakaasu toimii neutraalin atmosfäärin tavoin, mutta lisäksi se reagoi juotettavan materiaalin kanssa

pelkistäen jo muodostuneita oksideja. Tyhjöatmosfääri käyttäytyy pelkistävän ympäristön tavoin, mutta prosessia haittaavat kaasukomponentit poistetaan tyhjäpumpuilla ei syrjäyttämällä. Lisäksi jo muodostuneiden oksidien poisto ei perustu atmosfääriin pelkistävään vaikutukseen vaan korkea lämpötila sekä matala kaasunpaine hajottavat muodostuneita oksideja. (Linde AG 2023.)

3.3.1 Pelkistävä kaasuatmosfääri

Vetykaasu pystyy pelkistämään monet metallioksidit korkeissa lämpötiloissa ja on siksi yleisesti juotoksessa käytetty pelkistävä suojakaasu. Vetyatmosfäärin puhtausvaatimus kasvaa, kun juotettavan perusmateriaalin seosaineiden muodostamien oksidien pysyvyys lisääntyy. Kuvassa 7 on esitetty metallioksidien tasapainokäyriä juotosatmosfäärin puhtauden sekä lämpötilan funktiona.



Kuva 7. Metallioksidien tasapainokäyrästä (muokattu lähteestä Bredzs & Tennenhouse 1970, 189-193)

Vedyn kastepisteen sekä lämpötilan muodostaman kohtauspisteen jäädessä metallioksidin tasapainokuvaajan oikealle puolelle, ympäristö on pelkistävä ja kyseistä oksidia ei muodostuu. Metalliseoksilla tasapainokuvaaja määräytyy seoksen pysyvimmän oksidin mukaan. Oksidipinnan muodostuminen edellyttää, että oksidia muodostavan metallikomponentin osuus on vähintään 0,5 paino-% seoksesta, muutoin tasapainokuvaaja asettuu seoksen seuraavaksi pysyvimmän oksidin tasapainon mukaan (Bredzs & Tennenhouse 1970, 189-193.)

Helposti palavalla vedyllä on taipumus haurastuttaa metalleja ja se on hengitettynä vaarallinen. Nämä edellä mainitut seikat rajoittavat sekä luovat käytännön haasteita kaasun käytölle (Linde AG 2023).

3.3.2 Neutraali kaasuatmosfääri

Typpeä käytetään suoja-atmosfäärinä syrjäyttämässä hapen sekä muut haitalliset kaasukomponentit juotosympäristöstä sekä kantajakaasuna aktiivisille kaasukomponenteille. Typpi on inertti isolle osalle metalleista, mutta mahdollinen nitridien muodostuminen täytyy huomioida prosessikokonaisuuden tarkastelun yhteydessä. Helium ja argon ovat täysin inerttejä kaasuja ja mahdollisia atmosfäärin muodostajia silloin kun typpi ei reaktiivisuutensa takia ole sopiva vaihtoehto. (American Welding Society 2007.)

3.3.3 Tyhjöatmosfääri

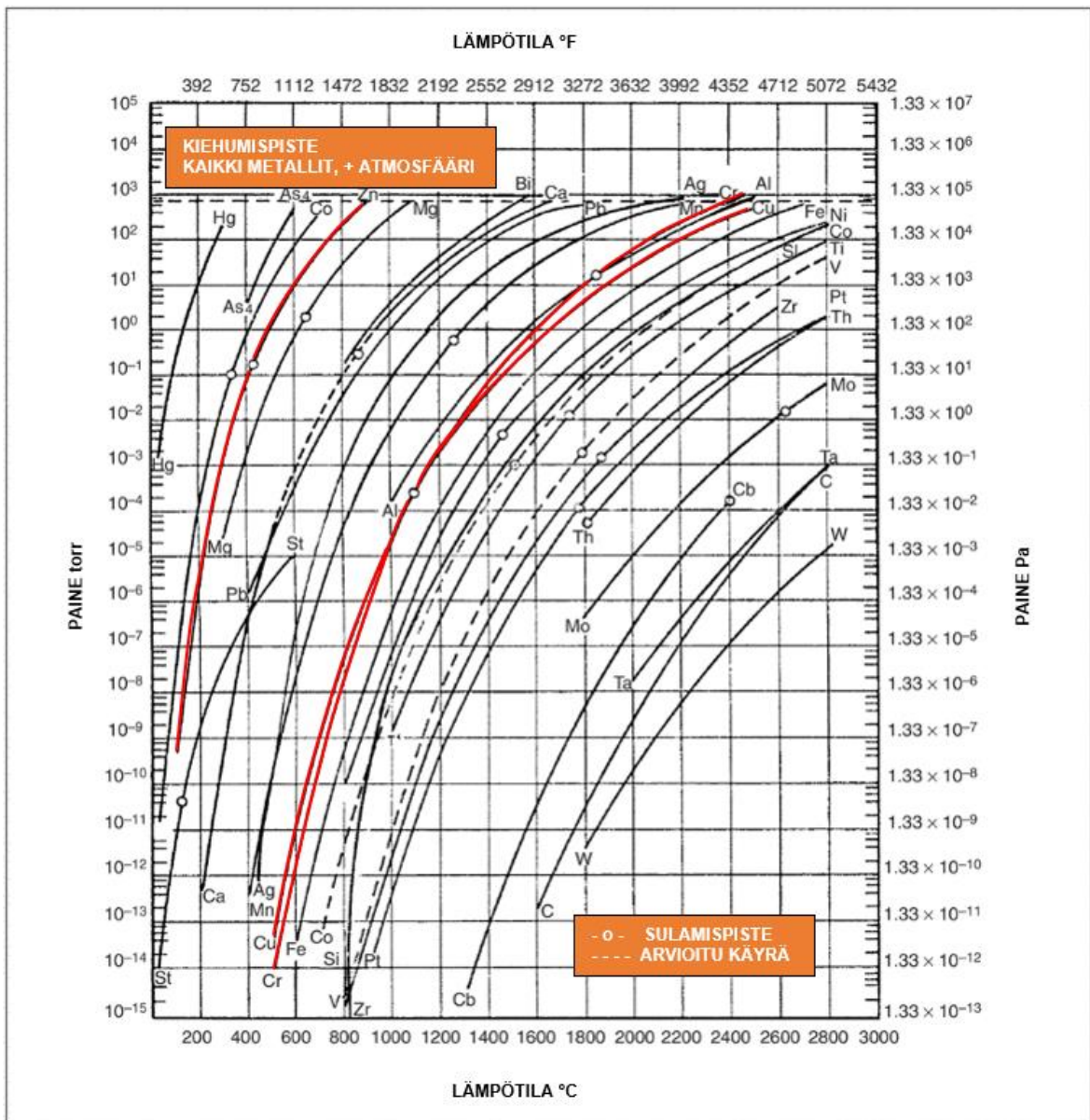
Juotos voidaan suorittaa myös tyhjöissä, jolloin uunista poistetaan ympäröivä kaasuatmosfääri ja sitä kautta myös oksidoitumista aiheuttava happi. Tyhjöatmosfääri on erityisen sopiva silloin kun juotetaan materiaaleja, jotka reagoivat helposti suojakaasujen kanssa. Taulukossa 2 on esitetty määrittelyt tyhjötasolle juotosprosessissa.

Taulukko 2. Tyhjöatmosfäärien luokitus (Linde AG 2023)

Tyhjötaso	Painealue		Happimolekyylien määrä m ³ alueella
	[Pa]	[mbar]	
Ilmakehän paine	10 ⁵	10 ³	5,6x10 ²⁴
Karkeatyhjö	10 ² –10 ⁵	1–10 ³	5,6x10 ²¹
Hienotyhjö	10 ⁻¹ –10 ²	10 ⁻³ –1	5,6x10 ¹⁸
Korkeatyhjö	10 ⁻⁵ –10 ⁻¹	10 ⁻⁷ –10 ⁻³	5,6x10 ¹⁴
Ultra-korkeatyhjö	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁷	<5,6x10 ¹⁴
Happimolekyylien määrä on ilmoitettu painealueen alimmassa arvossa			

Juotoksen edellyttämä tyhjötaso riippuu juotoskokoanpanon komponenteista. Karkeatyhjö on riittävä, kun juotetaan kuparisia perusmateriaaleja kupari- tai hopeajuotteilla. Perusmateriaalin muuttuessa seostamattomiin sekä matalaseosteisiin teräksiin juotosatmosfääriin vaatimus nousee hienotyhjön tasolle. Korkeaseosteiset teräkset sekä pysyviä oksideja muodostavat metallit vaativat vähimmilläänkin korkeatyhjöatmosfääriin, jotta juotos on mahdollinen (Linde AG 2023.)

Tyhjöatmosfääri ehkäisee materiaalien hapettumista juotosprosessin aikana ja hajottaa jo muodostuneita oksideja. Kuvassa 7 on esitetty metallioksidien tasapainotila lämpötilan ja juotosatmosfääriin puhtauden funktiona. Tasapainokäyrästä sopii sekä vety- että tyhjöatmosfäärien tarkasteluun. Korkea tyhjöatmosfääri ehkäisee oksidien muodostumista, mutta samalla laskee metallien höyrystymislämpötilaa. Höyrystyvät metallit aiheuttavat ongelmia prosessilaitteille sekä juotoksen laadulle. Hyvä tyhjöatmosfääri on riittävä pelkistääkseen oksidit, mutta ei höyrystä metalleja. Osapaineen avulla voidaan korkeammassa paineessa saavuttaa vähähappinen atmosfääri, joka ehkäisee oksidoitumista sekä metallien höyrystymistä. Osapaine tarkoittaa, että tyhjöatmosfääriin lisätään suojakaasua, jolloin ympäristön paine nousee, mutta kaasuseoksen haitallisten yhdisteiden määrä ei lisääny. Kuvassa 8 on esitetty metallien höyrystyminen lämpötilan ja paineen funktiona.



Kuva 8. Metallien höyrnpaineen tasapainokäyrästä (muokattu lähteestä Aspdeb & Feduska 1958, 125-128)

Höyrnpaineen tasapainokäyrät on määritetty tyhjöatmosfäärissä, mutta niitä käytetään myös osapaineatmosfääreihin. Osapaineella käyrästä ei ole tarkka, vaan metallien höyrystämiseen vaadittava kaasunpaine on korkeampi kuin tasapainokäyrästä ilmoittaa. (American Welding Society 2007.)

3.4 Perusmateriaalit

Juotos soveltuu monen tyyppisten materiaalien yhteen liittämiseen. Teräkset ovat erinomaisia perusmateriaaleja juotosprosessissa, koska niiden rakenne muodostuu vahvoista sidoksista ja näin ollen materiaalilla on korkea pintajännitys. Terästen mekaanisia ja kemiallisia ominaisuuksia voidaan muokata seostuksella ja yleisesti voidaan sanoa, että seostaminen parantaa teräksen loppukäyttöominaisuuksia, mutta hankaloittaa juotosprosessia. (Kivivuori 2016; Schwartz 2003.)

Juotoksen aikana perusmateriaali reagoi juoteaineen sekä ympäristön kanssa. Lisäksi lämpökäsittely aiheuttaa materiaalin rakenteessa sisäisiä muutoksia, jotka voivat vaikuttaa sekä lujuus- että korroosio-ominaisuuksiin. Nämä kaikki tekijät täytyy ottaa huomioon suunniteltaessa juotuskokoonpanoa sekä lämpökäsittelyprosessia. (Kivivuori 2019; Schwartz 2003.)

3.4.1 Oksidoituminen

Terässeosten komponentit muodostavat oksideja hapen kanssa ja lämpökäsittely tehostaa tätä reaktiota. Oksidoitunut pinta laskee perusmateriaalin pintajännitystä heikentäen tämän vettymiskykyä. Terästen seosaineet muodostavat erittäin pysyviä oksideja, joiden muodostumisen ehkäisy sekä pelkistäminen on hankalaa. Tämä nostaa merkittävästi juotosatmosfäärin puhtausvaatimuksia ja hankaloittaa juotosta. (Schwartz 2003.)

3.4.2 Höyrynpaine

Metallit ovat pääsääntöisesti kiinteässä olomuodossa korkeissakin lämpötiloissa, kun ympärillä vaikuttaa atmosfäärinen paine. Metallien höyrystymislämpötilat kuitenkin putoavat ympäristön paineen laskiessa. Tyhjöjuotos tapahtuu korkeassa lämpötilassa ja matalassa paineessa, mikä luo edellytykset joidenkin metallien höyrystymiselle. Tämä tulee ottaa huomioon materiaalivalinnoissa sekä prosessiolosuhteiden säädössä. (Schwartz 2003.)

3.4.3 Seostuminen

Perusmateriaalin ja juoteaineen välillä on aina reaktioita, joista osa on haluttuja, mutta toiset aiheuttavat ongelmia valmistusprosessiin sekä lopputuotteen laatuun. Perusmateriaalin eroosio, hauraat faasit juotossaumassa, diffuusion aiheuttama perusmateriaalin värjäytyminen ja uudet seokset, jotka haittaavat vettymistä ovat materiaalien seostumisesta aiheutuvia negatiivisia ilmiöitä, joiden muodostumiseen voidaan vaikuttaa materiaalivalinnoilla sekä prosessisäädöillä. (Schwartz 2003.)

3.4.4 Haurausilmiöt

Erilaiset perusmateriaalin haurausilmiöt ovat mahdollisia, jos juotosprosessin osatekijöiden yhteensopivuutta ei ole varmistettu tai prosessin pääsee haitallisia epäpuhtauksia. Vety juotosprosessin pelkistävänä suoja kaasuna voi aiheuttaa lujuusongelmia perusmateriaalissa. Vety tunkeutuu metallien rakenteeseen ja haurastuttaa sitä. Happipitoiset metallit ovat erityisen alttiita tälle ilmiölle. Vedyn reagoiessa perusmateriaalin sisältämän hapen kanssa puhutaan vetysairaudesta ja kun vety tunkeutuu metallin rakenteisiin ja saostuu raerajoille, on kyse vetyhauraudesta. Vedyn aiheuttamaa haurautta voidaan korjata lämpökäsittelyllä. (Kivivuori 2019.)

Nikkelipitoiset metalliseokset ovat alttiita rikkihauraudelle, kun rikkiä tai rikkiä sisältäviä yhdisteitä on läsnä, raerajoille muodostuu nikkelisulfideja, jotka ovat hauraita ja heikkoja. Yleinen rikkiyhdisteiden lähde on juotuskokoonpanon komponenttien valmistuksessa käytettävät voiteluaineet. Rikkiyhdisteiden aiheuttamaa materiaali haurautta ei voi korjata jälkikäteen vaan komponenttien huolellinen puhdistus ennen lämpökäsittelyä on keino ehkäistä haitallisten rikkiyhdisteiden pääsyn prosessiin. (Schwartz 2003.)

Myös fosfori muodostaa hauraita yhdisteitä, fosfideja, monien metallien kanssa. Fosfori on juoteaineissa käytetty sulamislämpötilaa laskeva komponentti ja siksi helposti läsnä juotosprosessissa. Haurausilmiön ehkäisemiseksi fosforipitoisia kuparijuotteita ei käytetä teräs ja nikkelipitoisten perusmateriaalien juottamisessa, mutta nikkelijuotteet, jotka on seostettu fosforilla, sopivat myös edellä mainituille perusmateriaaleille. (Schwartz 2003.)

3.4.5 Jännityssäröily

Ruostumaton teräs sekä nikkelseokset ovat alttiita jännityssäröilylle juotoksen aikana. Sula juoteaine tunkeutuu perusmateriaalin raerajoille heikentäen materiaali. Tämä tapahtuu perusmateriaalin hehkutuslämpötilan alapuolella, jolloin rakenteen sisäisten jännitysten sekä sulan juotteen heikentävän vaikutuksen yhteistuloksena syntyy rakenteeseen säröjä. Säröilyä voidaan välttää poistamalla rakenteiden sisäiset jännitykset ennen juotosta. (Schwartz 2003.)

4 Tyhjöjuotos

Tyhjöjuotos on uunijuotosprosessi, jossa ympäröivä kaasuatmosfääri korvataan tyhjöllä. Äärimmäisen puhtas juotosympäristö mahdollistaa haastavienkin materiaaliyhdistelmien liitokset ilman juoksuotteita tai tarvetta sauman jälkikäsitteilylle. Tyhjöjuotos on tarkasti hallittu ja automaatio-ohjattu massatuotantomenetelmä vaativille juotoskokoispanolle.

Tyhjöjuotosprosessin haasteena on kalliit investointi sekä ylläpitokustannukset. Prosessi on altis epäpuhtauksille ja asettaa korkean vaatimuksen komponenttien liitossaumojen sovitteille sekä pinnoille.

4.1 Tyhjöuuni

Tyhjöuunilaitteisto koostuu uunikammioista, tyhjöjärjestelmästä, jäähdytysjärjestelmistä sekä kaasujärjestelmistä. Kuva 9 esittelee tyhjöuunin pääkomponentteineen.

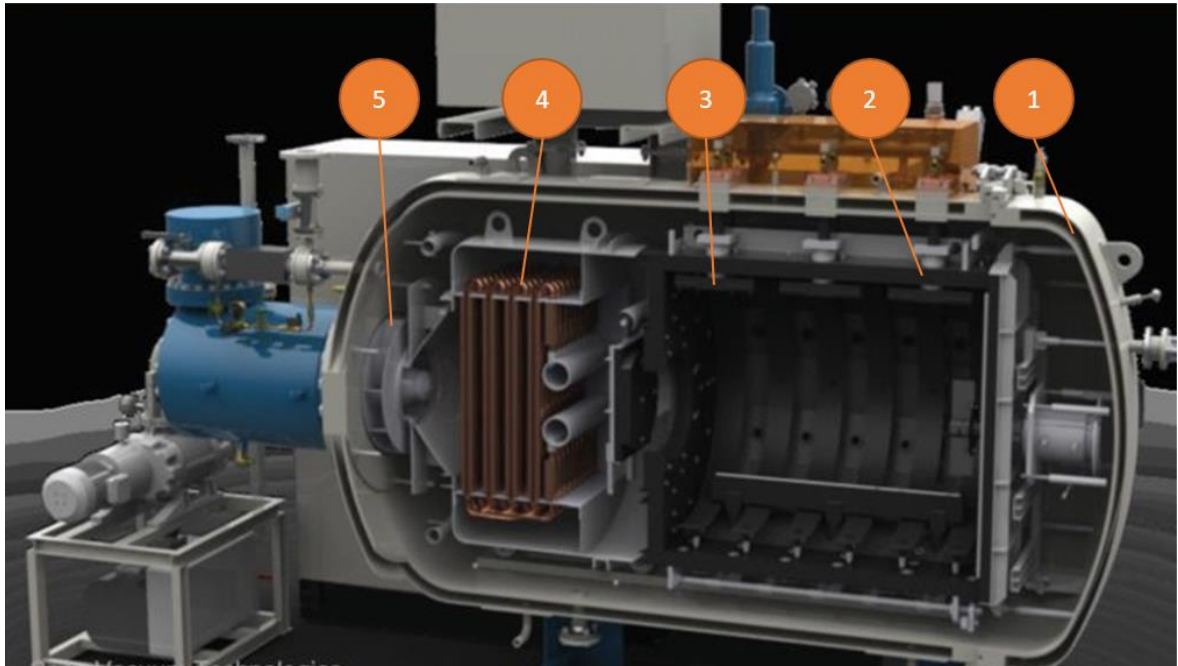


Kuva 9. Tyhjöuunin pääkomponentit: Uunikammio (1), tyhjöjärjestelmä, jossa mekaaniset pumput (3) esityhjön tuottamiseen sekä korkean tyhjötason mahdollistava diffuusiopumppu (2) varustettuna erillisellä jäähdytysjärjestelmällä (4) ja tyhjöuunin ohjausyksikkö (5)

Edellä mainittujen rakenneosien lisäksi tyhjöuunissa on useita apujärjestelmiä, kuten hydrauliiikka- sekä pneumatiikkajärjestelmät, jotka mahdollistavat pääkomponenttien toiminnan.

4.1.1 Uunikammio

Uunikammio toimii kokoonpanon runkona sekä painetta kantavana rakenteena. Kammion vaippa on toteutettu vesijäähdytteisenä kaksoisseinärakenteena. Uunikammion sisällä on eristetty juotoskammio, joka on varustettu lämmityselementeillä. Uunikammio sisältää myös tuotteiden pikajäähdytysjärjestelmään kuuluvan radiaalipuhaltimen sekä lämmönsiirtimen.



Kuva 10. Uunikammion poikkileikkaus: Vesijäähdytetty kaksoisvaipparakenne (1), eristetty juotoskammio (2), joka on varustettu lämmityselementeillä (3), sekä lämmönsiirrin (4) ja puhallin (5) (muokattu lähteestä HTT 2021)

4.1.2 Tyhjöjärjestelmä

Tyhjöjärjestelmän tarkoitus on luoda uuniin juotostapahtuman mahdollistava atmosfääri. Järjestelmä koostuu useista erityyppisistä pumpuista, jotka on kytketty toisiinsa. Primääripumput, joilla tuotetaan karkea sekä osin hieno tyhjötasot ovat mekaanisia pumppuja.

Korkean tyhjötason saavuttamiseksi tarvitaan tehokkaampia erikoispumppuja, jotka vaativat toimiakseen esityhjön. Tyhjäjärjestelmä on yleensä jaettu venttiileillä siten, että mekaaniset pumput ja korkean tyhjän erikoispumput on erotettavissa toisistaan. (Fabian 1993.)

4.1.3 Jäähdytysjärjestelmä

Nykyaikaiset tyhjöuunit on varustettu vesikiertoisella jäähdytysjärjestelmällä. Uunin vaippa sekä mekaaniset tyhjäpumput ovat osa tätä jäähdytyspiiriä. Uunin jäähdytyspiirissä on suljettu kierto, josta lämpö siirretään lämmönvaihtimen välityksellä ulkoiseen jäähdytyspiiriin. Korkean tyhjän mahdollistavat erikoispumput ovat myös vesijäädysteisiä, mutta ne ovat usein varustettu omilla jäähdytysyksiköillä. (IVA Schmetz GmbH 2016.)

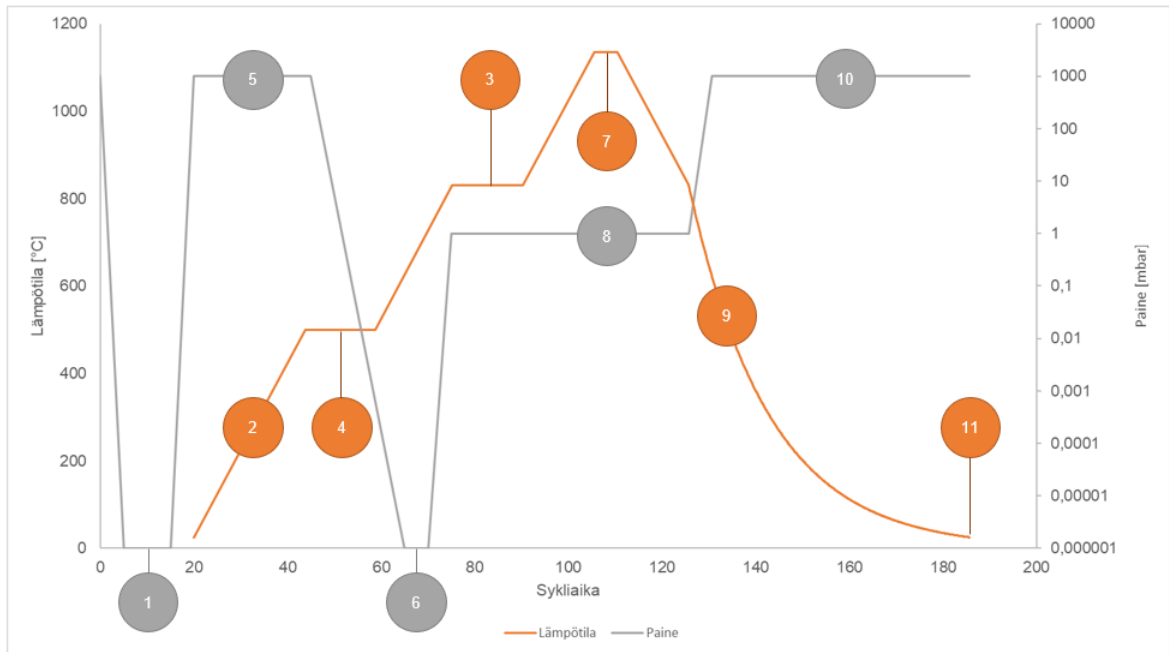
4.1.4 Kaasujärjestelmä

Tyhjöuunit on varustettu kaasun syöttöjärjestelmällä, jonka tarkoituksena on mahdollistaa osapaineen käyttö uuniatmosfäärissä sekä toimia juotoskuorman jäähdytystä tehostavana systeeminä. Jos uuniatmosfäärissä käytetään palavia kaasuja niin järjestelmän tulee olla varustettu laimennusjärjestelmällä, joka estää leimahduksen, kun kuumat kaasut pumpataan ulos uunista ilma-atmosfääriin, jossa on happea läsnä. (IVA Schmetz GmbH 2016.)

Kuorman pikajäähdytys tapahtuu syöttämällä kaasua uuniin ja kierrättämällä sitä uunikammiossa puhaltimen avulla. Jäähdytyskaasuun sitoutunut lämpö siirretään ulkoiseen vesijäähdytys piiriin uunikammiossa olevan lämmönsiirtimen avulla. (IVA Schmetz GmbH 2016.)

4.2 Tyhjöjuotosykli

Juotosyklin rakenne ja prosessiparametrit riippuvat juotoskokoontanosta, uunikuorman rakenteesta sekä käytettävästä uunityypistä. Kuvassa 11 on esitetty tyhjöjuotosyklin tyypilliset prosessivaiheet.



Kuva 11. Tyhjöjuotosprosessisykli

Tyhjöjuotos on tyypillisesti panosprosessi, jonka ensimmäisessä vaiheessa uunikuorma asetetaan uunikammion ja uuni suljetaan. Tämän jälkeen uunikammion poistetaan ympäröivä kaasuatmosfääri tyhjöjärjestelmän avulla. Luotu tyhjöatmosfääri suojaa juotostapahtuman lisäksi myös uunin rakenteita hapettumiselta ja tästä syystä uunikuorman lämmitystä ei voida aloittaa ennen riittävän tyhjötasoa saavuttamista (1). Kun asetettu tyhjötaso on saavutettu, aloitetaan uunikuorman lämmitys. Uunikuorma pyritään lämmittämään mahdollisimman tasaisesti, jotta lämpökäsittely läpi kuorman on yhtenäinen (2). Uunikuorman lämmöntasaus voidaan toteuttaa porrastamalla lämmitystä, jolloin uunin lämpötila pidetään vakiona tasausportaassa ja pitoaika säättämällä ohjataan uunikuorman lämpötilaprofiilia. Lämmön tasaus on aina hyvä tehdä hieman juotteen solidus lämpötilan alapuolella, jotta varmistetaan hallittu juotostapahtuma (3). Toinen lämmöntasausvaihe voidaan toteuttaa hieman 550 °C alapuolella (4). Tällä varmistetaan hallittu juotospastan sideaineiden poltto. Lämmitys voidaan toteuttaa myös hitaalla lämpötilan nostolla, jolloin tasausportaita ei tarvita. Tyhjöuunissa tapahtuvaa lämmönsiirtoa voidaan tehostaa lisäämällä tyhjöatmosfääriin pumppauksen jälkeen suojavaasu (0,9–1,5 bar), joka mahdollistaa konvektiivisen lämmönsiirron uunissa (5). Lämmönsiirron kannalta on edullista, jos uuni on varustettu puhaltimella, jolloin suojavaasulle saadaan pakotettu konvektio. Suojavaasu pumpataan pois uunista ennen juotoslämpötilan nostoa. Pumppauksen yhteydessä uunista poistuu muodostuneet epäpuhtaudet ja saavutetaan puhtaampi juotosatmosfääri (6). Hallitun lämpötilan noston ja tasauksen jälkeen

uunikuorman lämpötila nostetaan juoteaineen sulamislämpötila-alueen yläpuolelle. Korkeassa lämpötilassa juoteaine sulaa ja juoksee juotossaumoihin. Pitoaika juotoslämpötilassa tulisi olla mahdollisimman lyhyt, jotta vältetään lämpökäsittelyn epäedullisilta sivuvaikutuksilta (7). Korkeissa lämpötiloissa uunikammion painetta voidaan lisätä suojakaasulla, jotta vältetään metallien höyrystyminen (8). Uunikuorman saavutettua juotoslämpötila ja juotteen levittyä juotossaumaan alkaa jäähdytysvaihe. Kuorman annetaan vapaasti jäähtyä juotteen sulamislämpötilan alapuolelle ja juoteaineen kiinteydyttyä aloitetaan nopea jäähdytys (9). Nopea jäähdytys huoneenlämpötilaan suoritetaan täyttämällä uuni inertillä kaasulla korotetussa paineessa (10). Kaasua kierrätetään uunin sisällä olevan puhaltimen avulla ja kaasuun varastoitunut lämpö siirretään jäähdytyspiiriin puhaltimen yhteydessä olevan lämmönsiirtimen avulla. Kuorman jäähdytyttyä juotossykli on valmis ja panos poistetaan uunista (11). (Linde AG 2023.)

5 Lämmönsiirto tyhjöuunissa

Lämpö voi siirtyä johtumisen, konvektion sekä säteilyn avulla. Tyhjöuunin lämmitys- vaiheessa konvektiivisen lämmönsiirron mahdollistavaa väliainetta on läsnä vain rajoitetusti, jolloin lämmönsiirto perustuu pääosin säteilyyn sekä johtumiseen. Jäähdytysvaiheessa uuniin syötetään kaasuatmosfääri, jota kierrätetään puhaltimen avulla, tällöin prossissa on mukana myös konvektiivinen lämmönsiirto.

5.1 Säteily

Kappaleen pinnasta lähtevä nettosäteilylämpövirta on lähtevän kokonaissäteilyn, eksitanssi, ja ympäristöstä kappaleeseen saapuvan säteilyn, irradianssi, erotuksen sekä säteilevän kappaleen pinta-alan tulo.

$$q = A(J - G) \quad (7)$$

Jossa q kappaleen nettosäteilylämpövirta [W], A on kappaleen pinta-ala [m²], J on kappaleen lähtevä kokonaissäteily, eksitanssi [W/m²] ja G on ympäristöstä kappaleeseen saapuva säteily, irradianssi [W/m²]. (Bergman et al. 2017.)

Kappaleen lähettämä kokonaissäteily koostuu kappaleen emittoimasta säteilystä sekä ympäristöstä kappaleeseen saapuvan säteilyn edelleen heijastuvasta osuudesta.

$$J = E_e + \omega G \quad (8)$$

Jossa E_e on kappaleen emittoima säteily [W/m²] ja ω on heijastuskerroin. (Bergman et al. 2017.)

Kaikki kappaleet, joiden lämpötila on absoluuttista nollapistettä korkeampi, emittoivat lämpösäteilyä. Säteilyn voimakkuus riippuu materiaalin säteilykyvystä sekä lämpötilasta.

$$E_e = \varepsilon \sigma T^4 \quad (9)$$

Jossa on ε on kappaleen emissiviteetti, σ on Stefan-Bolzmännin vakio $5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/(m²K⁴)] ja T on kappaleen lämpötila [K]. (Bergman et al. 2017.)

Ympäristöstä kappaleeseen saapuva säteily jakautuu heijastuksen, absorptioon sekä läpäisyn osuuksiin riippuen säteilyn vastaanottavan kappaleen ominaisuuksista. Käsiteltäessä läpinäkymätöntä, diffuusia, harmaata pintaa läpäisysuhde jää pois säteilyn jakautumisytälöstä ja absorptiosuhteen sekä emissiivisyyden välille voidaan kirjoittaa yhtäsuuruus. Diffuusin harmaan kappaleen käsite tarkoittaa, että kappaleen säteilyominaisuudet ovat suunnasta tai aallonpituudesta riippumattomia. Todellisuudessa tämä oletus ei pidä paikkaansa, mutta usein käytännön laskennassa määrittely on riittävän tarkka.

$$\omega + \alpha + \tau = 1 \quad (10)$$

Jossa α on kappaleen absorptiosuhde ja τ on kappaleen läpäisysuhde. (Bergman et al. 2017.)

Tarkasteltavaan kappaleeseen vaikuttava irradianssi on kappaleen ja ympäristössä säteilevien kappaleiden välisten näkyvyyskertoimien sekä näiden eksitanssien tulojen summa.

$$G_i = \sum_{j=1}^N F_{i \rightarrow j} J_j \quad (11)$$

Jossa N on tarkasteltavaan kappaleeseen näkyvien ympäristössä säteilevien kappaleiden lukumäärä ja F on kappaleiden välinen näkyvyyskerroin. (Bergman et al. 2017.)

Näkyvyyskerroin ilmaisee tarkasteltavien pintojen välisen säteilyosuuden kappaleiden kokonaissäteilystä. Tarkasteltavan kappaleen sekä ympäristössä olevien pintojen välisten näkyvyyskertoimien summa on yksi eli kaikki kappaleesta lähtevä säteily osuu johonkin pintaan ympäristössä tai kappaleeseen itseensä, tätä kutsutaan summausehdoksi (12). Lisäksi kahden pinnan välille voidaan kirjoittaa käänteisyyslaki (13), joka kertoo, että tarkasteltavien pintojen välisten näkyvyyskertoimien ja pinta-alojen tulot ovat yhtä suuret. (Bergman et al. 2017.)

$$\sum_{j=1}^N F_{i \rightarrow j} = 1 \quad (12)$$

$$A_i F_{i \rightarrow j} = A_j F_{j \rightarrow i} \quad (13)$$

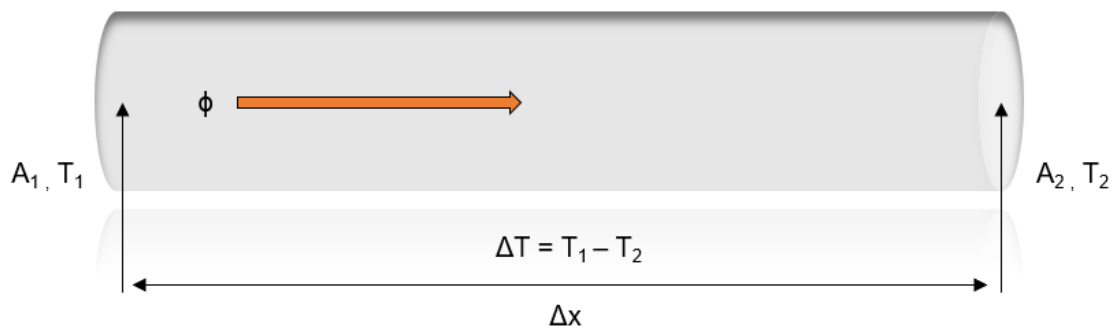
5.2 Johtuminen

Fourierin lain mukaan lämmön johtumiseen vaikuttaa materiaalin lämmönjohtavuus, lämpöä johtava poikkipinta-ala sekä lämpötilagradientti.

$$q = -\lambda A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (14)$$

Jossa q on johtuva lämpövirta [W], λ on materiaalin lämmönjohtavuus [W/(mK)], A on lämpöä johtavan kappaleen poikkipinta-ala [m²] ja $\Delta T/\Delta x$ on kappaleen lämpötilagradientti [K/m]. (Jokilaakso 1987.)

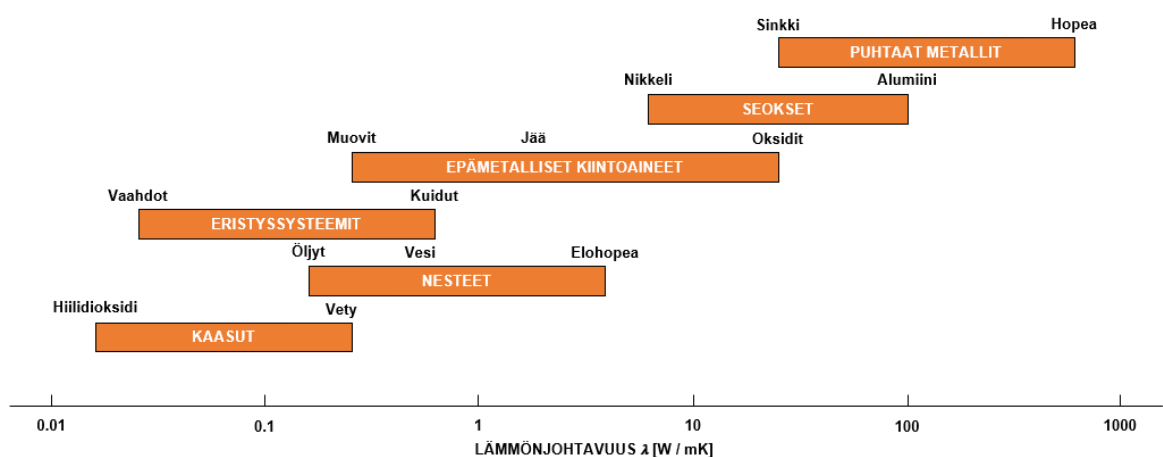
Kuvassa 12 on esitetty lämmönjohtuminen kappaleen läpi sekä lämmönsiirtotapahtumaan vaikuttavat osakomponentit.



Kuva 12. Lämmönjohtumisen osatekijät (muokattu lähteestä Jokilaakso 1987)

Johtumalla siirtyvä lämpövirta on suoraan verrannollinen osatekijöidensä muutoksiin poistettuna lämmönjohtumismatka, johon verrannollisuus on käänteinen.

Kuvassa 13 on nähtävissä aineen eri olomuotojen lämmönjohtavuusalueet.



Kuva 13. Lämmönjohtavuusalueet (muokattu lähteestä Jokilaakso 1987)

Edellä esitetyt lämmönjohtavuusalueet on ilmoitettu NTP olosuhteissa. Lämmönjohtavuus on olosuhteista riippuva ominaisuus. Tyhjöjuotoksen kannalta kiinnostavat olosuhdemuuttajat ovat paine ja lämpötila.

5.3 Konvektio

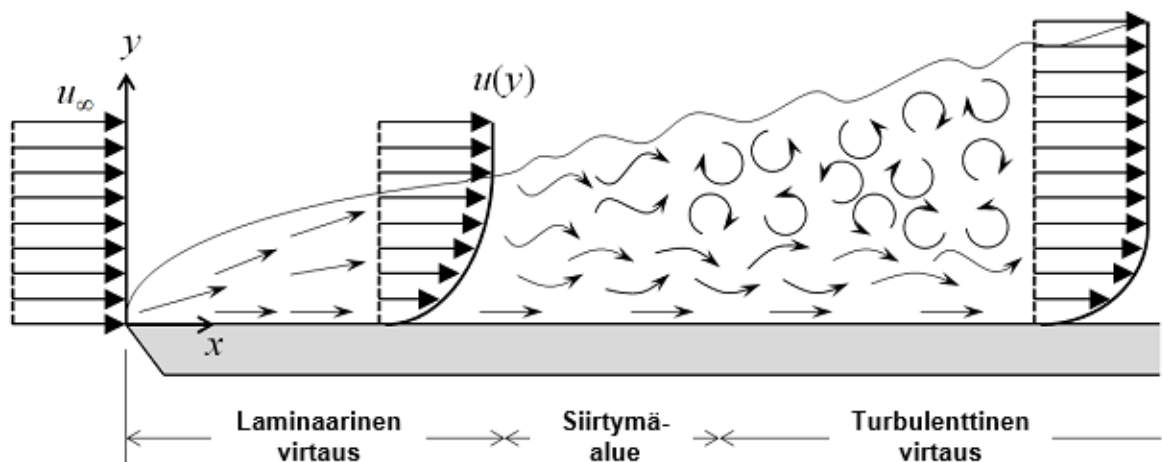
Konvektiivisessa lämmönsiirrossa lämpö siirtyy kappaleen pinnan ja mekaanisesti liikkuvan fluidin välillä. Lämmönsiirto yksittäisten partikkelien välillä tapahtuu johtumalla, mutta väliaineen mukana siirtyvä energia hallitsee lämmönsiirtotapahtumaa. Konvektion matemaattisissa mallissa yhdistyvät aineensiirtoa sekä lämmönjohtumista kuvaavat peruslait.

$$q = hA\Delta T \quad (15)$$

Jossa q on konvektiivinen lämpövirta [W], h on konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$], A on lämmön lähteen pinta-ala [m^2] ja ΔT on lämmön lähteen ja väliaineen lämpötilaero [K]. (Fagerholm 1986.)

Konvektio voi olla joko vapaata tai pakotettua. Vapaassa konvektiossa lämpöä siirtävän väliaineen virtaus syntyy tiheyseroista aineen sisällä, kun taas pakotetussa konvektiossa virtaus saadaan aikaan ulkoisella voimalla.

Virtauksen luonne vaikuttaa konvektiivisen lämmönsiirron tehokkuuteen. Laminaarinen virtaus on yhdensuuntaista, jolloin virtauksen poikkisuunnassa ei tapahdu sekoittumista. Tämän seurauksena lämmönsiirto laminaarisen virtauksen rajakerroksessa tapahtuu pääosin johtumalla. Turbulenttisessa virtauksessa tapahtuu virtausta myös poikkisuunnassa, jolloin rajakerroksen lämmönsiirto tehostuu. Kuvassa 14 on esitetty laminaarisen ja turbulenttisen virtauksen virtausprofiilit. (Fagerholm 1986.)



Kuva 14. Virtausprofiilit (muokattu lähteestä Fagerholm 1986)

Virtauksen rajakerros on alue, jolla virtausnopeus muuttuu virtauksen poikkileikkauksessa. Yhtälö 16 kuvaa väliaineen sekä virtauksen ominaisuuksien vaikutusta konvektiiviseen lämmönsiirtokertoimeen, kun lämmönsiirto tapahtuu johtamalla rajakerroksen läpi.

$$h \sim \frac{\lambda}{\delta} \quad (16)$$

Jossa h on konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$], λ on väliaineen lämmönjohtavuus [$\text{W}/(\text{mK})$] ja δ on virtauksen rajakerroksen paksuus [m]. (Fagerholm 1986.)

Taulukossa 3 esitetyt konvektiivisen lämmönsiirron kertoimet antavat käsityksen suuruusluokasta sekä riippuvuussuhteista.

Taulukko 3. Konvektiivinen lämmönsiirto (muokattu lähteestä Fagerholm 1986)

Lämmönsiirtotapahtuma	Lämmönsiirtokerroin h [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
Vapaa konvektio	3,5–50
Pakotettu konvektio, ilma	10–500
Pakotettu konvektio, neste	100–5000

Lämmönsiirron tehokkuus moninkertaistuu pakotetussa konvektiossa. Lisäksi neste on kaasua tehokkaampi lämmönsiirron väliaine.

6 Loval Oy juotettavat tuotteet ja tyhjöjuotosprosessi

Tässä kappaleessa käsitellään Lovalin juotettavien lopputuotteiden ominaisuuksia sekä tyhjöjuotosprosessiin liittyviä yrityskohtaisia materiaali- ja valmistusmenetelmävalintoja, jotka vaikuttavat koko liitostapahtuman toiminnallisuuteen.

6.1 Juotettavat lopputuotteet

Loval Oy:n valmistamat lopputuotteet voidaan jakaa kolmeen pääryhmään. Lämmönsiirtimet-tuoteryhmä pitää sisällään kaikki putki- sekä levylämmönsiirrinsovellukset. Sähkölämmittimet-tuoteryhmään kuuluu putkivastustekniikkaan pohjautuvat lämmitysovellukset ja erikoisjuotokset-tuoteryhmään lopputuotteet, jotka hyödyntävät erityisesti tyhjöjuotosta valmistustekniikkana.

Levylämmönsiirtimet on valmistettu muotoon puristetuista teräs- sekä kuparilevystä, jotka vuorotteleva levylämmönsiirrinpaketissa. Tyhjöjuotoksessa kuparilevyt sulavat ja sitovat teräslevyt toisiinsa muodostaen lämmitys- ja jäähdytyskanaviston lämmönsiirtimeen. Levylämmönsiirtimien kansilevyt on varustettu lämmönsiirtokanavistojen liityntäyhteillä, joiden avulla lämmönsiirrin saadaan kytkettyä jäähdytys- ja lämmityspiiriin.

Putkilämmönsiirtimet rakentuvat yksittäisestä teräsputkesta tai -putkipaketista, jonka päihin juotetaan liityntäyhteet. Kuvassa 15 on nähtävissä Loval Oy:n erilaiset lämmönsiirrinratkaisut.



Kuva 15. Loval Oy:n valmistamia lämmönsiirrinsovelluksia

Sähkölämmittinratkaisut ovat yksinkertaisimmillaan yksittäisiä suoria putkivastuksia. Korkeamman jalostusarvon sähkölämmitysovellukset muodostuvat usean putkivastuksen

elementtipaketeista, jotka on juotettu lämmitinrunkorakenteisiin ja varustettu erilaisilla säätö- sekä ohjausjärjestelmillä.

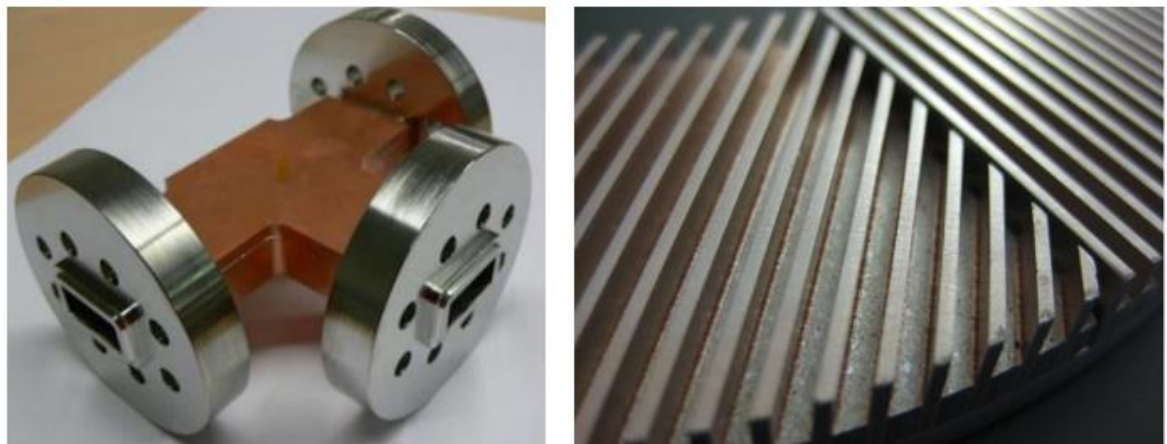
Sähkölämmittimet voidaan toteuttaa, joko suoralla tai epäsuoralla lämmityksellä. Suorassa lämmityksessä putkivastus on kontaktissa lämmitettävän väliaineen kanssa, kun taas epäsuorassa lämmityksessä lämpö siirretään lämmittimen runkorakenteen kautta väliaineeseen.

Sähkölämmityssovellusten pysyvät liitokset tehdään juottamalla. Kuvassa 16 on esitelty Loval Oy:n sähkölämmitysratkaisuja erilaisilla jalostusasteilla sekä lämmönsiirtotavoilla.



Kuva 16. Loval Oy:n valmistamia sähkölämmityssovelluksia

Erikoisjuotokset pitävät sisällään monenlaisia lopputuotteita, joissa hyödynnetään tyhjöjuotostekniikan tarjoamia mahdollisuuksia. Kuvassa 17 on nähtävillä tyypillisiä erikoisjuotoksia, jotka voidaan toteuttaa tyhjöjuotostekniikalla.



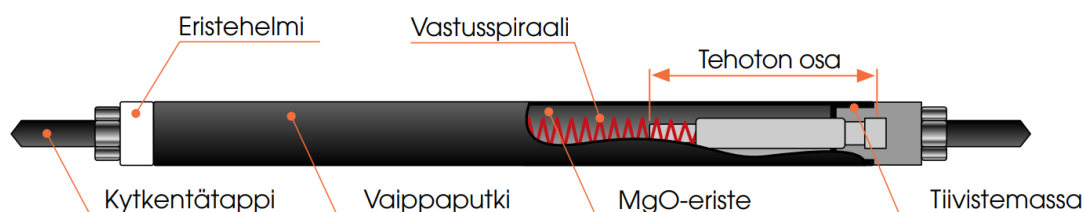
Kuva 17. Loval Oy:n valmistamia erikoisjuotoksia

Tyhjöjuotoksen etuina on mahdollisuus liittää erilaisia materiaaleja toisiinsa sekä toteuttaa monimutkaisia juotossaumarakenteita, joiden liitospinta ei rajaudu ainoastaan reuna-alueille. Tyhjöjuotos on puhdas prosessi, joka ei vaadi jälkikäsittelyä juotoksen jälkeen.

6.1.1 Putkivastus

Loval Oy:n valmistamat sähkölämmitysovellukset pohjautuvat putkivastustekniikkaan. Putkivastus on rakenteeltaan erittäin luja ja kestävä, se sietää hyvin mekaanista rasitusta ja selviytyy moitteettomasti vaativissakin käyttöolosuhteissa.

Putkivastuksen rakenne sekä rakenteelliset komponentit käy ilmi kuvasta 18 Putkivastus rakentuu lämpöä tuottavan vastusspiraalin ympärille. Runkona sekä suojaavana kuorena toimii vaippaputki. Jännitteellinen vastusspiraali ja metallinen vaippaputki on erotettu toisistaan magnesiumoksidieristeen avulla. Vastusspiraalin päihin on liitetty kytkentätapit, jotka muodostavat putkivastuksen tehottoman osan sekä mahdollistavat sähköisen kytkennän. Putkivastuksen päät on varustettu eristehelmillä ja tiivistetty kosteudelta suojaavalla massalla.

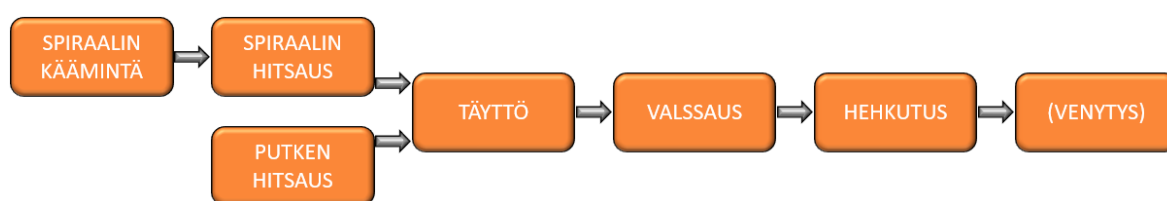


Kuva 18. Putkivastuksen rakenne (Loval Oy 2023d)

Putkivastuksessa sähkövirran energia muuttuu lämmöksi resistanssin vaikutuksesta. Jännitteeseen kytketyn putkivastuksen läpi kulkee sähkövirta, joka on syöttöjännitteen sekä lämmityselementin resistanssin osamäärän suuruinen. Vastusspiraalissa muodostunut lämpö siirtyy magnesiumoksidieristeen läpi putkivastuksen vaippaan ja siitä edelleen ympäristöön joko kuljettamalla, säteilemällä tai johtamalla. (Loval Oy 2023d.)

Kuva 19 esittelee putkivastuksen valmistuksen prosessikaavion muodossa. Tuotantoprosessi alkaa vastusspiraalin valmistuksella. Tämä prosessivaihe pitää sisällään spiraalin kääminnän sekä kytkentätappien hitsauksen vastusspiraalin päihin. Spiraalin valmistuksen kanssa saman aikaisesti aloitetaan myös vaippaputken valmistus. Nämä edellä mainitut putkivastuksen osakomponentit kohtaavat täyttövaiheessa, jossa vastusspiraali asennetaan vaippaputken sisään ja komponenttien välinen ilmatila täytetään magnesiumoksidilla. Täyttöprosessin viimeisessä vaiheessa putkivastuksen päät suljetaan muovitulpilla, jotta jauhemainen magnesiumoksidi ei valu ulos lämmittimestä. Täytön jälkeen putkivastuksen rakenne tiivistetään valssilla. Puristamalla putkivastusta kasaan säteen suunnassa sen kokonaistilavuus

pienenee ja rakenteen tiheys kasvaa, tämä parantaa magnesiumoksidin sähköistä eristyskykyä sekä lämmönsiirto-ominaisuuksia. Valssilla muokkauslujittunut rakenne palautetaan alkuperäiseen tilaan lämpökäsittelyllä. Hehkutus korkeassa lämpötilassa pehmentää kovettuneen ja hauraan vaippaputken, jonka jälkeen putkivastuksen taivutus lopulliseen muotoonsa on jälleen mahdollista. Tosinaan valmistusprosessissa muodostuva luonnollinen lämmityselementin pituushajonta ei ole hyväksyttävä vaan valmistusprosessia täydennetään venytysvaiheella. Venytyksessä putkivastus vedetään mekaanisesti haluttuun loppupituuteen, jolloin saavutetaan parempi mittatarkkuus. (Arola 2018; Juntunen 2010.)



Kuva 19. Putkivastuksen valmistus, prosessikaavio

Putkivastuksen rakenteelliset komponentit sekä valmistusprosessi tuovat mukanaan haasteita myös juotostapahtumaan, jossa lämmityselementti on läsnä. Putkivastuksen rakenteessa eristeenä ja lämmönjohteena käytetty magnesiumoksidi on hygroskooppinen ja sitoo itseensä kosteutta. Rakenteeseen sitoutunut kosteus vapautuu lämpökäsittelyn aikana ja heikentää uuniatmosfääriin suojaavaa vaikutusta.

Putkivastuksen valmistusprosessi pitää sisällään lämmityselementin teräsvaipan voimakasta kylmämuovausta, jota seuraa ylimääräinen lämpökäsittelyn tarve. Suojakaasusta huolimatta lämpökäsittely aiheuttaa vaippaputken oksidoitumisen mikä voimistuu teräksen seostusasteen kasvaessa. Pintojen oksidoitumista aiheuttavan hapen lisäksi hehkutusuuniin kulkeutuu voiteluöljyä putkivastuksen kylmämuovauksesta sekä muovia, joka tulee lämmityselementtien päiden suojatulpista. Nämä lämpökäsittelyyn kulkeutuvat orgaaniset yhdisteet palavat prosessissa epätäydellisesti ja aiheuttavat putkivastuksen nokeutumisen valmistusprosessin aikana.

6.2 Juotosprosessi

Loval Oy:n lopputuotteiden pysyvät liitokset tehdään kovajuottamalla. Käytössä olevia juotosmenetelmiä on useita, mutta valtaosa toteutetaan tyhjöjuotoksena. Juotosprosessissa

on kolme päätekijää, perusmateriaali, juote sekä atmosfääri, joiden summana juotostulos muodostuu. Lopputuotteen vaatimukset ohjaavat ensisijaisesti valintoja, joten usein joudutaan toimimaan juotoksen kannalta epäedullisia yhdistelmiä.

6.2.1 Pintakäsittely

Lämmityssovellusten komponentit pestään ennen juotosta, jotta valmistuksen sekä kuljetuksen aikana käytettävät orgaaniset apu- ja suoja-aineet saadaan poistettua pinnoilta ennen juotosta. Lovalilla komponentit puhdistus perustuu vesipohjaiseen suihkupesuteknologiaan, jota tehostetaan emäksisellä pesuaineella.

Putkivastusten juotospinnat hiotaan ennen juotosta. Hionta poistaa putkivastuksen pinnalle muodostuneen oksidin sekä orgaaniset epäpuhtaudet. Tämän lisäksi hionnan karhentama putkipinta on juotoksen kannalta edullinen.

6.2.2 Perusmateriaalit

Lämmönsiirtosovelluksen käyttöympäristö sekä -lämpötila ohjaavat juotettavan rakenteen materiaalivalintoja. Aktiiviset lämpöpinnat ovat kovemman ympäristörasituksen alaisena kuin rakenteen kylmät komponentit, joten usein sähkölämmityssovelluksissa putkivastuksen vaippaputkimateriaaliksi valitaan seostetumpaa terästä kuin lämmittimen runkorakenteisiin.

Seostamattomat sekä niukkaseosteiset teräkset sopivat käyttökohteisiin, joissa ympäristö ei ole aggressiivinen ja lämpötilat pysyvät maltillisina. Seostaminen parantaa teräksen käytettävyyttä lämmityssovelluksissa. Pääosin kromi- ja nikkelseosteiset austeniittiset ruostumattomat teräkset soveltuvat haastavampaan ympäristöön sekä korkeampiin lämpötiloihin kuin seostamattomat teräkset ja ovat näin ollen yleisesti käytetty materiaali monessa käyttökohteessa. Kaikkein vaativimmissa olosuhteissa sekä äärimmäisissä lämpötiloissa runsas seosteiset nikkelseokset ovat oikea materiaalivalinta. (Loval 2023b; Loval 2023c.)

Seostamalla saadaan vahvistettua teräksen ominaisuuksia, mutta tyhjäjuotoksen näkökulmasta tämä lisää haasteita prosessiin. Ruostumattomien terästen sekä nikkelseosten seosaineet muodostavat äärimmäisen pysyviä oksideja, joiden pelkistäminen tai hajottaminen on hankalaa. Taulukossa 4 on esitetty Lovalin käyttämiä rakennemateriaaleja.

Taulukko 4. Loval Oy:n juotettavissa lämmityssovelluksissa käytettävät terässeokset (Loval 2023d)

VAIPPAPUTKI MATERIAALI	SEOSTAMATON TERÄS	RUOSTUMATON TERÄS	HAPONKESTÄVÄ TERÄS	TULENKESTÄVÄ TERÄS	NIKKELISEOS INCOLOY 800	NIKKELISEOS INCOLOY 825	TITAANI
DIN NORMI	EN 1.0330	EN 1.4301	EN 1.4404	EN 1.4828	EN 1.4876	EN 2.4858	EN 3.7025
KOOSTUMUS							
Cu	–	–	–	–	–	2.3 %	–
C	0.10 %	0.05 %	0.03 %	0.05 %	0.05 %	0.03 %	–
Si	–	0.5 %	0.5 %	2 %	0.5 %	0.3 %	–
Cr	–	18 %	17 %	20 %	21 %	21 %	–
Ni	–	9 %	13 %	12 %	32 %	42 %	–
Mo	–	–	2.5 %	–	–	–	–
Fe	LOPUT	LOPUT	LOPUT	LOPUT	LOPUT	LOPUT	–
Al	–	–	–	–	0.4 %	–	–
Ti	–	–	–	–	0.4 %	1 %	99.5 %
OMINAISUUDET							
Lämpötilankesto	400 °C	750 °C	750 °C	850 °C	950 °C	600 °C	400 °C
Korroosionkesto	+	++	+++	++	+++	++++	+++++
Työstettävyyys	+++++	++++	++++	++++	++	++	+
Materiaalihinta	+++++	++++	++++	++++	++	++	+

Seostettujen terästen pintaan muodostuva kromioksidi on mahdollista hajottaa pelkistävässä kaasuatmosfäärissä tai korkeassa tyhjiössä sekä lämpötilassa, mutta nikkelseosten pintaan muodostuvat titaani- ja alumiinioksidit ovat äärimmäisen pysyviä.

6.2.3 Juoteaineet

Lovalin tyhjiöjuotossovellusten pysyvät liitokset toteutetaan joko kupari- tai nikkelijuotteilla. Kupari on ensisijaisesti käytetty juoteaine ja sitä on saatavilla sekä pastana että kiinteässä muodossa. Lähes puhdas hapeton kupari on sitkeä juoteaine, joka täyttää liitossauman hyvin, mutta kuparijuotteen käyttöä rajoittaa suhteellisen alhainen höyrystymis- sekä käyttölämpötila. (Juntunen 2010.)

Nikkelijuotetta käytetään, kun sovellukselta vaaditaan äärimmäisiä korroosio-ominaisuuksia tai lämpötilan kestoja. Lovalilla käytössä oleva nikkelijuote on seostettu kromilla sekä fosforilla, mikä parantaa juotteen korroosionkestoja ja laskee sen sulamispistettä. Nikkelijuote on kova, hauras ja kriittinen juotossauman välykselle. Nikkelijuotetta on käytössä ainoastaan pastana mikä rajoittaa jossain määrin sen käytettävyyttä. (Juntunen 2010.)

6.2.4 Juotosatmosfääri

Valittu juoteaine vaikuttaa myös tyhjöuunin atmosfääriin. Kuparijuotoksessa haluttu atmosfääri haetaan mekaanisten tyhjäpumpujen sekä uunikammioon syötettävän typen osapaineen avulla. Mekaanisilla tyhjäpumpuilla luodaan uunikammioon $1 \cdot 10^{-1}$ mbar – $1 \cdot 10^{-2}$ mbar alipaine, joka nostetaan noin 600 °C lämpötilassa 1 mbar: iin typpikaasun avulla. Nostamalla uunikammion painetta suojakaasun avulla pyritään välttämään juoteaineen höyrystyminen.

Nikkelijuotoksissa tyhjöuneissa ei ole osapainetta, vaan uunikammioon pyritään saavuttamaan mahdollisimman korkea tyhjötaso onnistuneen juotostuloksen takaamiseksi. Nikkelijuotokseen soveltuvan atmosfäärin saavuttamiseksi käytetään diffuusiopumpulla varustettua tyhjöjärjestelmää, jolla saavutetaan $1 \cdot 10^{-4}$ mbar – $1 \cdot 10^{-5}$ mbar alipaine.

6.2.5 Juotos sykli ja uuninohjaus sekä uunikuorman rakenne

Tyhjöjuotos sykli lähtee liikkeelle tyhjön pumppauksella uunikammioon, kun vaadittu tyhjötaso on saavutettu, aloitetaan uunikuorman lämmitys. Lämpötila nostetaan noin 50 °C juotteen sulamispisteen alapuolelle, minkä jälkeen kuorman lämpö tasataan. Uunikuorman lämpötilaprofiilia tasoitetaan tarvittaessa myös ylimääräisillä tasausportilla lämpötilan nostovaiheen aikana. Lisäksi lämpötilan nostonopeus on muuttuja, jonka avulla voidaan vaikuttaa kuorman sisäisiin lämpötilaeroihin. Juotos syklin ensimmäisen lämpötilan nostovaiheen ohjausprofiilit vaihtelevat Lovalilla osastoittain ja ne perustuvat empiirisiin juotoskokeisiin, joita on tehty yleisimmillä osaston juotoskuormakokoonpanoilla.

Tasausvaihetta seuraa lämpötilan nosto juotosalueelle, mikä on noin 50 °C juotteen sulamispisteen yläpuolella. Korkealla lämpötila alueella uunin painetta nostetaan tarvittaessa, typpikaasun avulla, jotta vältetään helposti höyrystyvien metallien haihtuminen uuniatmosfääriin.

Juotoslämpötila ylläpidetään, kunnes koko kuorma on ylittänyt juotteen sulamislämpötilan. Tämän jälkeen lämmitys katkaistaan ja kuorman lämmön annetaan laskea vapaasti juotteen sulamispisteen alapuolelle. Kun juote on jälleen kiinteää, aloitetaan tehostettu jäähditys typpikaasulla.

Tyhjöuunien juotossyklejä ohjataan termoparien avulla. Juotoskuormassa voi olla useita termopareja, mutta vain yhtä voidaan käyttää uunin ohjaukseen. Ohjaukseen käytetty termopari sijoitetaan juotoskuorman kylmimpään kohtaan, joka on empiirisesti määritetty. Uunikammiossa on myös kiinteä lämpötila-anturi, joka ohjaa uuniin tehonsyöttöä. Uunikuormaan sijoitettu anturi taas ohjaa syklivaiheen kestoa.

Uuneja voidaan myös ohjata ainoastaan uunikammiossa olevan kiinteän lämpötila-anturin avulla, mutta tällöin kuormarakenteen sisäinen lämmönsiirtyminen täytyy tuntea. Tällä ohjausmallilla syklivaiheiden kesto perustuu uuniohjelman asetusarvoihin.

Tyhjöuunin uunikuormat rakennetaan yleensä valurakenteisille uunipohjille, joiden päälle tuotteet kasataan erilaisia profiiliteräksiä tukirakenteina käyttäen. Suurille tuotantomäärille on käytössä myös grafiittisia sekä hiilikuituisia juotostukia.

Uunikuorman kokoa rajoittavat uunikammion fyysiset mitat sekä kuorman kokonaisuudessa. Lovalin tyhjöuunien kammiodien hyötytilavuudet vaihtelevat $0,77\text{ m}^3$ – $2,2\text{ m}^3$ välillä ja suurimmat sallitut juotoskuorman massat asettuvat 1500 kg – 2500 kg välille. (IVA Schmetz GmbH 2016.) Kuva 20 esittelee erilaisia Lovalilla käytössä olevia juotoskuormarakenteita.



Kuva 20. Loval Oy:n juotoskuormakokoonpanoja

Profiiliteräksen käyttö juotoskuorman rakenteessa tuo ylimääräistä lämmitettävää massaa tyhjöuuniin. Lisäksi teräsvalmisteiset tukirakenteet muuttavat muotoaan korkean lämpötilan ja kuorman painon vaikutuksesta. Vääntyneet tukirakenteet hankaloittavat juotoskuorman kasausta.

7 Tyhjöjuotosprosessin tehostamispotentiaali

Kirjallisuustutkimuksen sekä asiakasyrityksen tyhjöjuotosprosessin lähtöselvityksen pohjalta tarkasteltiin muuttujia sekä toimenpiteitä, joiden avulla Lovalin tyhjöjuotosprosessia olisi mahdollista tehostaa. Tarkastelussa on pyritty huomioimaan lopputuotteiden teknisten vaatimusten sekä käytössä olevan konekannan asettamat rajoitteet sekä kasvavan tuotantovolyymin tarjoamat uudet mahdollisuudet.

7.1 Tyhjöjuotoksen pääkomponentit

Valmistettavien lopputuotteiden ja valitun juotosmenetelmän vaatimukset ohjaavat vahvasti perusmateriaalien, juoteaineiden sekä juotosatmosfääriin valintoja. Näiden tekijöiden optimoinnilla voidaan vaikuttaa juotosprosessin tehokkuuteen, mutta kaikki muutokset tyhjöjuotoksen pääkomponenteissa vaativat joko lopputuotteiden uudelleen verifiointia tai kattavaa muutosten ja prosessiyhteensopivuuden välistä tarkastelua.

7.1.1 Perusmateriaalit

Perusmateriaalien valinnalla voidaan vaikuttaa rakenteen juotettavuuteen ja sitä kautta juotosprosessin saantoon. Lovalin käyttämät lopputuotteiden rakennemateriaalit ovat pääosin austeniittisia ruostumattomia teräksiä sekä nikkelseoksia, jotka korkean pintajännityksensä vuoksi sopivat erinomaisesti juotettavaksi perusmateriaaliksi. Materiaalien korkea seostusaste voi jossain määrin hankaloittaa juotosprosessia, mutta mekaaninen oksidin poisto juotettavilta pinnoilta sekä yrityksessä käytössä oleva juotosmenetelmä vaimentavat tämän ongelman hyväksyttävälle tasolle. Näin ollen rakennemateriaalien muutoksilla ei kirjallisuus- ja prosessitarkastelun pohjalta ole löydettävissä selkeää tehostuspotentiaalia.

Rakennemateriaalien määrään optimoinnilla sen sijaan voidaan nähdä tehostusmahdollisuus myös juotosprosessin kannalta. Keventämällä lopputuotteiden rakennekomponentteja, koko juotettavan uunikuorman massa laskee, jolloin myös sen lämmitysenergiantarve pienenee.

Tämä tuotesuunnittelullinen rakenne- ja valmistusmenetelmien optimointi voi olla perusteltu myös komponenttikustannusten näkökulmasta.

Tuotantomäärien kasvaessa lopputuotteiden rakennekomponentteja ei ole välttämätöntä valmistaa standardiaihioista vaan räätälöidyt rakenteet sekä valmistusmenetelmät ovat suurille valmistuserille kilpailukykyinen vaihtoehto. Lovalin valmistamien virtauslämmittimien suunnittelupaineet ovat yleensä verrattain matalia (noin 5 bar), joten esimerkiksi säiliöiden vaippamateriaalia on näissä tapauksissa mahdollista keventää vaarantamatta lopputuotteen rakenteellista lujuutta. Tällä hetkellä säiliöiden vaippana käytettyjen putkien materiaalivahvuus määräytyy ensisijaisesti lujuusvaatimusten mukaan, mutta saatavilla olevien standardiputkien mitoitus ohjaa myös vahvasti materiaalivalintaa. Suuret tuotantomäärät mahdollistavat räätälöidyt putkikoot ja materiaalivahvuudet, jotka on optimoitu käyttökohteisiin sopiviksi. Lovalin matalan käyttöpaineen volyymsäiliöiden seinämänvahvuus on pienimmillään 1,2 mm ja tästä voidaan kokemusperäisen arvion mukaan tinkiä vielä noin 15 % ilman merkittäviä vaikutuksia lopputuotteen tai komponentin valmistettavuuteen ja tuotteen riittävät lujuusominaisuudet säilyttäen. Pelkästään rakennelujuuden näkökulmasta suurempikin optimointi voi olla mahdollinen, mutta vaikutukset säiliön vaippaputken valmistettavuuteen sekä lopputuotteiden kasausprosessiin täytyy myös huomioida analyysiyhtälössä.

Lämmityssovelluksissa käytetyn putkivastuksen rakenteen optimointi on myös keino laskea uunikuorman lämmitysenergiantarvetta. Loval valmistaa putkivastusten vaippaputket itse ja käyttää pienemmissä putkihalkaisijoissa (halkaisija 7,5 mm) 0,4 mm seinämän vahvuutta. Tämä materiaalivahvuus on siis todettu toimivaksi sekä valmistusprosessissa että loppukäyttösovelluksissa. Paksummat lämmityselementit (halkaisija 10 mm) on kuitenkin valmistettu 0,5 mm vaippamateriaalista, yhdenmukaistamalla materiaalivahvuudet voidaan saavuttaa jopa 20 % materiaalisäästö, joka näkyy suoraan myös tyhjöjuotoksessa lämmitettävän kuorman massan laskuna. Seinämän vahvuuden pienentäminen tosin nostaa magnesiumoksidin määrää putkivastuksessa mikä osaltaan vaimentaa materiaalioptimoinnin hyötyä, koska magnesiumoksidi vaatii terästä enemmän energiaa lämmitäkseen. Lisäksi todellisen hyödyn arvioinnissa täytyy huomioida muutosten vaikutus valssivenymään. Putkimateriaalin venymä heikkenee seinämän ohentumisen myötä, mikä laskee saavutettavaa hyötypotentiaalia.

Toisaalta kiinnostava tutkintalinja voisi olla myös 8,5 mm lämmityselementin mahdollinen korvaaminen pienemmällä 6,4 mm elementtihalkaisijalla, jolloin materiaali- ja lämmitysenergiantarve pienenee vielä entisestään. Tässä tarkastellussa täytyy kuitenkin huomioida

muutosten vaikutukset lopputuotteen lämmönsiirto-ominaisuuksiin. Lämmönsiirto pinta-alan pienentäminen nostaa lämmityselementin rakenteen lämpötilaa, millä on eksponentiaalinen vaikutus sen elinikään (Juntunen 2010). Lisäksi lämmitettävän väliaineen ominaisuudet voivat rajoittaa lämmityselementin pintalämpötilaa.

Perusmateriaalien määrän optimoinnin vaikutukset täytyy arvioida tuotekohtaisesti tai tuotepuheittain vaatimustenmukaisuus, toiminnallisuus ja kokonaiskannattavuus huomioiden.

7.1.2 Juoteaineet

Juoteaineiden valinnalla voidaan vaikuttaa juotoslämpötilaan ja sitä kautta myös uunikuorman lämmitysenergiatarpeeseen. Uunikuorman lämmitysenergiatarve muodostuu kuorman massan, ominaislämpökapasiteetin sekä lämpötilan muutoksen tulosta (Arola 2018).

$$E = mc\Delta T \quad (17)$$

Juoteaineen osuus koko uunikuorman massasta on erittäin pieni, joten mahdollinen juoteainemuutos vaikuttaa ainoastaan energiantarpeenytälön lämpötilatekijään tai vaikutus muihin tekijöihin on lähes olematon.

Kokonaan uuden juoteaineen hakeminen on raskas prosessi, mutta mielenkiintoinen optimointitehtävä voisi olla yrityksessä jo käytössä olevien juoteaineiden käytön tarkastelu. Näiden toiminnallisuudesta prosessissa sekä käytettävyydestä lopputuotteissa löytyy valtavasti yrityksen sisäistä kokemusperäistä tietoa, mikä helpottaa lopputuotteiden uudelleen verifiointia.

Lovalin käyttämän nikkeliuotteen sulamisalue on yli 100 °C astetta alhaisempi kuin kupariuotteen. Lisäksi nikkeliuote mahdollistaa ja vaatii kuparia korkeamman tyhjöatmosfäärin käytön juotoksessa, mikä on edullinen, liitettäessä korkeasti seostettuja teräksiä, joiden muodostaman oksidikerroksen poistaminen prosessin aikana on hankalaa.

Korvaamalla kupariuote nikkelillä voidaan liitettävän kokoonpanon juotoslämpötilaa laskea ja samalla parantaa juotoksen onnistumisen edellytyksiä. Kuparijuotoksessa kuorman lämpötilan muutos on noin 1100 °C astetta, mikä tarkoittaa, että siirryttäessä nikkeliuotokseen kuorman lämmitysenergian tarve putoaa noin 10 %.

Lopputuotteiden materiaalimuutokset vaativat aina tapauskohtaisen arvioinnin, mutta yleisesti tarkasteltuna kuparijuotteen korvaaminen nikkelillä parantaa loppuotteen korroosion sekä lämpötilan kestoja. Nikkelijuote on kova, hauras ja kriittinen juotossauman välykselle, joten lujuusominaisuuksia vaativissa sovelluksissa tämä täytyy ottaa huomioon. (Juntunen 2010.)

Nikkelijuotteen hinta on noin kolminkertainen kuparijuotteeseen verrattuna mikä osaltaan vaimentaa lämmityksen tarpeen muutoksesta saatavaa mahdollista kokonaishyötyä. Tarkemmassa hyödyn arvioinnissa tulee lisäksi huomioida prosessilämpötilan muutosten vaikutukset juotostapahtuman lämmönsiirtoon sekä tyhjötason noston vaikutus prosessin kokonaisenergiankulutukseen sekä läpimenoaikaan.

7.1.3 Juotosatmosfääri

Tyhjöjuotoksessa käytettävän osapaine- ja jäähdytyskaasun optimoinnilla voi olla prosessia suoraan sekä välillisesti tehostavia vaikutuksia. Loval käyttää tällä hetkellä prosessikaasunaan tyyppiä, joka on edullinen ja verrattain turvallinen vaihtoehto. Kaasu ei ole täysin inertti, mutta toimii moitteettomasti käytössä olevilla juotoskokoönpanojen materiaaliyhdistelmillä.

Pelkistävän vedyn käyttö tyhjöjuotoksen prosessikaasuna mahdollistaa tehokkaamman oksidinpoiston perusmateriaalin pinnoilta, mikä edesauttaa juotoksen onnistumista. Prosessi muutoksen välillinen tehostusvaikutus voisi olla mekaanisen oksidinpoiston tarpeen poistuminen. Kirjallisuudesta löytyy lisäksi viitteitä vetykaasun käytön edullisista vaikutuksista uunikuorman jäähdytysvaiheen tehostuksessa (Linde AG 2023, 25).

Helposti syttyvän vedyn käyttö korkeissa lämpötiloissa kasvattaa mahdollista turvallisuusriskiä ja luo lisävaatimuksia prosessin hallintaa. Toisaalta yrityksessä käytössä olevat tyhjöuunit on varustettu vedyn käytön mahdollistavilla turvajärjestelmillä, joten tämä ei ole ainaakaan konekannan näkökulmasta rajoittava tekijä.

Vedyllä on myös taipumus haurastuttaa metalleja, joten tämä täytyy huomioida tarkastelussa. Lovalin juotoskokoönpainossa vedyn reaktiivisuus ei ole ongelma, sillä yrityksen muissa uunijuotosmenetelmissä vetyä on käytetty suojakaasuna jo vuosikymmeniä ilman materiaalien haurausongelmia. Tyhjöjuotoksen kannalta on kuitenkin huomioitava vedyn

mahdolliset reaktiot grafiitti- ja hiilikuiturakenteiden kanssa, koska näitä materiaaleja käytetään tyhjöuunin sekä uunikuormien rakenteissa.

Vetykaasu on merkittävästi typpikaasua arvokkaampaa, mikä vaimentaa prosessimuutoksen mahdollista tehokkuushyötyä ja on tärkeä huomioitava tekijä, kun arvioidaan mahdollista kaasumuutoksen tarjoamaa kokonaisyötyä.

7.2 Konvektiivinen lämmönsiirto

Tyhjöuunin lämmitysvaiheessa ei yleensä ole konvektiivisen lämmönsiirron mahdollistavaa väliainetta läsnä. Tämä tarkoittaa, että lämpö siirtyy säteilynä uunin sekä kuorman välillä ja kuorman sisällä säteilemällä ja johtumalla. Lämmönsiirtoa on mahdollista tehostaa lisäämällä tyhjöuunin lämmitysvaiheeseen suojakaasu, joka mahdollistaa konvektiivisen lämmönsiirron. Tämä voi olla yksi tekijä, jolla mahdollistetaan tehokkaampi lämmitysvaiheen toteutus sekä tasaisempi tuotelaatu.

Uunikuorman koon kasvaessa lämmönsiirron merkitys uunikuorman sisällä saa entistä suuremman roolin. Lämpötilaerot kuormarakenteen sisällä kasvavat ja aiheuttavat haasteita juotosprosessiin. Epätasainen juotteen sideaineiden palaminen uunikuormassa voi aiheuttaa orgaanisten epäpuhtauksien sitoutumisen juotossaumoihin ja korkeat lämpötilaerot johtavat epätasaiseen juotostulokseen. Lämpötilaerojen tasaaminen vaatii lämmityksen hidastamista tai tasausportaita lämmitysvaiheeseen, jotka hidastavat juotosprosessia.

Konvektiivisen lämmönsiirron mahdollistava järjestelmä ei ole tyhjöuunien vakiovaruste vaan se täytyy erikseen hankkia. Järjestelmän asentaminen vanhoihin uuneihin vaatii laajoja rakenteellisia muokkauksia, joten tämä tehostusvaihtoehto on todellinen ainoastaan uusien uuni investointien kohdalla. Lovallilla käytössä olevat tyhjöuunit eivät tue konvektiivisen lämmönsiirron mahdollisuutta, mutta tulevaisuuden investointeihin tämä voi olla kiinnostava vaihtoehto.

7.3 Uunikuorman rakenne

Uunikuorman rakenteellisilla valinoilla voidaan vaikuttaa juotosprosessin tehokkuuteen. Kuormarakenteen muutoksia on mahdollista toteuttaa ilman, että lopputuotteen

ominaisuudet tai prosessilaitteiden toiminnalliset vaatimukset muuttuvat, jolloin vältetään kalliit laiteinvestoinnit sekä hankalat tuotteiden uudelleen verifiointi prosessit.

Loval käyttää tuotannossaan kahden tyyppisiä uunikuormarakenteita. Teräsprofiileista ja valtusta uunipohjasta koostuva kuorman rakenne on edullinen ratkaisu, joka mukautuu helposti eri kokoisille ja muotoisille lopputuotteille. Tällä rakenteella kasattu juotoskuormat ovat kuitenkin raskaita ja massiiviset profiiliteräkset hankaloittavat hyötykuorman sijoittelua tehokkaasti. Runkorakennerratkaisu ei myöskään tue korkeiden kuormarakenteiden kasaamista, sillä välipohjan muodostaminen uunikuormaan on monimutkaista. Lisäksi teräsrakenteet muuttavat muotoaan lämmön sekä kuorman painon vaikutuksesta, mikä hankaloittaa kuormien kasaamista ja on jossain määrin riski myös työturvallisuuden kannalta.

Yrityksen käyttämä modernimpi vaihtoehto on grafiitti- ja hiilikuituvalmisteinen kuormarunko, joka on kevyempirakenteinen ja mahdollistaa tehokkaamman tuotesijoittelun kuormassa. Grafiitti- ja hiilikuiturakenne säilyttää muotonsa sekä lujuusominaisuutensa korkeissa lämpötiloissa terästä paremmin, mikä luo edellytykset kevyempien runkorakenteiden käytölle sekä suuremmille uunikuormille. Tämän rakenteen heikkous teräsrakennetta merkittävästi korkeampi hankintakustannus sekä tuotespesifimpi käytettävyys.

Korvaamalla teräksiset runkorakenteet grafiitti- ja hiilikuiturakenteilla voidaan uunikuormien kokoa kasvattaa ja hyötykuorman osuutta lisätä. Näillä molemmilla on edullinen vaikutus juotostapahtuman tehokkuuteen.

7.3.1 Uunikuorman koko

Tyhjöjuotoksen lämmitysvaiheessa lämmönsiirto uunin ja juotettavan kuorman välillä tapahtuu säteilemällä. Lämmönsiirron tehokkuuteen vaikuttaa rakenteiden säteilyominaisuudet, kuinka säteilevät pinnat näkevät toisensa sekä pintojen välinen lämpötilaero. Säteilyominaisuudet ja prosessilämpötilat määräytyvät rakennemateriaalien sekä prosessiolosuhteiden perusteella, jolloin näihin vaikuttaminen on rajallista.

Pintojen väliseen näkyvyyskertoimeen voidaan vaikuttaa säteilevien pintojen pinta-ala muutoksella. Uunin säteilevien rakenteiden pinta-ala on vakio, mutta uunikuorman fyysistä kokoa muokkaamalla voidaan vaikuttaa sen pinta-alaan ja sitä kautta pintojen väliseen näkyvyyskertoimeen.

Kasvattamalla uunikuorman säteilyä vastaanottavaa pinta-alaa uunikammion ja uunikuorman välinen näkyvyyskerroin kasvaa eli kammion lähtevä lämpösäteily kohtaa tehokkaammin kuorman ja vastaavasti heikentää uunikammion lähtevää itseensä kohdistuvaa säteilyn osuutta. Toki samaan aikaan uunikuormasta kammionpintaan absorboituvan lämpösäteilyn määrä kasvaa, mutta koska uunikuorma on valtaosan lämmitysajasta uunikammion viileämpi ja säteilylämpöteho voimakkaasti lämpötilariippuvainen, tällä kuormasta absorboituvan säteilyn osuuden kasvulla on pienempi vaikutus, kun uunikammion itseensä absorboituvan lämpösäteilyn laskulla. Kokonaisuutena muutos laskee uunikammioon absorboituvaa lämpösäteilyä, jolloin kammion pinnasta lähtevä nettolämpösäteily kasvaa ja lämmönsiirto uunin ja kuorman välillä tehostuu.

Uunikammion rakenteet vaativat myös energiaa lämmitäkseen, tämä energia voidaan ajatella lämmittimen hukkana. Tämän häviöenergian prosenttiosuus pienenee, kun uunikuorman koko ja sitä kautta myös syötetyn lämmitysenergian määrä kasvavat.

Todellisuudessa tyhjöuunin ja uunikuorman välinen lämmönsiirto on monimutkainen tapahtumasarja, johon vaikuttaa myös kuorman sisällä tapahtuva lämmönsiirto. Uunikuorman sisäisen rakenteen sekä fyysisen koon ja prosessin lämmönsiirron välisten riippuvuussuhteen tarkempi määrittely vaatii lämmönsiirtotapahtuman mallinnuksen tai käytännön kokeita. Edellisen kuvauksen perusteella voidaan kuitenkin arvioida, että tyhjöuunin energiatehokkuus paranee uunikuorman fyysisen koon kasvaessa.

7.3.2 Hyötykuorman osuus

Hyötykuorman osuuden kasvatus uunikuormassa parantaa saantoa, jolloin juotosprosessi tehostuu. Tämä muutos on suoraan verrannollinen tuotantotehokkuuteen ja kääntäen verrannollinen prosessin energiakulutukseen.

Hyötykuorman osuuden ja tuotantotehokkuuden välinen riippuvuussuhde voidaan esittää yhtälön 18 avulla. Tyhjöuunista hyötykuormaan siirtyvä lämpöteho on uunin syötetyn ja siitä edelleen uunikuormaan siirtyvän lämpötehon sekä uunikuorman sisältämän hyötykuorman osuuden tulo.

$$\eta P_{\text{syöttö}} x = \frac{E_{hk}}{t} = P_{hk} \quad (18)$$

Juotosprosessin lämmitysvaiheen energiatehokkuuden ja hyötykuorman osuuden välinen yhteys voidaan johtaa edellä esitetystä yhtälöstä. Tyhjöuunin lämmitystehon hyötysuhteen ja uunikuorman sisältämän hyötykuorman osuuden tulon käänteisluku kertoo uunikuorman lämmityksen energiatehokkuuden eli kuinka paljon syötettävää lämmitysenergiaa tarvitaan, jotta hyötykuormaan saadaan sidottua yhden energiayksikön verran energiaa.

$$\frac{1}{\eta_x} = \frac{P_{\text{syöttö}} t}{E_{hk}} = \frac{E_{\text{syöttö}}}{E_{hk}} \quad (19)$$

Uunikuorman rakenteelliset muutokset vaikuttavat lähes aina myös lämmitysvaiheen lämmönsiirtotapahtumaan. Tämä tarkoittaa, että uunikuorman sisältämän hyötykuorman osuuden muuttuessa myös uunin syötettävä teho ja tyhjöuunin lämmitystehon hyötysuhde muuttuvat.

8 Lisätutkimus ja koeajot

Jatkoselvityksen osalta tutkimusta rajattiin siten, että lopputuotteiden teknisiin ominaisuuksiin vaikuttavat muuttujat jätettiin tarkastelun ulkopuolelle, koska nämä tekijät ovat vuosien saatossa hioutuneet toimivaksi kokonaisuudeksi ja mahdolliset muutokset vaativat pitkällistä tuotetestausta tai olemassa olevien prosessilaitteiden muutoksia. Esiselvityksen pohjalta päädyttiin tutkimaan tarkemmin kuormarakenteiden vaikutuksia tyhjöjuotoksen lämmitysvaiheen tehokkuuteen. Kuormarakenteen vaikutusta lämmitysenergian tarpeeseen ja hyötykuorman osuuteen selvitettiin uunikuorman rakenneanalyysillä ja koeajojen avulla tarkasteltiin rakennemuutosten vaikutusta tyhjöuuni lämpöhäviöihin.

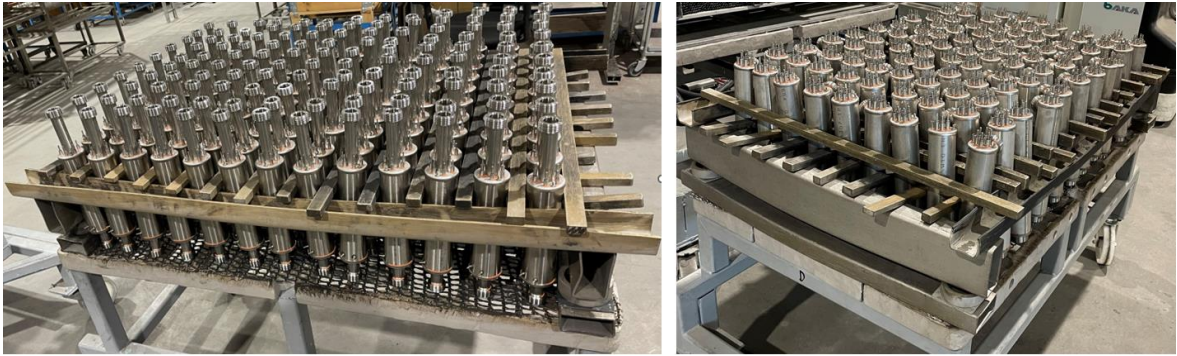
8.1 Uunikuorman rakenneanalyysi

Lisätutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa selvitettiin uunikuormatyyppien välisiä rakenteellisia eroja sekä näiden vaikutusta kuorman laskennalliseen lämmitysenergian tarpeeseen. Rakennevertailuun valikoitui yrityksen perinteinen uunikuormarakenne, jota verrattiin nykyaikaisista rakennemateriaaleista valmistettuun moderniin kuormarakenteeseen.

8.1.1 Uunikuormatypit

Rakenneanalyysi toteutettiin kahdelle uunikuormatyypille. Näistä ensimmäinen edustaa vanhaa ja yrityksessä laajasti käytössä olevaa kuormarakennetta, jota on hyödynnetty tyhjöjuotosteknologian käyttöönotosta saakka. Vertailurakenteena käytettiin modernia kuormatyyppiä, jonka tarjoamaa hyötypotentiaalia ei vielä yrityksessä tarkasti tunneta.

Teräsrakenteinen yksikerros uunikuorma edustaa perinteistä kuormarakennetta, joka koostuu aukotetusta valuteräs pohjasta sekä erilaista profiiliteräspalkeista, joiden varaan hyötykuorma on kasattu. Tämä kuormarakennetyyppi on esitetty kuvassa 21.



Kuva 21. Uunikuormat perinteisellä teräsrunkorakenteella

Tarkastelussa käytetty vaihtoehtoinen uunikuormatyyppe on hiilikuitu- ja grafiittirunkoinen kaksikerroksinen uunikuormarakenne, joka rakentuu umpinaiselle grafiittilevypohjalle. Tässä modernimmassa rakennetyypissä hyötykuorman tuenta on toteutettu tuotteiden mukaan muotoilluilla hiilikuitulevyillä, joita kannattelevat kuorman kulmiin sijoitetut grafiittitolpat. Hiilikuitu- ja grafiittirunkoinen uunikuorma on esitetty kuvassa 22.



Kuva 22. Uunikuormat hiilikuitu- ja grafiittirunkorakenteella

8.1.2 Hyötykuorma

Tutkimuksessa tarkasteltujen uunikuormatyyppeiden hyötykuormat koostuivat kuparijuotettavista virtauslämmittimistä. Tämä valittu lämmitintyyppi on Loval Oy:n merkittävimpiä tyhjäjuotettavia myyntiartikkeleja, jolloin tutkimuskuormat edustavat kattavasti yrityksen tyhjäjuotostuotantoa. Tämän lisäksi valinta mahdollisesti koeajojen toteutuksen normaalin tuotannon rinnalla, mikä oli edellytys niiden toteutumiselle.

Perinteisiä teräsrakenteisia uunikuormia tarkasteltiin tutkimuksessa kahdella erilaisella hyötykuormalla. Kuvassa 21 on kuorman rakennetyypin lisäksi esitetty myös hyötykuormana käytetyt virtauslämmittimet, vasemmalla tuote 1 ja oikealla tuote 2. Kuvassa 22 on hiilikuitu- ja grafiittirunkoinen kuormatyyppi, jossa vasemmalla hyötykuormana tuote 1 ja oikealla tuote 3. Taulukossa 5 on esitetty hyötykuormana käytettyjen virtauslämmittimien perustietoja, joita on käytetty rakenneanalyysin laskelmissa.

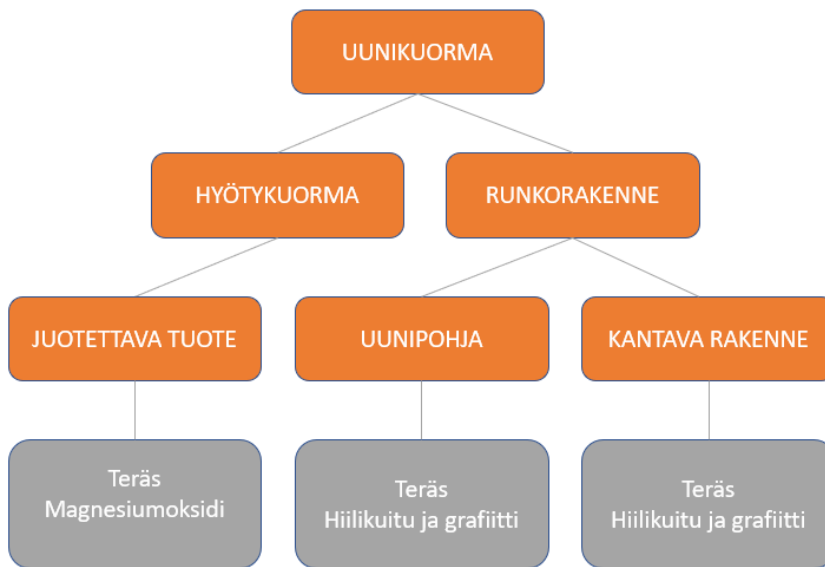
Taulukko 5. Hyötykuorman perustiedot

	Tuote 1.	Tuote 2.	Tuote 3.
Tuotteen rakennemateriaali	Ruostumaton teräs		
Tuotteen juoteaine	Kupari		
Putkivastuksia tuotteessa [kpl]	3	3	3
Putkivastuksen halkaisija [mm]	6,4	8,5	6,4
Putkivastuksen vaipan seinämän vahvuus [mm]	0,4	0,5	0,4
Putkivastuksen pituus [mm]	858	538	1105

Hyötykuormana käytetyt tuotteet 1 ja 2 ovat runkokoolta identtiset, mutta tuotteen 2 toinen liityntäyhde on asemoitu säiliön säteen suuntaisesti, kun tuote 1 liityntäyhde on sijoitettu säiliön vaipan akselin suuntaisesti. Lisäksi tuote 2 vastuselementin geometria on erilainen. Tuote 3 on rakenteeltaan tuote 1 kaltainen, mutta säiliön halkaisija on suurempi ja lämmitävä vastuselementti pidempi. Nämä hyötykuorman rakenteelliset erot vaikuttavat tuotteiden lämmitysenergian tarpeeseen sekä sijoittelun tehokkuuteen uunikuormassa.

8.1.3 Menetelmät ja välineet

Rakenneanalyysissä uunikuorman komponentit jaettiin kahteen osaan, hyötykuormaan sekä runkorakenteeseen. Hyötykuormaa edustavat juotettavat lopputuotteet ja runkorakenne pitää sisällään uunikuorman koossapitävät komponentit. Hyötykuorman rakenteesta eroteltiin magnesiumoksidin sekä teräksen osuudet, koska niiden ominaislämpökapasiteetit poikkeavat merkittävästi toisistaan. Runkorakenteista taas eriytettiin uunipohja, koska sen osuus on merkittävä suhteessa kokonaiskuormaan. Lisäksi jaottelussa huomioitiin myös rakennemateriaalien poikkeavat lämmönvarastointiominaisuudet. Kuvassa 23 on kaavioesitys juotuskuorman rakennekomponenttien jaosta.



Kuva 23. Uunikuorman rakennekomponenttien jaottelu

Rakennekomponenttien määrittelyn lisäksi juotoskuormista mitattiin ääri­mitat, näiden tietojen pohjalta laskettiin uunikuorman tilavuus, tiheys sekä lämpöä vastaanottava pinta-ala. Uunikuorman tilavuutta ja massaa verrattiin tyhjuunin kantokykyyn sekä hyötytilavuuteen.

Uunikuormien rakenneosuuksien määrittely suoritettiin pääosin punnitsemalla, raskaat kappaleet mitattiin punnitsevilla haarukkavaunulla ja kevyemmät hyötykuorman komponentit pöytävaakalla. Kuvassa 24 on esitelty punnituksissa käytetty mittauskalusto. Vasemmalla on haarukkavaunu ja oikealla teollisuusvaaka.



Kuva 24. Uunikuorman punnitusvälineistö

Raskaiden kappaleiden punnituksessa käytetty haarukkavaunu on tyypiltään Ravas RHW-21. Haarukkavaunun kantokyky on 2000 kg ja näytön tarkkuus 1 kg. Mittaustoleranssi 0,1 % punnittavasta kuormasta. Kevyempien kappaleiden punnitukseen käytetty teollisuusvaaka on tyypiltään Kern EOB 60K20L. Pöytävaa'an kantokyky on 60 kg ja näytön tarkkuus 20 g. Mittaustoleranssi laitteella on +/- 40 g.

Hyötykuorman sisältämän magnesiumoksidin osuus selvitettiin laskemalla. Tuotekohtainen magnesiumoksidin määrä saatiin laskemalla juotettavassa tuotteessa olevan vastuselementin sisätilavuus. Massan määrittelyssä on käytetty magnesiumoksidille tiheyttä $3,1 \text{ g/cm}^3$, joka on laadukkaan putkivastuksen tyypillinen oksiditiheys (Arola 2018).

$$m_{MgO} = \pi(r - s)^2 L K_t K_k \rho_{MgO} \quad (20)$$

Jossa m_{MgO} on uunikuorman sisältämä magnesiumoksidin määrä [kg], r on putkivastuksen säde [m], s on putkivastuksen seinämänvahvuus [m], L on yksittäisen putkivastuksen pituus [m], K_t on putkivastusten määrä juotettavassa tuotteessa [kpl], K_k on juotettavien tuotteiden määrä uunikuormassa [kpl] ja ρ_{MgO} magnesiumoksidin tiheys putkivastuksessa $3100 \text{ [kg/m}^3]$.

Rakennekomponenttien massaosuuksien selvityksen jälkeen laskettiin rakenteiden lämmittämiseen tarvittavat energiamäärät.

$$E = \frac{mc\Delta T}{3600} \quad (21)$$

Joissa E on uunikuorman tarkasteltavan komponenttien laskennallinen lämmitysenergian tarve [kWh], m on tarkasteltavan komponentin massa [kg], c on tarkasteltavan komponentin ominaislämpökapasiteetti [kJ/(kgK)] ja ΔT on lämpötilan muutos [K]. (Arola 2018.)

Laskennassa käytettiin lämpötilan muutokselle arvoa 1100 K, joka edustaa kuparin juotoslämpötilan ja prosessitilassa vallitsevan huonelämpötilan erotusta. Ominaislämpökapasiteetille taas käytettiin taulukossa 6 esitettyjä arvoja.

Taulukko 6. Kuormarakenteiden ominaislämpökapasiteetit (Ala-Outinen 1996; Toyo Tanso 2023a; Toyo Tanso 2023b)

Materiaali	Ominaislämpökapasiteetti c [kJ/kgK]
Teräs	0,5-0,75 (0 - 1100 °C)
Hiilikuitu ja grafiitti	0,75-1,75 (0 - 1100 °C)
Magnesiumoksidi	1,0

Teräkseen sitoutuva lämpöenergian määrä on noin puolet hiilikuituun ja grafiittiin sekä magnesiumoksidiin sitoutuvasta energiamäärästä, kun kappaleiden massa sekä lämpötilan muutos on identtinen. Materiaalin ominaislämpökapasiteetti muuttuu lämpötilan funktiona, mutta laskennassa käytettiin vakioarvoja, teräkselle arvoa 0,5 kJ/kgK ja hiilikuidulle, grafiitille sekä magnesiumoksidille arvoa 1,0 kJ/kgK.

Lämmitysenergiantarpeen määrittämisen jälkeen laskettiin uunikuorman tilavuus (22) tiheys (23) sekä uunikuorman lämpöä vastaanottava pinta-ala (24). Näissä määrittämissä uunikuormaa käsiteltiin suorakulmaisena särmiönä.

$$V = hwd \quad (22)$$

Jossa V on uunikuorman tilavuus [m^3], h on uunikuorman korkeus [m], w on uunikuorman leveys [m] ja d on uunikuorman syvyys [m].

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (23)$$

Jossa ρ on uunikuorman tiheys [m^3/kg], m on uunikuorman massa [kg] ja V on uunikuorman tilavuus [m^3].

$$A = 2hw + 2hd + 2wd \quad (24)$$

Jossa A uunikuorman lämpöä vastaanottava pinta-ala [m^2], h on uunikuorman korkeus [m], w on uunikuorman leveys [m] ja d on uunikuorman syvyys [m].

8.2 Tyhjöuunin lämmitysvaiheen tehokkuus

Rakenneanalyysin jälkeen koeajokuormat juotettiin tyhjöuunissa. Juotosprosessin lämmitysvaiheesta määritettiin uunin kuluttama lämmitysenergianmäärä sekä lämmitysaika.

Rakenneanalyysin sekä koeajotietojen perusteella tarkasteltiin lämmitysprosessin tehokkuutta eri kuormatyypeillä.

8.2.1 Menetelmät ja välineet

Juotoskokeissa käytettiin IVA Schmetz GmbH valmistamaa tyhjöuunia, joka on tyypiltään I 180/1H 80x120x80 2RH (kuva 25). Uuni hyötytilavuus on $0,768 \text{ m}^3$ ja se kantaa 1500 kg juotoskuorman. Laite on varustettu 180 kW lämmitysteholla, mikä on toteutettu sähkökäyttöisillä lämmitysvastuksilla.



Kuva 25. Koeajouuni

Koeajouuni on pienempi kahdesta Loval Oy:n käyttämästä tyhjöuunimallista ja se käyttää osapainekaasuna sekä kuorman pikajähdytyksessä typpeä.

Uunin lämmitysvastuksessa sähköenergia muutetaan lämpöenergiaksi, joten lämmityselementeille syötetty sähköteho vastaa niiden tuottamaa lämpötehoa. Sähköenergiantuottoon liittyvät riippuvuus suhteet taas noudattavat Ohmin ja Joulen lakeja.

Tyhjöuunin lämmitysvaiheeseen käyttämä energia määritettiin mittaamalla uunin lämmittimien syöttövirtaa. Kuvassa 26 on esitetty syöttövirran mittausjärjestelmä koeajossa.



Kuva 26. Tyhjöuunin syöttövirran mittaus

Mittaukseen käytettiin Hioki CM4375-90 pihtimittaria, joka oli kytketty uunin lämmityksen yhden vaiheen syöttökaapeliin. Virtamittari tallensi mittaustulokset kolmen minuutin sykleissä ilmoittaen keskiarvon ajanjaksolla.

Tyhjöuunin lämmitysvaiheen tehokkuuden tarkastelu aloitettiin määrittämällä tyhjöuunin todellinen lämmitysteho mittapisteissä.

$$P_{mp} = \sqrt{3}UI_v \quad (25)$$

Joissa P_{mp} on tyhjöuunin todellinen lämmitysteho mittauspisteessä [W], U on uunin pääjännite [V] ja I_v on uunin syöttökaapelista mitattu vaiheen sähkövirta mittauspisteessä [A] (Loval 2023e).

Mittauspisteiden lämmitystehon määrittämisen jälkeen selvitettiin energiankulutus koko lämmitysvaiheen aikana. Ensin laskettiin lämmitysenergiankulutus mittapisteissä.

$$E_{mp} = P_{mp} \frac{t_s}{1000} \quad (26)$$

Joissa E_{mp} on tyhjöuunin kuluttama lämmitysenergian määrä mittauspisteessä [kWh], P_{mp} tyhjöuunin todellinen lämmitysteho mittauspisteessä [W] ja t_s on mittauspisteen sykli aika [h].

Laskemalla yhteen mittapisteiden energiankulutukset koko lämmitysvaiheen aikajaksolla saatiin todellinen lämmitysenergiankulutus juotossyklin aikana.

$$E_{syöttö} = \sum E_{mp} \quad (27)$$

Jossa $E_{syöttö}$ on tyhjöuunin todellinen lämmitysenergiankulutus juotosyklin aikana [kWh] ja E_{mp} on tyhjöuunin kuluttama lämmitysenergian määrä mittauspisteessä [kWh].

Tyhjöuunin lämmitysenergiankulutuksen ja lämmitysvaiheeseen käytetyn ajan perusteella sekä rakenneanalyysien tulosten avulla määritettiin tyhjöuunin lämmitysvaiheen tehokkuutta kuvaavat suureet.

$$\eta P_{syöttö} x = \frac{E_{hk}}{t} = P_{hk} \quad (28)$$

Jossa η on uunikuorman siirtyvän lämpöenergian osuus, $P_{syöttö}$ on tyhjöuuniin syötetty lämpöteho [kW], x on hyötykuorman osuus uunikuormassa, E_{hk} on hyötykuorman laskennallinen lämmitysenergian tarve [kWh], t on lämmitysvaiheeseen käytetty aika [h] ja P_{hk} on hyötykuorman siirtyvä lämpöteho [kW].

9 Tulokset

Tässä osiossa on esitetty uunikuormien rakenneanalyysien sekä juotoskoeajojen keskeisimmät tulokset. Osion kuvaajissa sekä taulukoissa teräsrakenteisesta uunikuormatyypistä käytetään merkintää A ja grafiitti- sekä hiilikuiturakenteisesta merkintää B. Kuormarakenteen tyyppimerkintää seuraa numero (1-3), joka kertoo rakenteessa mukana olleen hyötykuorman. Hyötykuorman tarkempi kuvaus löytyy kappaleesta 8.1.2.

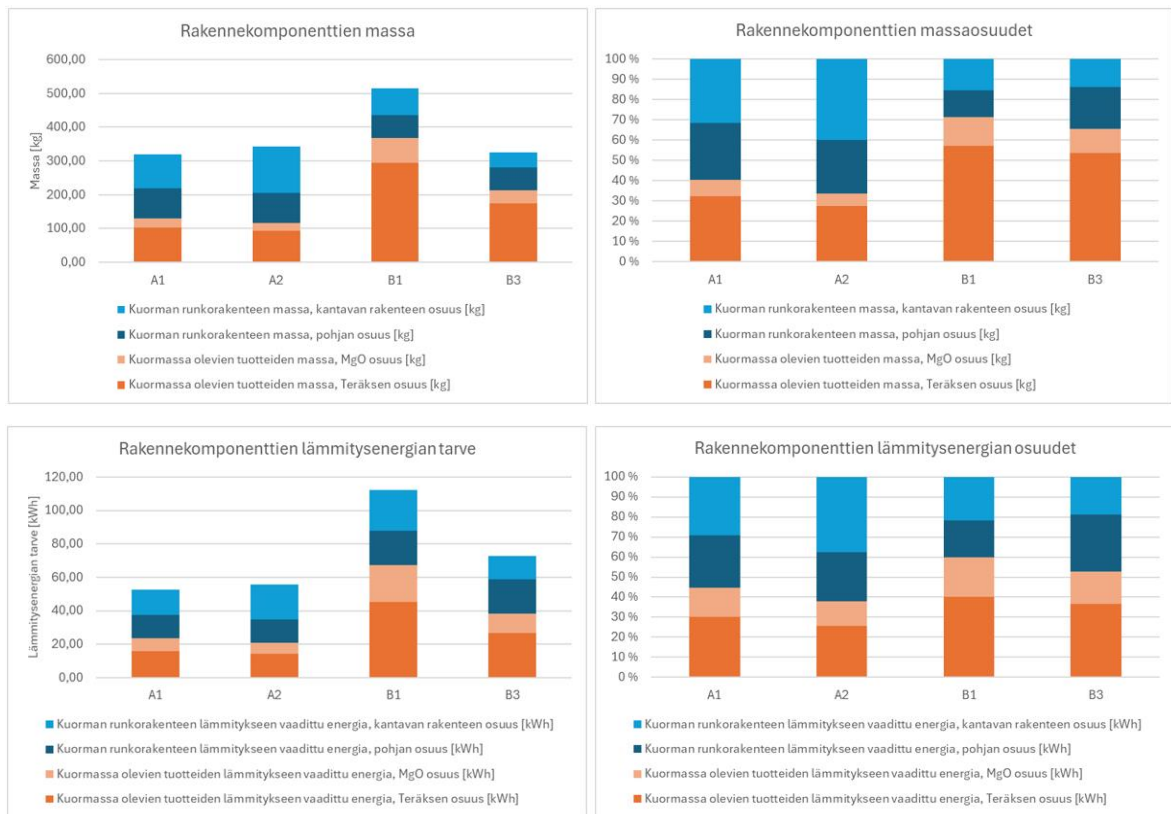
9.1 Uunikuorman rakenneanalyysi

Rakenneanalyysien perusteella voidaan todeta, että grafiitti- ja hiilikuiturunkoinen uunikuormarakenne mahdollistaa teräsrakennetta suuremmat kuormakokoonpanot ja tehokkaamman tuotesijoittelun. Tämä nostaa uunikuorman lämmitysenergian tarvetta, mutta kasvattaa myös hyötykuorman osuutta kuormarakenteessa.

Uunikuorman runkorakenne kevenee siirryttäessä teräsrakenteesta grafiitti- ja hiilikuiturakenteeseen, mutta muutos vaimenee tarkasteltaessa rakenteiden lämmitysenergian tarvetta. Tämä johtuu rakennemateriaalien erilaisista lämmönvarastointiominaisuuksista. Grafiitti- ja hiilikuiturakenteet vaativat terästä enemmän energiaa lämmitäkseen.

Lämmitysenergian tarpeen muutos ei kuitenkaan välttämättä kerro suoraan, kuinka muutos vaikuttaa prosessin tuotanto- tai energiatehokkuuteen. Rakennemuutokset vaikuttavat myös lämmönsiirtotapahtumaan uunin ja kuorman välillä, nämä muutokset voivat joko vahvistaa tai vaimentaa lämmitysenergian tarpeen muutoksen vaikutusta.

Rakenneanalyysien energiantarvelaskelmissa on käytetty rakennemateriaalien keskimääräisiä ominaislämpökapasiteetteja, mikä tuo jossain määrin epätarkkuutta laskentaan, mutta muutosten analogia kuitenkin säilyy, jolloin tämä on riittävä rakenteellisten erojen yleistarasteluun. Tyhjäjuotoksen lämmitysvaiheen tuotanto- ja energiatehokkuuden tarkastelussa esimerkkilaskelma on toteutettu identtisellä hyötykuormalla ja siinä vertaillaan ainoastaan todellista saantoa, jolloin nämä rakenneanalyysin mahdolliset epätarkkuudet eliminoituvat analyysiyhtälöstä. Kuvassa 27 on esitetty uunikuorman rakenneanalyysin tuloksia kuvaajamuodossa, jotka löytyvät myös taulukoituna arvoina liitteestä 1.



Kuva 27. Tarkastelu kuormien rakennekomponenttien jakaumat.

Uunikuorman rakennekokonaisuuteen vaikuttaa uunipohjan, kuorman tukirakenteen sekä hyötykuorman ominaisuudet.

9.1.1 Uunipohja

Kuormatyypistä riippumatta uunipohja on koko rakenteen massiivisin yksittäinen komponentti. Teräsrakenteisilla uunikuormilla pohjarakenteena toimii valettu teräs ristikko, jonka massa on 90 kg. Tämä on niin sanottu standardipohja, jota käytetään kaikissa Lovalin teräsrakenteisissa uunikuormissa. Uunipohjan lämmitysenergian tarve on noin neljäsosa koko kuormarakenteen tarpeesta.

Grafiitti- ja hiilikuiturakenteisissa kuormissa uunipohjana käytetään umpinaista grafiittilevyä. Tämän rakenteen massa on 67,5 kg, mikä vastaa 18-28 % koko kuormarakenteen lämmitysenergian tarpeesta.

Molempien pohjarakenteiden ulkomitat ovat identtiset, mutta grafiittimateriaalin tiheys on viidesosa teräksen tiheydestä, mikä pudottaa rakenteen massaa teräsrakenteeseen verrattuna.

Rakenteen massa ei kuitenkaan muutu tiheyden muutoksen kanssa samassa suhteessa, koska käytetty umpilevyrakenne nostaa materiaalin määrää grafiittipohjassa aukotettuun teräsrakenteeseen verrattuna.

Grafiitin ominaislämpökapasiteetti on kaksinkertainen teräkseen verrattuna, joten vaikka uunipohja keveneekin 25 % materiaali muutoksen takia, niin sen lämmitysenergian tarve kasvaa 50 % teräspohjaan verrattuna. Uunipohjan rakenne- ja materiaali muutos ei siis lämmitysenergian tarpeen näkökulmasta ole juotosprosessin tehokkuutta lisäävä tekijä. Lämmitysenergian tarpeen muutos ei kuitenkaan suoraan kerro vaikutusta lämmitystapahtuman tehokkuuteen, vaan rakenne- sekä materiaali muutosten vaikutus lämmönsiirtotapahtumaan täytyy myös huomioida.

9.1.2 Kuorman tukirakenne

Uunikuormatyyppien välinen rakennekomponenttien lämmitysenergian tarvejakauman sekä fyysisen koon muutos johtuu ensisijaisesti siitä, että grafiitti- ja hiilikuiturakenteisen uunikuorman tukirakenne mahdollistaa hyötykuorman sijoittamisen uunipohjalle tiiviimmin sekä useaan kerrokseen, kun teräsrunkorakenteella virtauslämmittimet juotetaan yhdessä kerroksessa ja harvemmalla sijoittelulla.

Teräsrakenteisessa uunikuormassa juotettava hyötykuorma tuetaan profiiliteräksillä. Rakenteen mahdollistaa hyötykuorman vapaamman sijoittelun, mutta kookkaat ja raskaat palkit rajoittavat juotettavien tuotteiden tehokasta sijoittelua ja estävät tai vaikeuttavat useiden tuotekerrosten kasaamisen unikuormaan. Pääsääntöisesti kaikki Lovalin säiliötuotteet, jotka juotetaan teräsrakenteisilla kuormatyypeillä, kasataan yksikerroksisina kuormarakenteina. Yksikerroksisessa teräsrakenteisessa uunikuormassa tukirakenteet tuovat kokoonpanoon 101-136 kg massaa, mikä on 29-37 % koko uunikuorman lämmitysenergian tarpeesta.

Grafiitti- ja hiilikuitumateriaalista tehty kuorman tukirakenne on teräsrakennetta kevyempi. Tämä johtuu osaltaan rakennemateriaalien tiheyseroista, mutta vaikuttavana tekijänä on myös se, että grafiitti- ja hiilikuitu säilyttävät lujuusominaisuutensa korkeissa lämpötiloissa terästä paremmin, jolloin rakenteiden ei ole välttämätöntä olla yhtä massiivisia kuin teräksisten tukirakenteiden. Tuotespesifimmin muotoillut grafiittiset tukirakenteet mahdollistavat myös kuormarakenteen kasaamisen useaan kerrokseen. Välikerroksen pohja on selvästi

uunipohjaa kevyempi rakenne, koska se ei kanna koko uunikuorman painoa. Nämä tekijät nostavat hyötykuorman määrää uunikuormassa ja tekevät kuorman tukirakenteesta kevyemmän. Grafiitista ja hiilikuidusta valmistettujen tukirakenteiden massa analyysikuormissa on 45-80 kg, mikä on 19-22% koko kuormarakenteen lämmitysenergian tarpeesta. Tämä siitäkin huolimatta, että tukirakenne kantaa ja tukee hyötykuormaa kahdessa kerroksessa.

9.1.3 Hyötykuorma

Hyötykuorman ominaisuudet vaikuttavat koko uunikuorman rakenteeseen. Juotettavan virtauslämmittimen vaipan rakenne, lämmittimenä toimivan vastuselementin ominaisuudet ja määrä sekä liityntäyhteiden koko ja sijoittelu säiliön vaipalla vaikuttavat hyötykuorman lämmitysenergian tarpeeseen sekä tuotesijoittelun tehokkuuteen uunikuormassa.

Teräsrakenteisessa uunikuormassa hyötykuorma on sijoitettu yhteen kerrokseen. Analyysikuormissa hyötykuorman massa on 116-129 kg. Tämä on 38-45 % koko kuormarakenteen lämmitysenergian tarpeesta.

Grafiitti- ja hiilikuiturunkoisessa uunikuormassa hyötykuorma on kahdessa kerroksessa ja tehokkaammin sijoitettu. Näissä analyysikuormissa hyötykuorman massa on 213-368 kg mikä vastaa 53-60 % kuormarakenteen lämmitysenergian tarpeesta.

Uunikuorman rakennemuutosten vaikutuksia kuormakokoonpanoon sekä juotosprosessiin voidaan yleisellä tasolla tarkastella myös erilaisten hyötykuormien välillä, mutta tarkka analyysi vaatii identtisen hyötykuorman vertailurakenteisiin.

9.1.4 Uunikuorman tilavuus ja massa

Hyötykuormakerrosten lisääminen uunikuormassa kasvattaa kuorman tilavuutta. Hyötykuorman ominaisuudet vaikuttavat osaltaan siihen, kuinka tehokkaasti uunin tilavuus saadaan hyödynnettyä, mutta hyötykuorman kasaamiseen kerroksittain on käytännön vaatimus, jotta tyhjäuunin hyötytilavuus saadaan tehokkaaseen käyttöön.

Virtauslämmittimet juotetaan pystyasennossa, jotta lämmityselementit säiliön sisällä eivät taivu lämmön vaikutuksesta. Tämä toimintamalli mahdollistaa myös kevyemmän ja yksinkertaisemmän uunikuorman runkorakenteen, koska tuotekerrosten määrä on pienempi kuin

vaaka-asentoon sijoitetulla hyötykuormarakenteella. Juotettavien tuotteiden pituus yhdessä kerroksessa ei kuitenkaan yleensä riitä täyttämään tyhjöuunia korkeus suunnassa. Tuotteiden loppukäyttö ohjaa vahvasti niiden fyysistä kokoa, lämpöpumpuissa käytetyt virtauslämmittimet eivät ole suurikokoisia. Suuret teollisuuslämmittimet taas tehdään projektikohtaisesti pienissä tuotantoerissä, jolloin tyhjöjuotos ei ole ensisijainen vaihtoehto. Lisäksi Loval pyrkii pitämään valmistettavien säiliöiden tilavuuden alle kahdessa litrassa, jolloin ne eivät ole korkean vaativuusluokan painelaitteita, ja valmistusta ohjaava lainsäädäntö on kevyempi.

Yksikerroksisilla teräsrakenteisilla analyysikuormilla uunin täyttöaste on 45-49 % kun grafiitti- ja hiilikuiturunkoiset kaksi kerroksiset uunikuormat hyödyntävät 94 % tyhjöuunissa käytössä olevasta tilavuudesta.

Uunikuorman runkorakennetyypistä riippumatta, Lovallilla käytössä olevat, uunipohjat eivät täytä kaikkea käytössä olevaa uuni hyötypinta-alaa, mikä osaltaan laskee täyttöastetta molemmilla runkotyypeillä. Teräsrakenteiset uunipohjat on mitoitettu tyhjöuunin pohjan hyötypinta-alaa pienemmiksi, koska niihin on jätetty vara materiaalin lämpölaajenemiselle ja pohjarakenteen muodon muutoksille. Tämä sama pohjan mitoitus on kopioitu myös grafiitti- ja hiilikuitu rakenteisiin uunipohjiin.

Teräsrakenteisten uunikuormien tiheys on grafiitti- ja hiilikuiturakenteista kuormaa suurempi. Tämä johtuu kuorman massiivisesta runkorakenteesta. Massamuutos onkin vaatimatompampi, kun tilavuusmuutos näiden kuormatyyppien välillä.

Tyhjöuunin täyttöasteen tarkastelu uunin kantokyvyn kautta kertoo, että Lovalin juotettavien kuormien tiheys on niin matala, että kuorman kokonaismassa ei ole tyhjöuunin käyttöä rajoittava tekijä sillä parhaimmillaankin vain noin 34 % tyhjöuunin kantokyvystä on kuormitettu.

9.1.5 Kuorman lämpösäteilyä vastaanottava pinta-ala

Uunikuorman lämpösäteilyä vastaanottava pinta-ala kasvaa kuorman tilavuuden kasvun myötä, mutta muutokset eivät tapahdu samassa suhteessa. Uunikuormassa pohjapinta-ala pysyy vakiona ja kuorman korkeus vaihtelee hyötykuorman ominaisuuksien ja kerrosten mukaan. Uunikuorman korkeus ja tilavuus muuttuvat samassa suhteessa, mutta ulkopinnan pinta-alan muutos on pienempi. Tämä johtuu siitä, että kuorman pohja- ja päällyspinta-alat

eivät muutu kuormarakenteen kasvaessa. Kuorman kerrokset kasataan tiiviisti toistensa päälle, jolloin mahdollinen hyödyntämätön tila jää uunin yläosaa. Tämä tarkoittaa, että kuormakerrosten välissä olevat pinnat eivät näe uunin lämpösäteilyä, jolloin niitä ei myöskään voida huomioida pinta-alan laskennassa.

Todellisuudessa uunikuorma ei ole suorakulmainen särmiö, kuten tässä tarkastelussa on yksinkertaistuksen vuoksi ajateltu, vaan kuormarakenteen säteilypinnoista muodostuu monimutkainen rakenne, mutta tästäkin huolimatta analogia näiden muuttujien välillä säilyy.

9.2 Juotoskoeajot

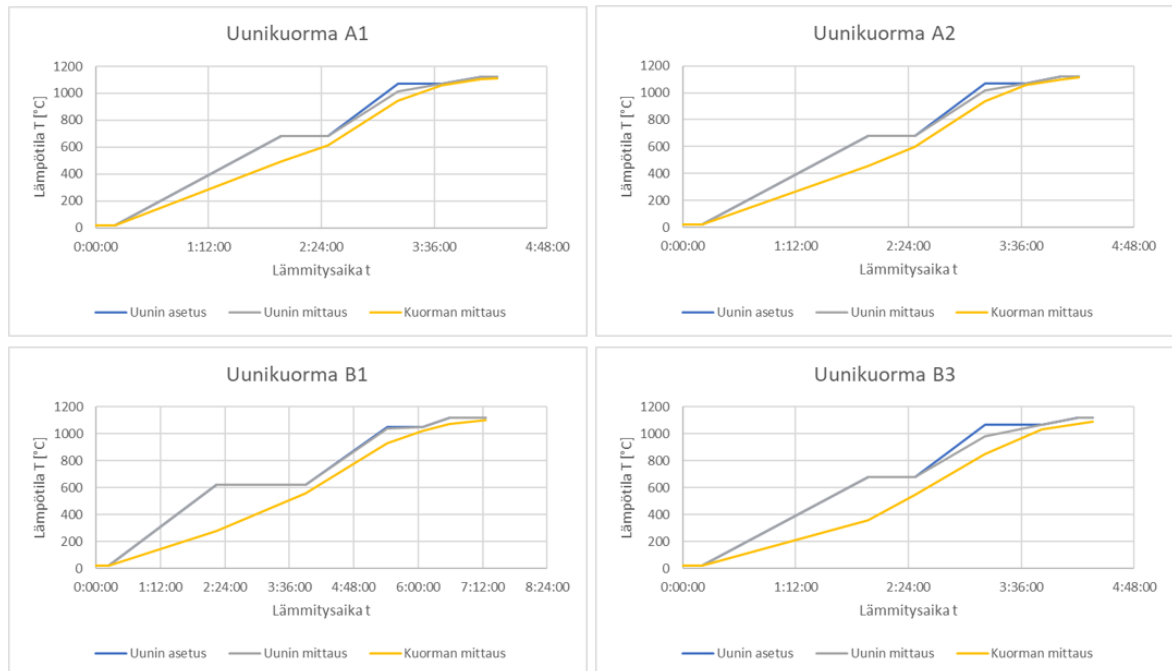
Uuniohjelman ja kuormarakenteen muutoksilla voidaan vaikuttaa juotosprosessin tuotanto- ja energiatehokkuuteen. Kasvattamalla uunikuorman kokoa ja hyötykuorman osuutta rakenteessa, lämmitystapahtuman lämpöhäviöiden osuus pienenee ja tuotantotehokkuus kasvaa. Suurempi kuormarakenteen vaatii kuitenkin maltillisemmän lämmityksen, jotta lämpötilaerot kuormarakenteen sisällä eivät kasva liian suuriksi, jolloin juotoksen laatu vaarantuu.

9.2.1 Tyhjöuunin lämmityksen ohjaus ja syöttöteho

Koeajokuormien A1, A2 ja B3 tyhjöjuotosohjelma on identtinen. Tyhjöuunin lämmitystehon syöttöä ohjaa uunikammiossa oleva lämpötila-anturi ja kuorman lämpötilan tasaustaitaiden pituus määräytyy uunin lämmitysohjelman asetuksen ja kammion lämpötilamittauksen perusteella. Juotoskuormista on mitattu lämpötila uunikuorman sisällä, mutta tietoa ei käytetä uunin ohjaukseen.

B1-kuormalle on tehty oma juotosohjelma, koska uunikuorman koko poikkeaa merkittävästi muista koeajokuormista. Kokemukseen perustuvan arvio mukaan suuren kuorman lämmitys täytyy toteuttaa maltillisemmin, jotta lämpötilaerot kuormarakenteessa eivät kasva liiaksi ja aiheuta ongelmia juotosprosessin. Juotosohjelman ensimmäinen ja toinen lämpötilan nostosykli on hitaampi ja lämpötilan tasaustaitaat asetettu matalampaan lämpötilaan kuin muilla koeajokuormilla. Noustaessa juotoslämpötilaan uuniohjelmien lämpötila-asetukset ovat yhdenmukaiset. Lämpötilan tasaustaitaiden pituutta ohjataan kuorman sisään sijoitetulla lämpötila-anturilla kammiossa olevan mittauksen sijaan eli seuraava lämpötilan nostovaihe lähtee liikkeelle vasta kun kuorman sisälämpötila on riittävän lähellä uuniohjelman asetusarvoa.

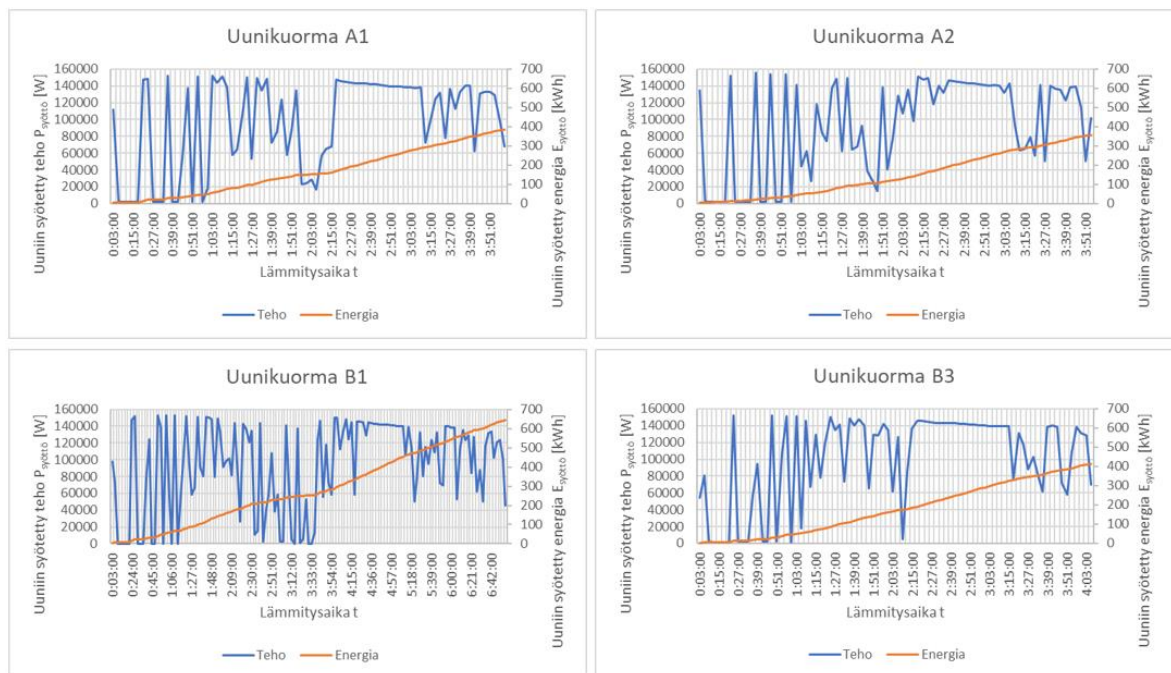
Kuvassa 28 on esitetty koeajokuormien lämmityksen ohjauksen asetusarvot ja uunikammion sekä uunikuorman sisältä mitatut lämpötilat lämmitysvaiheen aikana.



Kuva 28. Tyhjuunin lämmitysvaiheen lämpötilat koeajokuormilla

Uunikuorman koon kasvaessa lämpötilaerot kuormarakenteen sisällä kasvavat. Tämä toteamus perustuu oletukseen, että uunikuorman pintalämpötila ja uunikammion lämpötila-anturin lämpötilat ovat samat tai lähellä toisiaan. Lisäksi kuvasta nähdään, että B3-kuorma on niin suuri, että tällä lämmitysohjelmalla uuni pystyy vaivoin saavuttamaan halutun juotoslämpötilan. Tällä perusteella arvio uuden juotosohjelman tarpeellisuudesta B1-kuormalle oli oikea.

Kuvassa 29 on esitetty tyhjuunin tehonsyöttö lämmitysvaiheen aikana sekä kumulatiivinen lämmitysenergian määrä.



Kuva 29. Tyhjöuuniin syötetty teho ja lämmitysenergia koeajopisteissä

Kaikkien koeajopisteiden teho- ja lämmitysenergian graafit ovat saman kaltaisia. Uuniin syötetty teho ensimmäisessä lämmitysportaassa on maltillista, keskimäärin noin 70-80 kW kuormatyyppistä ja lämmitysohjelmasta riippuen. Toisessa lämmitysportaassa uunin tehon syöttö on kasvava ja on keskimäärin 120-130 kW koeajopisteen mukaan. Kolmannen lämmitysportaan lämmitysteho laskee hieman edellisestä vaiheesta jääden 110-120 kW tasolle.

Ensimmäinen lämmitysportas on 50-60 % lämmitysvaiheen kokonaiskestosta. Toisen portaan osuus on noin 30 % ja nosto juotosalueelle vaatii 10-20 % lämmitysaikaa. Vaihtelu lämmitysohjelmien kestossa johtuu kuorman rakenne- sekä lämmitysohjelman muutoksista koeajopisteiden välillä.

Tämän tutkimuksen perusteella ei voida selkeästi määrittää uunikuorman rakenteen tai juotosohjelman vaikutusta uunin syöttötehoon, mutta se muuttuu koeajopisteiden välillä, joten näiden tekijöiden välinen riippuvuus on olemassa. Syöttötehossa on nähtävissä jopa 10 % ero koeajokuormien välillä.

Vertaamalla koeajopisteitä A1, A2 ja B3, joiden uunin lämmitysohjelma on identtinen, voidaan huomata, että uunin syöttöteho kasvaa täyttöasteen nousun myötä. Työn pohjalta suoritetut koeajot eivät kuitenkaan riitä vahvistamaan tätä muuttujien välistä riippuvuutta.

9.2.2 Uunikuormaan ja hyötykuormaan siirtyvä lämpöteho

Koeajojen perusteella voidaan todeta, että valtaosa tyhjöuuniin syötetystä lämmitysenergiasta kuuluu uunikuorman ulkopuolisten rakenteiden lämmitykseen. Tuloksista voidaan kuitenkin nähdä, että uunikuormaan siirtyvän lämpöenergianosuus kasvaa siirryttäessä teräsrunkorakenteisesta uunikuormasta grafiitti- ja hiilikuiturakenteeseen. Perinteisellä teräksisellä kuormarakenteella 13,71-15,52 % uuniin syötetystä lämmitysenergiasta siirtyy juotettavaan uunikuormaan, kun grafiitti- ja hiilikuiturakenne hyödyntää 17,42-17,53 % syötetystä lämpöenergiasta kuorman lämmittämiseen.

Tarkasteltaessa hyötykuormaan siirtyvää lämmitysenergiaa ero kuormarakennetyyppien välillä kasvaa. Grafiitti- ja hiilikuiturakenteiden korkeampi hyötykuormanosuus nostaa lämmitysvaiheen tehokkuutta. Teräsrakenteisilla kuormilla 5,87-6,14 % uunin syötetystä lämmitysenergiasta siirtyy hyötykuormaan, kun grafiitti- ja hiilikuiturakenteella hyötykuormaan sitoutuva energian osuus on 9,26-10,45 %.

Taulukossa 7 on esitetty koeajoissa kerätty tyhjöuunin lämmityksen mittaustieto ja rakennanalyseissä määritetyt uunikuorman energiantarpeet (liite 1), sekä tietojen pohjalta lasketut lämmitystapahtuman tehokkuutta kuvaavat suureet.

Taulukko 7. Tyhjöjuotoksen lämmitysvaiheen tehokkuus koeajopisteissä

	Uuni kuorma A1	Uuni kuorma A2	Uuni kuorma B1	Uuni kuorma B3
Mitattu lämmitysenergian kulutus $E_{syöttö}$ [kWh]	385,19	358,30	644,01	414,60
Mitattu lämmitysaika t [h]	4,00	3,90	6,95	4,10
Laskettu lämmitysenergiantarve, uunikuorma E [kWh]	52,79	55,59	112,21	72,67
Laskettu lämmitysenergiantarve, hyötykuorma E_{hk} [kWh]	23,65	21,02	67,30	38,39
Hyötykuorman osuus x [%]	44,79	37,80	59,97	52,82
Uunikuormaan siirtyvän lämpöenergian osuus η [%]	13,71	15,52	17,42	17,53
Hyötykuormaan siirtyvän lämpöenergian osuus ηx [%]	6,14	5,87	10,45	9,26
Teho, syöttö $P_{syöttö}$ [kW]	96,30	91,87	92,66	101,12
Teho, uunikuorma P [kW]	13,20	14,25	16,15	17,72
Teho, hyötykuorma P_{hk} [kW]	5,91	5,39	9,68	9,36

Hyötykuormaan siirtyvän lämpötehon muutos on suoraan verrannollinen tuotantotehokkuuteen ja hyötykuormaan siirtyvän lämpöenergian osuuden muutos kääntäen verrannollinen prosessin energiankulutukseen.

Tyhjöuunin tehokkaampi hyötytilavuuden käyttö sekä hyötykuorman osuuden kasvatus uunikuormassa tehostavat tyhjöjuotoksen lämmitysvaihetta. Lämmitysvaihe on merkittävin yksittäinen osaprosessi juotoksessa, kun ajatellaan prosessin energiankulutusta sekä työhön käytettyä aikaa ja näin ollen kuorman rakenneoptimoinnilla saatavan hyödyn vaikuttavuus on suuri koko juotosprosessin kannalta.

9.2.3 Vertailulaskelma

Tämä tutkimuksen perusteella uunikuormatyyppien välisen hyötypotentiaalin tarkka vertailu on hankalaa, koska hyötykuorman ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi koko uunikuorman rakenteeseen ja sitä kautta myös kuorman käyttäytymiseen lämmitystapahtuman aikana. Koeajopisteiden A1 ja B1 välillä tämä vertailu voidaan kuitenkin suorittaa, sillä näissä hyötykuorma on identtinen. Tämä vertailu kertoo selkeämmin konkreettisen hyödyn, joka kuormarakennemuutoksella voidaan saavuttaa. Vertailulaskelma on tehty taulukon 7 ja liitteen 1 arvojen pohjalta.

Teräsrakenteinen A1-uunikuorma pitää sisällään 130 virtauslämmittintä ja B1-kuorma 370 lämmittintä. Teräsrakenteisella kuormalla lämmitysaika oli 4,00 tuntia, kun grafiitti- ja hiilikuiturakenteinen B1-kuorma vaati 6,95 tunnin lämmityksen.

Teräsrakenteisella kuormalla saadaan tuotantonopeudeksi 32,50 tuotetta tunnissa, kun grafiitti- ja hiilikuitukuormalla vastaava on 53,24 tuotetta tuntia kohden. Tämä tarkoittaa, että tuotantomäärä kasvaa 63,38 % kuorman rakennemuutoksen seurauksena.

Vastaava vertailu voidaan tehdä myös energiankulutuksen osalta. A1 kuormarakenne kuluttaa 385,19 kWh energiaa lämmitysvaiheen aikana ja B1 kuorma 644,01 kWh. Tuotekohtainen energiakulutus on A1 kuormalle on 2,963 kWh ja B1 kuormalle 1,740 kWh. Tämä tarkoittaa, että myös tuotekohtainen energiakulutus laskee 41,26 %.

Koeajojen ja vertailulaskelman perusteella voidaan todeta, että kuormarakenteen muutoksilla voidaan, ainakin tietyillä hyötykuormatyypeillä, vaikuttaa merkittävästi tyhjöjuotoksen lämmitysvaiheen tuotanto- sekä energiatehokkuuteen. Kuormarakenteen muutosten

vaikuttavuus juotosprosessin tehokkuuteen on kuitenkin riippuvainen hyötykuorman ominaisuuksista, joten hyötypotentiaali muuttuu hyötykuorman muutoksen myötä.

9.3 Jatkotutkimus

Rakenneanalyysien ja koeajojen yhteydessä havaittiin seikkoja, joiden lisäselvityksellä voidaan edelleen tehostaa tyhjöjuotosprosessia sekä oppia ymmärtämään sen toiminnallisuutta entistä paremmin.

9.3.1 Uunipohja

Grafiitti- ja hiilikuiturunkoiset uunikuormat on varustettu umpinaisella grafiittilevypohjalla. Tämä uunipohjarakenne vaatii noin 50 % enemmän lämmitysenergiaa kuin teräsrunkorakenteisessa uunikuormassa käytetty aukotettu valuteräspohja, vaikka grafiittimateriaalin muut lämmönsiirtoon vaikuttavat ominaisuudet kompensoisivatkin lämmitysenergian tarpeen kasvua niin voidaan todeta, että rakennemateriaalin tarjoamaa potentiaalia ei ole hyödynnetty tehokkaasti.

Käytössä olevat uunipohjat eivät myöskään hyödynnä koko tyhjöuunin hyötypinta-alaa ja sitä kautta hyötytilavuutta. Uunipohjat on mitoitettu teräsrakenteisten pohjien mukaan ja näissä on huomioitu mahdollinen lämmön aiheuttama muodon muutos. Grafiitti- ja hiilikuitu rakenteella on mahdollista hyödyntää koko tyhjöuunin hyötypinta-ala, koska muodon muutoksia ei juurikaan tapahdu.

Uunipohjien toteutus perinteisellä aukotetulla rakenteella, mutta hiilikuitu tai grafiittimateriaalilla, ja koko uunin käyttöpinta-alan hyödyntämällä tarjoaa selkeän tehostuspotentiaalin. Kuvassa 30 on esitetty vaihtoehtoisia uunipohjarakenteita.



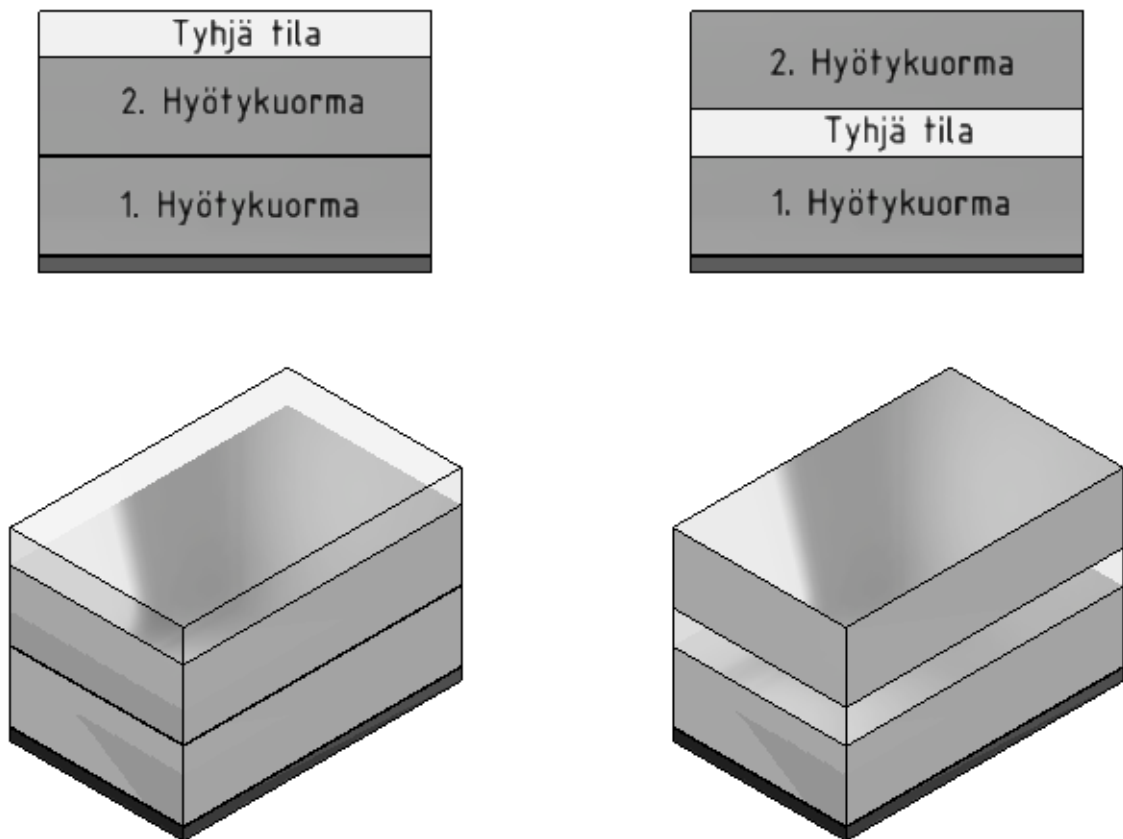
Kuva 30. Uunipohjat tyhjöjuotoksessa

Kuvassa vasemmalla on perinteisissä kuormarakenteissa käytetty aukotettu valuteräsrakenne, keskellä umpinainen grafiittilevy, jota hyödynnetään moderneissa kuormarakenteissa ja oikealla hiilikuituinen ristikkorakenne, jonka mahdollinen prosessin tehostuspotentiaali kannattaa selvittää.

9.3.2 Uunikuorman pinta-ala

Uunikuorman säteilylämpöä vastaanottavan pinnan pinta-ala ei kasva samassa suhteessa, kun kuorman tilavuus. Tämä johtuu siitä, että kuorman pohjan ja yläpinnan pinta-alat pysyvät muuttumattomina kuorman kasvaessa.

Kuormarakennetta muuttamalla voidaan vaikuttaa sen pinta-alaan. Kasaamalla hyötykuormakerrokset siten, että uunin käyttämätön hyötytilavuus jaetaan tuotekerrosten väleihin, saadaan kuormalle suurempi uunin lämpöä vastaan ottava pinta-ala. Tällä voi olla lämmitystä tehostavia vaikutuksia. Kuvassa 31 on esitetty periaatekuva tästä vaihtoehdosta.



Kuva 31. Vaihtoehtoinen kuormarakenne

Useasta hyötykuormakerroksesta koostuvan uunikuorman kerrokset kasataan tiiviisti toistensa päälle, jolloin mahdollinen käyttämätön uunin hyötytilavuus jää uunin yläosaan. Jakamalla tämä käyttämätön tila hyötykuormakerrosten väleihin mahdollistetaan uunikammiosta lähtevän säteilyn ja kerrosten välipintojen kohtaaminen.

9.3.3 Tyhjöuunin syöttöteho

Uunikuorman rakenne vaikuttaa tyhjöuunin tehon syöttöön, mutta myös uuniohjelmalla on mahdollista vaikuttaa tehon syöttöön ja sitä kautta tuotantonopeuteen. Uuniohjelmien asetusarvot ovat kokemukseräisesti haettu, eikä niiden rakentamiseen ole selkeää ja johdonmukaista toimintaohjetta. Uunikuormien rakenteita ei myöskään analysoida ennen juotosta, mikä on edellytys sopivan juotosohjelman valintaan.

Syöttötehon määrään voidaan vaikuttaa lämpötilan nostonopeuden säädöllä sekä tasausjakson lämpötilan asetuksella. Mitä nopeampi nostonopeus ja korkeampi tasausajan lämpötila asetus sitä enemmän uunin on mahdollista syöttää tehoa. Tämä on kuitenkin tarkka optimointitehtävä, koska molemmat edellä mainitut muutokset kasvattavat uunikuorman sisäistä lämpötilaeroa mikä voi vaikuttaa juotoksen laatuun. Koeajojen perusteella havaittiin, että uunin syöttötehossa oli 10 % eroja kuormatyypistä ja ajo-ohjelmasta riippuen, joten tämä mahdollinen tehostuspotentiaali on tutkimisen arvoinen.

10 Yhteenveto

Tutkimustyön tarkoituksena oli löytää energiaintensiiviseen tyhjöjuotosprosessiin tehokkuutta parantavia tekijöitä, joilla osaltaan varmistetaan asiakasyrityksen kilpailukyky tulevaisuudessa sekä mahdollistetaan globaalin vihreän siirtymän mukanaan tuoma nopea orgaaninen kasvu. Perusta työlle luotiin kirjallisuustutkimuksen sekä asiakasyrityksen lähtötilanne-selvityksen avulla, joiden pohjalta kartoitettiin mahdolliset juotosprosessin tehostuskeinot. Tehostuskartoituksen perusteella toteutettiin myös käytännöntutkimus, jolla pyrittiin vahvistamaan jatkoselvitykseen valitun tehostusmenetelmän toiminnallisuus ja määrittämään saavutettavissa oleva konkreettinen hyöty.

Tyhjöjuotoksen pääkomponenttien (perusmateriaali, juoteaine ja juotosatmosfääri) sekä prosessilaitteiston muokkauksilla voidaan vaikuttaa juotosprosessin tehokkuuteen, mutta näiden tehostustoimenpiteiden hankaluus on lopputuotteiden raskaat uudelleen verifiointiprosessit sekä kalliit laiteinvestoinnit, joiden realisoituminen vaati aikaa. Juotettavien rakenteiden materiaalivalinnat eivät yleensä pohjaudu juotettavuuden tai prosessitehokkuuden optimointiin, vaan tuotteen tekniset vaatimukset ohjaavat materiaalivalintoja.

Loval Oy:n tapauksessa lopputuotteiden perusmateriaali- sekä juoteainevalintoja on kuitenkin, jossain määrin, mahdollista toteuttaa myös juotosprosessin tuotanto- ja energiatehokkuuden ehdoilla. Tämä tuotesuunnittelullinen optimointitehtävä voi olla kiinnostava myös komponenttikustannusten kannalta.

Tuotantomäärien kasvaessa juotettavien lopputuotteiden rakennekomponentteja ei ole välttämätöntä valmistaa standardiaihioista vaan räätälöidyt rakenteet sekä valmistusmenetelmät ovat suurille valmistuserille kilpailukykyinen vaihtoehto. Tämä voi mahdollistaa tehokkaamman alihankintakomponenttien materiaalmääräoptimoinnin, millä on suora yhteys juotettavan uunikuorman lämmitysenergiantarpeeseen.

Vastaavaa rakenneoptimointia voidaan toteuttaa myös yrityksen itse valmistamissa rakennekomponenteissa. Lämmityssovelluksissa käytettävän putkivastuksen fyysisen koon pienentäminen ja materiaalivahvuuden optimointi laskee lämmitettävän kuorman massaa juotospanoksessa. Tässä tarkastelussa täytyy kuitenkin huomioida mahdolliset vaikutukset lopputuotteen lämmönsiirto-ominaisuuksiin sekä elinikään.

Juoteaineainevalinnoilla on myös mahdollista vaikuttaa uunikuorman lämmitysenergiantarpeeseen sekä kokoonpano juotettavuuteen. Uusien juoteaineiden käyttöönotto vaatii mittavaa esiselvitystyötä, mutta yrityksessä jo käytössä olevien juoteaineiden uudelleen tarkastelu prosessitehokkuuden näkökulmasta voi olla kiinnostava vaihtoehto. Kuparijuotteen korvaaminen nikkelillä laskee juotoslämpötilaa ja mahdollistaa korkeamman tyhjöatmosfäärin juotoksen aikana, jolloin uunikuorman lämmitystarve laskee ja juotettavuus paranee. Kokonaisuhyödyn arvioinnissa täytyy kuitenkin huomioida mahdollisen juotemuutoksen vaikutus komponenttikustannuksiin ja prosessin kokonaisenergiankulutukseen sekä läpimenoaikaan. Tämän lisäksi lopputuotteen vaatimukset rajoittavat jossain tilanteissa juoteainemuutosta, lujuusominaisuuksia vaativissa lämmityssovelluksissa hauraan nikkelijuotteen käyttö voi olla tuoteriski.

Tyhjöuunien ja prosessikaasujen muutoksilla voidaan vaikuttaa juotosprosessin lämmönsiirtoon sekä juotoksen onnistumisen edellytyksiin. Tyhjöuuneihin on mahdollista hankkia lisälaitteita, joilla voidaan mahdollistaa konvektiivinen lämmönsiirto juotoksen aikana. Tämä voi tarjota keinoja tyhjöjuotoksen lämmitysvaiheen lämmönsiirron tehostamiseen sekä monipuolisempaan ohjaukseen. Konvektiivisen lämmönsiirron lisääminen prosessiin on kiinnostava vaihtoehto, mutta on toteutettavissa vasta uusien laiteinvestointien yhteydessä.

Vedyn käyttö tyhjöjuotoksen prosessikaasuna tarjoaa mahdollisuuden tehokkaampaan oksidin poiston juotettavien perusmateriaalien pinnoilta ja näin ollen parantaa juotoksen onnistumisen edellytyksiä. Parhaassa tapauksessa juotoksen aikana tehostuva oksidin poisto hävittää komponenttien mekaanisen puhdistustarpeen valmistusprosessista. Prosessikaasun vaihdolla voidaan myös mahdollisesti tehostaa tyhjöjuotoksen jäähdytysvaihetta. Vetykaasun korkea hankintahinta syö prosessikaasumuutoksen tehostuspotentiaalia. Lisäksi helposti syttyvän ja reaktiivisen vedyn käyttö asettaa lisävaatimuksia prosessilaitteiston hallintaan ja mahdollisesti rajoittaa käyttöä tiettyjen rakennemateriaalien kanssa.

Juotettavan uunikuorman rakenteellisilla valinoilla voidaan myös vaikuttaa juotosprosessin tehokkuuteen. Kuormarakenteen optimointia on mahdollistaa toteuttaa ilman tuote- ja prosessilaitemuutoksia mikä mahdollistaa verrattain nopean tehostushyödyn realisoitumisen kohtuullisella investointikustannuksella. Tällä perustella uunikuorman rakenne valittiinkin jatkotutkimuksen kohteeksi.

Jatkotutkimuksessa tarkasteltiin Lovalilla käytössä olevien perinteisten teräsrakenteisten uunikuormien ja modernien grafiitti- ja hiilikuiturakenteisten uunikuormien eroja sekä vaikutuksia juotosprosessin tehokkuuteen. Tutkimus toteutettiin uunikuorman rakenneanalyysin sekä koeajojen avulla. Rakenneanalyysissä vertailtiin kuormarakenteiden muutosten vaikutuksia laskennalliseen lämmitysenergian tarpeeseen ja tarkasteltiin vaikutuksia rakennekomponenttien osuuksiin sekä tyhjöuunin täyttöasteeseen. Koeajojen avulla selvitettiin kuormarakenteen muutosten vaikutuksia lämmitysaikaan ja tyhjöuunin käyttämään lämmitysenergian määrään.

Tutkimus osoittaa, että uunikuorman rakennemuutoksilla voidaan vaikuttaa juotosprosessin tehokkuuteen. Nykyaikaisilla uunikuorman runkorakennemateriaaleilla voidaan nostaa hyötykuorman osuutta uunikuormassa sekä kasvattaa kuormarakenteiden kokoa. Molemmat tekijät parantavat juotosprosessin tehokkuutta. Hyötykuorman osuuden kasvatus parantaa prosessin saantoa, jolloin tuotantotehokkuus nousee. Kuorman koon kasvaessa taas lämmönsiirto uunin ja kuorman välillä tehostuu, jolloin myös juotosprosessin energiatehokkuus kasvaa.

Modernilla runkorakenteella toteutetun uunikuorman tyhjöjuotoksen lämmitysvaiheen tuotantotehokkuus parani yli 60 % ja energiatehokkuus yli 40 % perinteiseen teräsrunkoiseen kuormarakenteeseen verrattuna. Tämä edellä esitetty tehostuspotentiaali on kuitenkin hyötykuormasidonnainen. Hyötykuorman ominaisuudet vaikuttavat saavutettavissa olevaan tehostuspotentiaaliin, joten todellisen tehokkuushyödyn arviointi täytyy tehdä aina hyötykuormakohtaisesti.

Käytännöntutkimuksen aikana pystyttiin lisäksi tunnistamaan jatkokehityskohteita, joiden avulla tyhjöjuotosprosessin tehokkuutta on mahdollista edelleen parantaa. Uunipohjien ja kuormarakenteen edelleen kehittäminen sekä uuniohjelmien optimointi ja standardointi voi tarjota lisää keinoja yrityksen kilpailukyvyn varmistamiseen sekä kasvun mukanaan tuomien haasteiden selättämiseen.

Lähteet

Ala-Outinen, T. 1996. Fire resistance of austenitic stainless steels Polar 725 (EN 1.4301) and Polarit 761 (EN 1.4571). [Verkkoaineisto]. [Viitattu 9.12.2023]. Saatavissa. <https://www.vttresearch.com>.

American Welding Society, AWS. 2007. Brazing Handbook. ASM International.

Arola, H. 2018. Putkivastukset ja näihin pohjautuvat lämmityssovellukset, suunnittelu. [Sisäinen aineisto]. [Viitattu 2.5.2023].

Aspdeb, R G & Feduska, W. 1958. Fatigue Characteristics of Single-Lap Joints of AISI 347 Brazed with a Ni-Cr-Si-B-C Alloy. *Welding Journal*. 37(3), s. 125s–128s.

Bergman, T L., Lavine, A S., Incropera, F P., DeWitt, D P. 2017. Incropera's principles of heat and mass transfer. Global edition. Hoboken N J: John Wiley & Sons.

Bredzs, N. & Tennenhouse, C C. 1970. Metal-Metal Oxide Equilibrian in Pure Hydrogen Atmosphere. *Welding Journal*. 49(5), s. 189s–193s.

Contreras Cuevas, A., Bedolla Becerril, E., Salazar Martínez, M. & Lemus Ruiz, J. 2018. Metal Matrix Composites: Wetting and Infiltration. Springer International Publishing.

Eustathopoulos, N., Nicholas, M G., Drevet, B. & Drevet, B. 1999. Wettability at High Temperatures. Elsevier Science & Technology.

Fabian, R. 1993. Vacuum Technology: Practical Heat Treating and Brazing. ASM International.

Fagerholm, N-E. 1986. Termodynamiikka 479. Otakustantamo.

HTT. 2021. A Guide to Selecting Heat Treating Equipment. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 28.6.2023]. Saatavissa. <https://www.heatreattoday.com>.

ISO 17672:2016. Brazing, Filler metals.

IVA Schmetz GmbH. 2016. I 180/1H 80x120x80 <1,5 bar System 2RH tyhjöuunin manuaali. [Sisäinen aineisto]. [Viitattu 9.7.2023].

Jacobson, D M. 2005. Principles of Brazing. ASM International.

Jokilaakso, A. 1987. Virtaustekniikan, lämmönsiirron ja aineensiirron perusteet 496. Ota-kustantamo.

Jokinen, V. 2019. Chem-C2400 – Faasidiagrammit. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 19.6.2023]. Saatavissa. <https://mycourses.aalto.fi>.

Juntunen, T. 2010. Putkivastukset ja näihin pohjautuvat lämmityssovellukset, rakenne sekä valmistus. [Sisäinen aineisto]. [Viitattu 2.5.2023].

Kivivuori, S. 2016. Lämpökäsittelyoppi 2 – Lämpökäsittelytietoa suunnittelijoille. Teknolohiollisuus ry.

Kivivuori, S. 2019. Lämpökäsittelyoppi 1 – Lämpökäsittelytietoa karkaisijoille. Teknolohiollisuus ry.

Linde AG. 2023. Furnace Atmospheres No. 4 – Brazing of Metals. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 13.6.2023]. Saatavissa. <https://www.linde-gas.com>.

Loyal Oy. 2023a. Loyal – Yritysesittely. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 2.5.2023]. Saatavissa. <http://www.loyal.fi>.

Loyal Oy. 2023b. Loyal-vastukset ilmanlämmitykseen. [Sisäinen aineisto]. [Viitattu 2.5.2023].

Loyal Oy. 2023c. Loyal-vastukset nesteiden lämmitykseen. [Sisäinen aineisto]. [Viitattu 2.5.2023].

Loyal Oy. 2023d. Perustietoa putkivastuksesta. [Sisäinen aineisto]. [Viitattu 2.5.2023].

Loyal Oy. 2023e. Teknistä tietoa Loyal-putkivastuksista. [Sisäinen aineisto]. [Viitattu 2.5.2023].

Schwartz, M M. 2003. Brazing. ASM International.

Sekulić, D P. 2013. Advances in Brazing: Science, Technology and Applications. Elsevier Science & Technology.

Toyo Tanso. 2023a. Isotropic Graphite-materiaaliesite. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 9.12.2023]. Saatavissa. <https://www.toyotanso.com>.

Toyo Tanso. 2023b. C/C Composite-materiaaliesite. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 9.12.2023]. Saatavissa. <https://www.toyotanso.com>.

Way, M., Willingham, J. & Goodall, R. 2019. Brazing filler metals. International Materials Reviews.

LIITE 1. Uunikuorman rakenneanalyysien tulokset

UUNIKUORMA	A1	A2	B1	B3
Uunikuorman korkeus h [m]	0,42	0,38	0,80	0,80
Uunikuorman leveys w [m]	0,75	0,75	0,75	0,75
Uunikuorman syvyys d [m]	1,20	1,20	1,20	1,20
Yksittäisen tuotteen massa m_{tuote} [kg]	0,994	1,168	0,994	1,400
Tuotteiden määrä uunikuormassa K_k [kpl]	130	99	370	152
Hyötykuorman massa, Teräksen osuus m_t [kg]	103,67	93,80	295,06	174,33
Hyötykuorman massa, MgO osuus m_{MgO} [kg]	25,55	21,88	72,72	38,47
Hyötykuorman kokonaismassa m_{hk} [kg]	129,22	115,68	367,78	212,80
Runkorakenteen massa, uunipohjan osuus m_{up} [kg]	90,00	90,00	67,50	67,50
Runkorakenteen massa, tukirakenteen osuus m_{ir} [kg]	100,78	136,32	79,50	44,70
Runkorakenteen kokonaismassa m_{rr} [kg]	190,78	226,32	147,00	112,20
Uunikuorman kokonaismassa m [kg]	320,00	342,00	514,78	325,00
Hyötykuorman lämmitysenergia, Teräksen osuus E_t [kWh]	15,84	14,33	45,08	26,63
Hyötykuorman lämmitysenergia, MgO osuus E_{MgO} [kWh]	7,81	6,69	22,22	11,76
Hyötykuorman kokonaislämmitysenergia E_{hk} [kWh]	23,65	21,02	67,30	38,39
Runkorakenteen lämmitysenergia, uunipohjan osuus E_{up} [kWh]	13,75	13,75	20,63	20,63
Runkorakenteen lämmitysenergia, tukirakenteen osuus E_{ir} [kWh]	15,40	20,83	24,29	13,66
Runkorakenteen kokonaislämmitysenergia E_{rr} [kWh]	29,15	34,58	44,92	34,28
Uunikuorman kokonaislämmitysenergia E [kWh]	52,79	55,59	112,21	72,67
Uunikuorman tilavuus V [m ³]	0,378	0,342	0,720	0,720
Uunikuorman tiheys ρ [kg/m ³]	846,56	1000,00	714,97	451,39
Uunikuorman säteilylämpöä vastaanottava pinta-ala A [m ²]	3,44	3,28	4,92	4,92
Tyhjjuunin täyttöaste, Kuorman tilavuus [%]	49	45	94	94
Tyhjjuunin täyttöaste, Kuorman massa [%]	21	23	34	22