

Bondausprosessin kehittäminen & virtaustehokkuuden analysoiminen

Alexi Kiianmies

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2019
Konetekniikka
Älykkäät Koneet



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Konetekniikka
Älykkäät Koneet

KIIANMIES, ALEKSI

Bondausprosessin kehittäminen & virtaustehokkuuden analysoiminen

Opinnäytetyö 45 sivua
Huhtikuu 2019

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin ja kehitettiin Sako Oy:n kuparivaippaisten lyijyluotien bondausprosessia. Bondausprosessilla tarkoitetaan metsästysluodin kuparivaipan ja lyijyytimen välisen liitoksen valmistamista. Nykyinen tuotantoprosessi perustuu tinajuotosmenetelmään ja suunnitteilla oleva valmistusprosessi perustuu diffuusiobondausmenetelmään. Lisäksi työssä vertailtiin erilaisia sarjatuotantoon soveltuvia lämpölaitteita, joilla luotien diffuusiobondaaminen on mahdollista. Opinnäytetyössä valmistettiin diffuusiobondattuja testiluoteja induktiolämpölaitteistolla sekä kammiouunissa.

Työssä analysoitiin ja vertailtiin nykyisen ja suunnitteilla olevan prosessin virtaustehokkuutta. Kummastakin prosessista tehtiin arvovirtakuvaus, ja prosesseja tarkasteltiin jakamalla niiden materiaalivirta vaiheisiin sekä arvioimalla vaiheiden arvontuottoa asiakasnäkökulmasta. Lisäksi prosesseissa piilevää hukkaa tarkasteltiin. Arvovirtakuvaus, arvontuoton arvioiminen ja hukan tarkastelu ovat Lean-ajattelussa käytettyjä keskeisiä toimintatapoja.

Opinnäytetyön tuloksena oli, että nykyisestä prosessista siirtyminen diffuusiobondausprosessiin kehittäisi tuotantoa virtaustehokkaammaksi. Prosessin kokonaisläpimenoaika pienenisi ja siitä poistuisi hukkaa aiheuttavia työvaiheita.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme Mechanical engineering
Intelligent machines

KIIANMIES, ALEKSI

Development of a Bonding Process and Flow Efficiency Analysis

Bachelor's thesis 45 pages

April 2019

The subject of this thesis was to develop and analyze the bullet bonding process in use at Sako Ltd. The bullet bonding process means the process in which the joint between the copper jacket and the lead core of a bullet is manufactured. The current bullet bonding process is based on the tin brazing method and the planned process is based on the diffusion bonding method. Also, the objective was to compare heat treatment equipment, which are capable to bond bullets in a mass production system. Diffusion bonded test bullets were manufactured with induction heat equipment and in the chamber furnace.

The flow efficiency of the current and the planned process was analyzed and compared. Value stream maps were created for both bonding processes. The processes were analyzed by dividing the material flows into a step-by-step chart and assessing the value added to the product in each step from a consumer perspective. Also, the wastes in the processes were examined. The Value stream map, assessing created value and examining the waste are concepts and practices used in the Lean philosophy.

According to the results, moving into the diffusion bonding process would increase the flow efficiency of the production. The total throughput time would decrease and different types of waste would be eliminated from the process.

Key words: flow efficiency, value stream map, waste

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
2	LEAN & VIRTASTEHOOKKUUS	6
2.1	Lean	6
2.2	Virtastehokkuus	7
2.3	Arvovirtakuvaus	8
2.4	Littlen laki	10
2.5	Hukka ja sen poistaminen	10
3	METSÄSTYSLUOTI	12
3.5	Metsästypatruuna ja luoti	12
3.6	Luodin valmistus	13
3.7	Sako Super Hammerhead	15
3.8	Diffuusiobondaus	16
3.9	Murskauskoe ja jäämämässä	18
4	LÄMPÖKÄSITTELYLAITTEET	19
4.1	Uunit	19
4.2	Induktiolämpölaitteet	21
5	LUOTIEN BONDAUSPROSESSIN LÄHTÖTILANNE	24
5.1	Käytössä oleva prosessi - Tinajuotosbondaus	24
5.2	Tinajuotosprosessin tehokkuus – vaiheittainen arvonmääritys, arvovirtakuvaus ja hukka	26
6	DIFFUUSIOBONDAUSMENETELMIEN ARVIOINTI	30
6.1	Vaatimukset uudelle menetelmälle ja vaihtoehtojen esittely	30
6.2	Induktiolaitteistolla valmistetut testiluodit	33
6.3	Kammiouunissa valmistetut testiluodit	35
6.4	Yhteenveto valmistustesteistä	37
7	UUDEN PROSESSIN TEHOOKKUUS	39
7.1	Vaiheittainen arvonmääritys, hukka ja arvovirtakuvaus	39
8	POHDINTA	43
	LÄHTEET	45

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan ja kehitetään Sako Oy:n kuparivaippaisten lyijyluotien bondausprosessia, eli luodin kuparivaipan ja lyijy-ytimen välisen liitoksen valmistusprosessia. Ensisijaisena tutkimuskohteena on prosessin virtaustehokkuus. Tavoitteena on tutkia miten tuotantoprosessin virtaustehokkuus kehittyisi nykyisestä tinajuotosbondauksesta diffuusiobondausprosessiin siirryttäessä, eli sitä, kuinka uuteen tuotantoprosessiin siirtyminen vaikuttaisi konkreettisesti tuotannon tehokkuuteen. Lisäksi tavoitteena on vertailla sarjatuotantoon soveltuvia tuotantomenetelmiä, joilla kuparivaipan ja lyijy-ytimen liittäminen voidaan toteuttaa niin, että niiden välille muodostuu kestävä diffuusiobondaus.

Opinnäytetyön tarkoitus on luoda sekä nykyisestä, että suunnitteilla olevasta bondausprosessista arvovirtakuvaus, sekä arvioida prosessien työvaiheiden arvontuottoa asiakasnäkökulmasta ja tarkastella prosesseissa mahdollisesti piilevää hukkaa. Arvovirtakuvaus, arvontuoton arvioiminen ja hukan tarkastelu ovat Lean -ajattelussa käytettyjä keskeisiä toimintatapoja. Opinnäytetyössä vertaillaan eri tuotantomenetelmiä, sekä kehitetään, valmistetaan ja testataan diffuusiobondausmenetelmällä bondattuja testiluoteja.

Tarve siirtyä kohti diffuusiobondattua luotia on lähtöisin Sakon todellisen asiakkaan, eli tuotteen loppukäyttäjän, tarpeesta. Aikaisemmissa Sako Oy:n tuotekehitystesteissä on todettu, että diffuusiobondausmenetelmällä valmistettu luodin kuparivaipan ja lyijy-ytimen välinen liitos, eli bondaus, on tinajuotosmenetelmällä valmistettua liitosta lujempi. Bondaus on merkittävä tekijä metsästysluodin toimivuuden kannalta riistatilanteessa. Luja bondaus mahdollistaa, että riistaosumassa luoti säilyttää massansa erittäin hyvin ja sievenyy tehokkaasti, eli pysäyttää riistaeläimen varmemmin. Luja bondaus siis tekee luodista suurriistan metsästyksen tehokkaan ja turvallisen.

2 LEAN & VIRTASTEHOVUUS

2.1 Lean

Leanin määrityksenä voidaan pitää prosessien kehittämistä asiakkaalle tuotetun arvon maksimoimiseksi minimoimalla hukkaa. Lean -periaatteita käytetään siis liiketoiminnan ja sen prosessien tarkasteluun keskittymällä asiakkaalle tuotettuun arvoon ja hukan poistamiseen. Tämän lähestymistavan etuna on muun muassa se, että asiakkaiden tyytyväisyyden parantaminen johtaa usein yrityksen tulovirtojen kasvamiseen. Lisäksi Lean -periaatteiden avulla voidaan tunnistaa mahdolliset pullonkaulat ja muut kehittämiskohdet. Leanin avulla on mahdollista parantaa koko organisaation tehokkuutta, yksinkertaistaa prosesseja ja säästää liiketoiminnan kuluissa poistamalla arvoa tuottamattomat toiminnot. (Wright, 2017, 17-18, 22)

Lean -ajattelu on alun perin lähtöisin Japanista. Toyota Motor Corporationin päätuotantoininööri Taiichi Ohnon tehtävänä oli kehittää Toyotan tuottavuutta. Haasteena tuottavuuden kehittämisessä oli yrityksen vajaavainen kassa ja vanhahko konekanta. Ohnon täytyi siis löytää tuottavuusongelmiin ratkaisut niin, että tuottavuus paranisi pienillä muutoksilla. (Six Sigma)

Taiichi Ohno kehitti tervettä järkeä käyttämällä ja yritykseen vahvasti sitoutumalla Toyotan tuotantofilosofiaa lähes 60 vuoden ajan. Hän antoi yhdessä Eiji Toyodan kanssa filosofialla nimen Toyota Production System. Vuonna 1978 Ohno julkaisi tuotantofilosofian kirjassa Toyota Production System: Beyond Large Scale Production. Siinä Ohno hylkäsi mittakaavaedut ja suurtuotannon ja esitti, että tuottavuutta saa aikaan virtaus. (Modig & Åhlström, 2013, 78)

Leanissä toiminnan kehittämiseksi on useita eri tapoja. Yleisesti on kuitenkin käytössä menettely, jossa hyödynnetään Leanin viittä perusperiaatetta, jotka ovat:

1. Asiakkaiden tunnistaminen ja arvon määrittäminen
2. Arvovirran tunnistaminen ja kuvaaminen
3. Virtauksen luominen hukka poistamalla
4. Asiakkaiden kysyntään vastaaminen
5. Täydellisyyteen pyrkiminen

(Wright, 2017, 22, 31)

2.2 Virtaustehokkuus

Virtaustehokkuutta tarkasteltaessa huomio kiinnittyy organisaatiossa jalostettavaan yksikköön. Teollisuudessa yksikköinä ovat tuotteet ja palvelualoilla yksikkönä on useimmiten asiakas, jonka tarpeet täytetään. Tätä tehokkuuden lajia sanotaan virtaustehokkuudeksi ja siinä päähuomio on yksikössä, joka virtaa organisaation läpi. Yksikköä kutsutaan virtausyksiköksi. Virtaustehokkuus mittaa sitä, kuinka paljon virtausyksikkö jalostuu tietyn ajanjaksona. Tässä tarkastelussa arvo määräytyy siis virtausyksikön näkökulmasta. (Modig & Åhlström, 2013, 13-14)

Virtausyksikön läpimenoaika on yksi virtaustehokkuuden tarkkailussa tarvittavista komponenteista. Se on yksinkertaisesti ilmaistuna aika, joka virtausyksiköltä kuluu, kun se etenee prosessin alusta loppuun. Prosessit koostuvat toiminnoista, joiden läpi virtausyksikkö etenee. Virtaustehokkuuden ymmärtämiseksi on tärkeää ymmärtää arvoa tuottavien ja arvoa tuottamattomien toimintojen käsitteet. Arvoa tuottavat toiminnot ovat niitä, joiden aikana virtausyksikkö jalostuu jollain tavalla. Esimerkiksi raaka-aineen työstäminen koneessa on arvoa tuottava toiminto. Toiminto on taas arvoa tuottamaton, jos virtausyksikkö ei jalostu sen aikana. Esimerkiksi kun materiaali odottaa varastossa, ei virtausyksikön arvo jalostu. Varastointi on siis arvoa tuottamaton toiminto. Virtaustehokkuudessa on kyse siitä, kuinka suuri osuus arvoa tuottavilla toiminnoilla on kokonaisläpimenoajasta. (Modig & Åhlström, 2013, 22-24, 26-27)

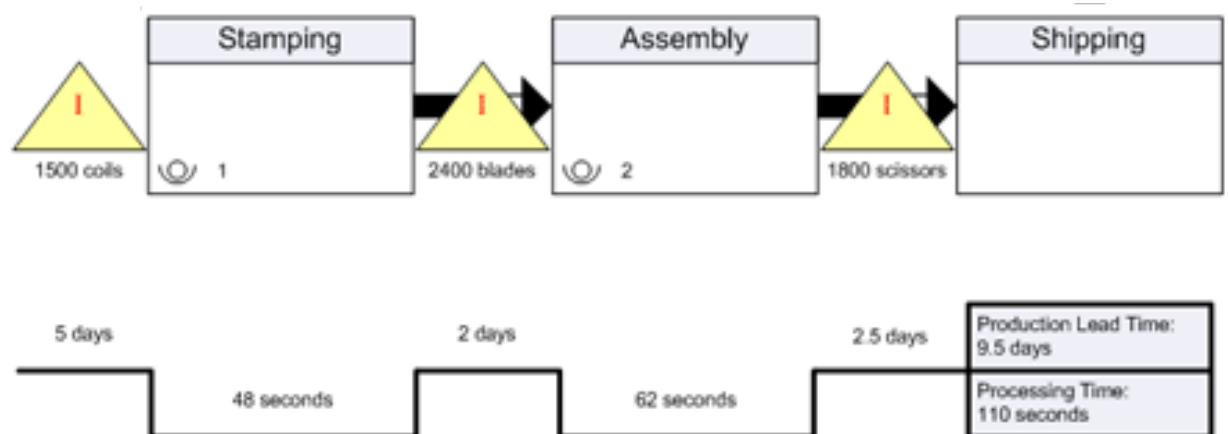
2.3 Arvovirtakuvaus

Arvovirtakuvaus on Lean -työkalu, jonka tärkein tarkoitus on auttaa tunnistamaan tuotannon hukka. Sillä voi analysoida prosessin nykyistä tilaa ja luoda visuaalisen kuvauksen prosessin jokaisesta vaiheesta. Oikeaoppista arvovirtakuvausta luodessa tulee käydä läpi viisivaiheinen prosessi, jonka vaiheet ovat:

1. **Tuoteperheen tunnistaminen.** Ensimmäinen vaihe tehdään, jotta tunnistetaan tuotteet, jotka kuuluvat samaan prosessiin. Vain näiden tuotteiden tuotantoprosessi sisällytetään arvovirtakuvaukseen. Ensimmäisessä vaiheessa tulisi myös määrittää ja ymmärtää projektille asetetut päämäärät ja tavoitteet.
2. **Nykyisen arvovirran tunnistaminen.** Vaiheessa kaksi nykyisen prosessin arvovirrasta muodostetaan alustava arvovirtakuvaus. Se on mahdollista muun muassa käyttämällä jo olemassa olevia prosessikaavioita, sekä perehtymällä prosessin nykytilaan käytännössä. Tässä vaiheessa otetaan käyttöön prosessin tehokkuutta mittaavia mittareita, joita ovat ainakin tuotannon tahtiaika, volyymi, romuprosentti, kunkin tuotantovaiheen kesto, sekä koko prosessin läpimenoaika.
3. **Prosessin tarkkailu ja tutkiminen.** Kolmannessa vaiheessa suoritetaan niin sanottu ”gemba -kävely” eli tutkitaan prosessia sieltä käsin, missä todellinen työ tapahtuu. Riippuen prosessin luonteesta, se voi tapahtua esimerkiksi tuotantotiloissa, toimistolla tai varastossa. Tämä tehdään siksi, että olemassa oleva dokumentaatio ja prosessikaaviot eivät aina vastaa prosessin todellista kulkua. Lisäksi hukan tunnistaminen on helpompaa, kun näkee prosessin vaiheet paikanpäällä.
4. **Arvovirtakuvauksen luominen.** Neljännessä vaiheessa luodaan visuaalinen arvovirtakuvaus. Siitä tulisi ilmetä prosessin arvoa tuottavat vaiheet, eli toiminta joka jalostaa tuotteen arvoa ja josta asiakas on valmis maksamaan. Lisäksi arvovirtakuvauksesta tulee näkyä vaiheet, jotka eivät lisää tuotteen arvoa asiakkaan näkökulmasta, sekä vaiheet joiden tekeminen on välttämätöntä, mutta ne eivät varsinaisesti lisää tuotteen arvoa.
5. **Muutos suunnitelman luominen.** Viidennessä vaiheessa luodaan vastaava kuvaus tavoitetilasta. Tarkoitus on muodostaa ideaalinen arvovirtaus, josta hukka on poistettu. Tämä luo pohjan projektille ja auttaa liikkumaan kohti optimaalisempaa virtausta.

(Wright, 2017, 56-60)

Arvovirtakuvaus on visuaalinen kuvaus siitä, miten materiaali ja informaatio virtaavat prosessissa. Se koostuu kolmesta osasta, jotka ovat prosessikuvaus, aikajana ja informaatiovirtaus. Arvovirtakuvauksessa käytetään erilaisia symboleja visualisoimaan kuvattu prosessi. Arvovirtauksessa olevat prosessit kuvataan prosessilaatikolla. Materiaalin varastointia kuvataan kolmiolla, jonka sisällä on I – kirjain (Inventory) ja materiaalin liikkumista prosessien välillä kuvataan nuolella, joka johtaa prosessilaatikosta seuraavaan. Aikajanalalle kirjataan arvovirtauksen eri vaiheisiin kuluva aika. Arvoa tuottaviin toimintoihin kuluva aika, eli tuotetta jalostavat prosessit kuvataan aikajanan alaosaan ja arvoa tuottamattomiin toimintoihin kuluva aika kuvataan aikajanan yläosaan. Näin arvovirtakuvauksesta ilmenee helposti virtausyksikön läpimenoaika ja siitä voidaan helposti tarkastella prosessin virtaustehokkuutta, eli arvoa tuottavien ja arvoa tuottamattomien toimintojen suhdetta.



KUVA 1. Arvovirtakuvauksen prosessikuvaus ja aikajana (Microsoft Office)

Tässä opinnäytetyössä tehdyissä arvovirtakuvauksissa on esitettyinä prosessien prosessikuvaus sekä aikajana. Informaatiovirtaus on tässä yhteydessä jätetty pois, jotta arvovirtakuvaus vastaisi paremmin tämän opinnäytetyön tarkoitusta, joka on tuotantoprosessien virtaustehokkuuksien analysoiminen ja vertaileminen.

2.4 Littlen laki

Valmistusprosessin läpimenoajalla tarkoitetaan kokonaisaikaa, joka tarvitaan yhden tuotteen valmistamiseen alusta loppuun kyseisen prosessin osalta.

Valmistusprosessin teoreettisen läpimenoajan määrittämiseen käytetään teollisuudessa usein Littlen lakia. Kaavan nykyisin käytössä oleva muoto on,

$$WIP = TH \cdot CT \quad (1)$$

jossa *WIP* on keskeneräinen tuotanto (Work in Process), *TH* on läpimenoaika (Throughput) ja *CT* on jaksoaika (Cycle Time). Littlen lain avulla voidaan arvioida jonotusaika, eli keskeneräisessä tuotannossa (WIP) kappaleen viettämä aika. Yksinkertaisimmillaan kaava antaa jonotusajan kertomalla prosessissa olevien kappaleiden määrän niiden käsittelyajalla. (Six Sigma)

2.5 Hukka ja sen poistaminen

Kaikessa liiketoiminnassa täytyy suorittaa erilaisia toimintoja ja tehtäviä. Jotkut niistä lisäävät asiakasnäkökulmasta tarkasteltuna todellista ja suoraa arvoa tuotteeseen tai palveluun. Asiakkaalle arvoa tuottavat ominaisuudet ovat niitä, jotka miellyttävät asiakasta ja joista asiakas on valmis maksamaan. Toimintoja joista asiakas on valmis maksamaan kutsutaan arvoa tuottavaksi toiminnaksi. Ne toiminnot, jotka eivät lisää tuotteen tai palvelun arvoa asiakasnäkökulmasta ovat niin sanottua arvoa tuottamatonta toimintaa, joka on aina mahdollisesti hukkaa. (Wright, 2017, 34)

Hukka rajoittaa virtausta ja näin ollen hukan poistamalla voi nopeuttaa raakamateriaalin prosessointia valmiiksi, asiakasarvoa täynnä olevaksi, tuotteeksi. Hukka on Lean -ajattelussa jaettu kahdeksaan osa-alueeseen ja ne ovat:

1. **Virheet.** Virheillä tarkoitetaan toimintaa, joka maksaa aikaa ja vaivaa mutta ei lisää tuotteen tai palvelun arvoa. Virheet saattavat johtaa asiakastyytyväisyyden laskemiseen. Esimerkki virheestä on asiakasodotusten väärin ymmärtäminen.
2. **Ylituotanto.** Ylituotanto tarkoittaa esimerkiksi liian suuren kappalemäärän tuottamista tai halutun kappalemäärän liian aikaista tuottamista. Ylituotanto kasvattaa tuotantoon tarvittavaa työvoimaa. Ylituotantoa on esimerkiksi tuotteiden, joille ei ole kysyntää, valmistaminen.
3. **Odottelu.** Odottelulla tarkoitetaan mitä tahansa odottelua, joka pysäyttää arvoa tuottavan työn. Tätä voi olla esimerkiksi raaka-aineiden saapumisen odottaminen, tuotannon pullonkauloista johtuva odottaminen, tai kokouksen alkaminen myöhässä.
4. **Työntekijöiden ideoiden ja luovuuden hukkaan heittäminen.** Työntekijöiden ideoiden ja luovuuden hukkaan heittäminen taas tarkoittaa kaikkea toimintaa, jossa työntekijöiden taidot jätetään käyttämättä. Tätä voi olla esimerkiksi ehdotusten kuuntelematta jättäminen tai työntekijöiden oikeuksien ja vastuualueiden liiallinen rajaaminen.
5. **Kuljettaminen.** Kuljettaminen ei lisää tuotteen arvoa, vaan se on hukkaa. Kuljettamista on kaikki materiaalin liikuttelu prosessin eri vaiheiden välillä.
6. **Varastot.** Liiallinen varastointi on myös yksi hukan muodoista. Sitä voi tapahtua raaka-aineille, komponenteille ja keskeneräiselle tai valmiille tuotteille.
7. **Ylimääräinen liike.** Ylimääräinen liike, eli liikehukka, tarkoittaa tarpeetonta fyysistä liikkumista. Sitä voi tapahtua esimerkiksi sen takia, että työvaiheen tekemiseen tarvittavat työkalut tai komponentit eivät ole lähistöllä, vaan ne joutuu erikseen siirtämään työpisteelle.
8. **Ylikäsittely.** Ylikäsittely on niiden prosessin vaiheiden toistamista, jotka ovat jo kertaalleen tehtyjä. Lisäksi täysin tarpeettomien prosessien tekeminen on ylikäsittelyä.

(Wright, 2017, 35, 69-70)

3 METSÄSTYSLUOTI

3.5 Metsästypatruuna ja luoti

Metsästyspatruunaan valitaan luoti usein ensisijaisesti halutun maalivaikutuksen mukaan. Maalivaikutus on tärkein valintaan vaikuttava kriteeri etenkin valittaessa luotia suurriistalle, kuten hirvälle tai karhulle. Metsästyskäyttöön tulevassa luodissa tarkkuus on siis usein toissijainen mittari. Etenkin suurristametsästäjät valitsevat useinskäyttöönsä luodin, joka laajenee kärjestä osuessaan riistaeläimeen. (Paananen, 2014, 46)

Puolivaippaluoti on eniten käytetty metsästysluoti. Siinä luodin pehmeä lyijy-kärki avautuu esteeseen osuessaan. Luoti muotoutuu sienimäiseksi, jolloin sen etuosan halkaisija kasvaa 2-3 kertaiseksi, ja luoti pysähtyy eläimeen. (Hyytinen, 2016, 147)

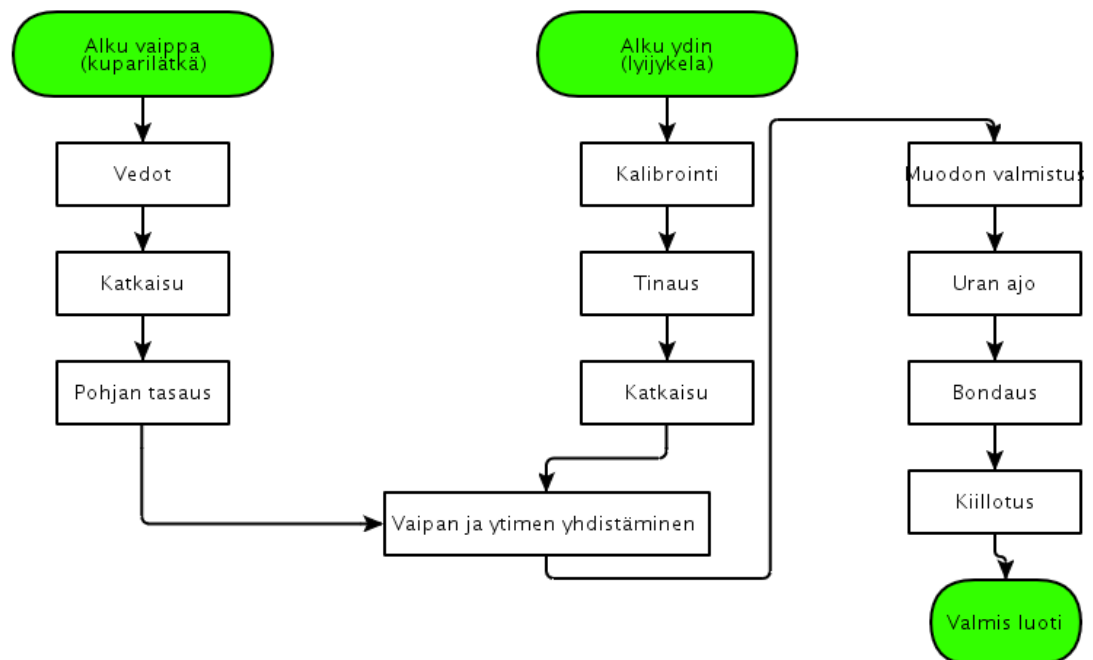
Luoti on patruunan ominaisuuksien ja osumatarkkuuden kannalta avainasemassa. Tekijöitä, jotka vaikuttavat luodin ominaisuuksiin ovat:

1. Luodin rakenne
2. Paino
3. Läpimitta
4. Vaipan seinämäpaksuus ja sen tasaisuus
5. Luodin perän muoto ja suoruus

Osuman kannalta optimaalinen tilanne on, kun luonnin ulkohalkaisija on hyvin lähellä piipun isokaliiperia, eli piipun sisähalkaisijaa mitattuna rihlaurasta toiseen. Mikäli luoti on tästä paksumpi, alkaa patruunassa paine kasvaa ja luoti pureutuu laukaistaessa piipun rihloihin liikaa ja puristuu hieman kasaan. Tämän tiedetään aiheuttavan käyntitarkkuuden heikentymistä ja ilmiö saattaa jopa irrottaa luodin lyijysydämen irti kuparivaipasta. (Paananen, 2014, 46-47)

3.6 Luodin valmistus

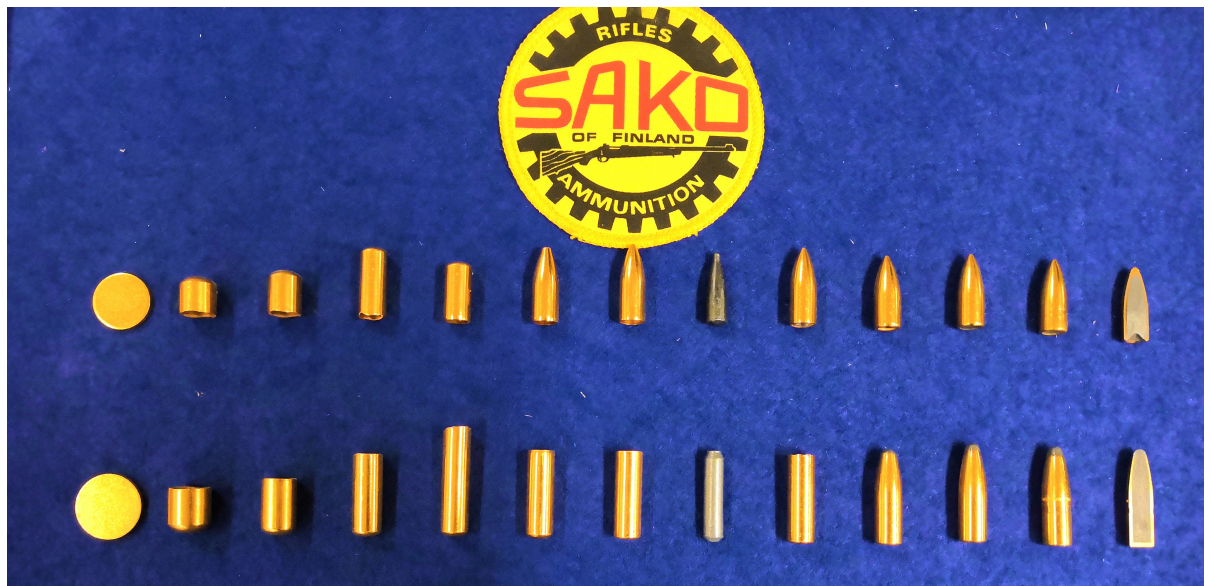
Metsästysluodin valmistus on monivaiheinen prosessi. Luodin valmistuksessa yleisimmin käytettäviä valmistusmenetelmiä ovat syväveto- ja kylmämuokkausmenetelmät. Eri tyyppisten luotien valmistusmenetelmät ja etenkin työvaiheiden määrä poikkeavat kuitenkin toisistaan. Luodin valmistuksen jokainen työvaihe vaatii erityistä tarkkuutta ja ammattitaitoa, sillä kaikki valmistusvirheet ja poikkeamat luodissa aiheuttavat eroja ballistisessa käyttäytymisessä ja siispä huonontavat osumatarkkuutta. (Paananen, 2014, 47)



KUVIO 1. Kuparivaippaisen lyijyluodin valmistusvaiheet pääpiirteittäin

Kuparivaippaisen lyijyluodin valmistusprosessi pääpiirteittäin on kuvattuna kuviossa 1. Luodin valmistus alkaa kuparilätkästä, joka vedetään kylmämuokkausmenetelmällä, syvävedolla, ensin kupiksi ja sitten useammassa vaiheessa pidemmäksi aihiksi. Tämän jälkeen syvävedetty aihio katkaistaan ja sen pohja tasataan. Näin luodin kuparivaippa on valmis työvaiheeseen, jossa se ja lyijy-ydin yhdistetään. Vaipan sisälle jäävän lyijy-ytimen valmistus alkaa kelalla olevasta lyijylangasta. Lyijylanka kalibroidaan langan kalibrointikoneella haluttuun ulkohalkaisijaan. Näin voidaan varmistaa, että valmiille luodille

saadaan haluttu massa. Tämän jälkeen lyijylanka tinataan, jotta myöhemmässä vaiheessa lyijy-ytimen liittäminen kuparivaippaan, eli luodin bondaus, onnistuu. Vaipan ja ytimen liitoksessa käytetään tavallisesti juotteena tinaa. Tinattu lyijylanka katkaistaan lyijy-ytimen valmistuskoneella haluttuun mittaan ja massaan. Kun luodin kuparinen ulkovaippa ja lyijy-ydin on valmistettu, ne yhdistetään luotien valmistuskoneella. Luotien valmistuskoneella myös supistetaan valmiin luodin ulkomuoto. Tämän jälkeen kappaleeseen ajetaan tarvittavat urat. Seuraava valmistusvaihe on bondaaminen. Bondauksessa luodin lyijy-ydin juotetaan kiinni kuparivaippaan, jotta riistaeläimeen osuessaan luoti sieneytyisi tehokkaasti ja pysyisi yhtenä kappaleena. Hyvällä bondauksella voidaan saavuttaa tehokas vaikutus riistaeläimeen ja varmistaa, että luoti toimii halutulla tavalla. Kuvassa 2 on esitetty kuparivaippaisen lyijyluodin valmistusvaiheita kuparilätkästä ja lyijylangan pätkästä valmiiseen tuotteeseen.



KUVA 2. Eri tyyppisten kuparivaippaisen lyijyluotien valmistusvaiheet

3.7 Sako Super Hammerhead

Sako Super Hammerhead on terävähkökärkinen metsästysluoti, jonka muotoilu on veneperäinen. Sitä suositellaan käytettäväksi suurriistan, kuten peuran, hirven ja karhun, metsästämiseen. Sen toiminta perustuu veneperämuotoilun ansiosta hyvään osumatarkkuuteen, sekä lyijy-ytimen ja kuparivaipan laadukkaan bondauksen mahdollistamaan kontrolloituun avautumiseen osuman vaikutuksesta. Luodin bondaus mahdollistaa myös korkean jäämämäärän joka johtaa tehokkaaseen penetraatioon. (Sako Oy)



KUVA 3. Sako Super Hammerheadin muoto, rakenne ja sieneytynyt luoti (Sako Oy)

Tässä opinnäytetyössä keskitytään juuri Sako Super Hammerhead -luodin valmistusprosessin kehittämiseen ja analysoimiseen. Lisäksi opinnäytetyössä valmistetut testiluodit vastaavat valmistusprosessiltaan pääosin Sako Super Hammerhead -luodin valmistusprosessia – erona on juuri eri menetelmällä toteutettu lyijy-ytimen ja kuparivaipan välinen liitos, eli luodin bondaus. Sako Super Hammerhead -luotien bondaus on toteutettu tinajuotosmenetelmällä ja testiluodit on valmistettu diffuusiobondausmenetelmällä.

3.8 Diffuusiobondaus

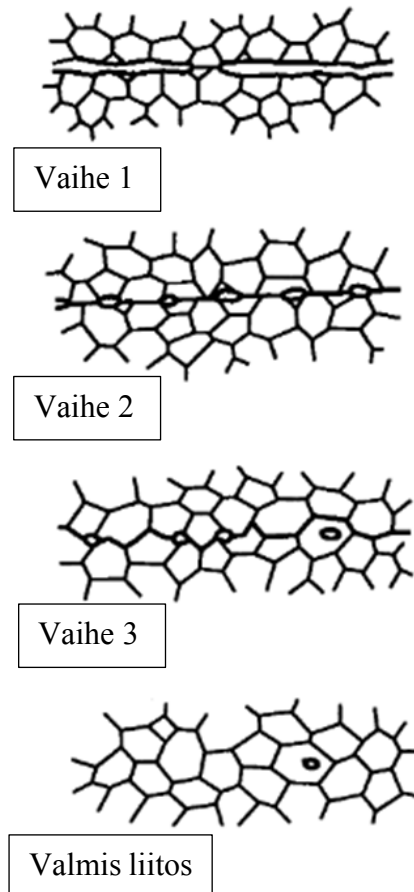
Diffuusiobondaus on liitosprosessi, jolla metallien liittäminen toisiinsa on mahdollista ilman erillistä juotosainetta. Diffuusiobondauksella voidaan saavuttaa kestävä liitos niin, että kumpikin liitettävistä aineista säilyy kiinteässä olomuodossa. Diffuusiobondauksen erottaa muista metallien liitosmenetelmistä, kuten hitsaamisesta ja juottamisesta lisäksi myös se, ettei siinä tarvita lainkaan juotosainetta. Diffuusiobondauksella saavutetaan kiinteä materiaaliliitos kahden kappaleen välille usein näissä olosuhteissa:

- Liittäminen tapahtuu materiaalien sulamispisteen alapuolella olevassa lämpötilassa (usein noin 0.5-0.7 kertainen lämpötila matalamman sulamispisteen omaavan materiaalin sulamispisteestä)
- Liitos pintojen välille muodostetaan paineen alaisena, joka ei kuitenkaan muokkaa materiaalien makrorakennetta
- Juotosainetta voidaan käyttää, mutta se ei saa aiheuttaa liitettävien materiaalien väliin sulaa ainetta

(Davis, 2014, 1104)

Diffuusiobondauksella voidaan saavuttaa kappaleiden välinen liitos, ilman odottamattomia epäjatkuvuuskohtia kappaleiden mikrorakenteessa ja muodostamatta ei-toivottuja muutoksia kappaleiden materiaalisiin ominaisuuksiin. Diffuusioliitoksen syntymisen kannalta on erittäin tärkeää, että liitettävien materiaalien pinnat ovat erinomaisessa kunnossa, eikä liitoksen väliin saa jäädä oksidia tai muita epäpuhtauksia. (Davis, 2014, 1104)

Diffuusiobondausliitosprosessi voidaan mieltää kolmivaiheisena tapahtumana. Vaiheet on esitetty kuvassa 4. Vaiheet on vaikea erottaa, sillä ne tapahtuvat jatkumona eivätkä erillisinä välivaiheina.



KUVA 4. Diffusiobondauksen vaiheet (Metals Handbook)

Ensimmäisessä vaiheessa materiaalien välinen rajapinta tulee tiiviimmäksi, eli pinnoista vastakkain olevan alueen pinta-ala alkaa kasvaa, sillä epämuodostumat ja karkeudet alkavat tasoittumaan. Ensimmäisessä vaiheessa tärkeimmät parametrit liitoksen onnistumisen kannalta ovat pinnanlaatu, myötölujuus, materiaalin muovautuminen, lämpötila ja paine. Ensimmäisen vaiheen jälkeen liitosalue on muuttunut tasomaisesta kontaktialueesta kiinteästi kiinni oleviin alueisiin ja niiden välissä oleviin huokosiin. Vaiheessa kaksi liitospinnalla olevat huokokset pienenevät merkittävästi ja suurin osa niistä kuroutuu kokonaan kiinni. Tässä vaiheessa atomien kiinni kuroutumiseen vaikuttava mekanismi on diffuusio ja kappaleiden välille on kakkosvaiheen jälkeen muodostunut diffusiobondaus. Kolmannessa vaiheessa bondausalue, eli alue jolla materiaalien atomit ovat sekoittuneet keskenään, kasvaa huomattavasti ja onnistuneessa diffusiobondauksessa lähes kaikki loputkin huokokset menevät umpeen. Jäljelle jäävät huokokset eivät enää merkittävästi vaikuta liitoksen lujuuteen, vaan diffusiobondaus on kestävä ja onnistunut. Kolmannen vaiheen jälkeen materiaalien välille on muodostunut kestävä diffusiobondaus, eikä niiden välillä ole enää havaittavaa raerajaa. Liitos on siis valmis. (Davis, 2014, 1104)

Tässä opinnäytetyössä sovelletaan diffuusiobondausliitosta kuparivaippaisten lyijy-luotien lyijy-ytimen ja kuparivaipan liittämiseen. Tavoitteena on valmistaa testiluoteja, joissa on erittäin kestävä liitos vaipan ja ytimen välillä.

3.9 Murskauskoe ja jäämämassa

Murskauskoe on patruunateollisuudessa yleisesti käytetty metsästysluotien toiminnallisuutta ja laatua mittaava testi. Murskauskoe on testausmenetelmä, jossa päästään nimenomaan tarkkailemaan luodin bondauksen laatua. Siinä luoti ammutaan johonkin eläimen kudosta mallintavaan massaun, kuten paperimassaan tai gelatiiniin. Luotettavien ja vertailukelpoisten testitulosten saamiseksi luodit on ammuttava samaan materiaaliin vakioetäisyydeltä ja vakiolähtönopeudella. Murskaustestissä kohdemassaan osuessaan luodin liike-energia muuttuu muotoon ja luotiin kohdistunut törmäys muuttaa luodin muotoa samanaikaisesti kun luoti etenee massassa. Suurriistan metsästyksen tarkoitettuna luodin toivotaan muovautuvan osuman aikana niin, että lopputulos on sienimäinen. Puhuttaessa tästä muodonmuutosilmiöstä, käytetään usein termiä luodin sieneytyminen. Osumassa luoti menettää myös massaansa, sillä luodista irtoaa materiaalia (esimerkiksi lyijyä ja kuparia) törmäyksen vaikutuksesta. Tilanteissa, joissa luodin bondaus on heikko tai muuten epäonnistunut, lyijy-ydin saattaa irrota kuparivaipasta kokonaan. Mitä vähemmän luodista materiaalia irtoaa, sen parempana luotia pidetään, sillä korkea jäämäpainoprosentti tekee luodista tehokkaamman ja luotettavamman, eikä riistaeläimen lihaa pilaannu luodista irtoavien palasten takia.

Sako Oy:ssä käytetty murskauskoe menetelmä on paperimassaan ampuminen. Siinä luoti ammutaan sanomalehtipaperista valmistettuihin paperimassapaaleihin 30 metrin etäisyydeltä. Ammunnan jälkeet luodit punnitaan ja niiden sieneytymistä analysoidaan. Ammunnan jälkeen punnitun luodin massaa verrataan luodin lähtömassaan ennen ampumista. Mitä korkeampi prosentuaalinen osuus luodin massasta on säilynyt törmäyksessä, sitä laadukkaampana luotia pidetään. Luodin jäämämassaprocentin laskukaava murskauskoeissa on siis:

$$\text{Jäämämassaprocentti} = \frac{m_j}{m_e} \cdot 100\% , \quad (2)$$

jossa m_j on luodin massa ammunnan jälkeen ja m_e on luodin lähtömassa ennen ammuntaa.

4 LÄMPÖKÄSITTELYLAITTEET

4.1 Uunit

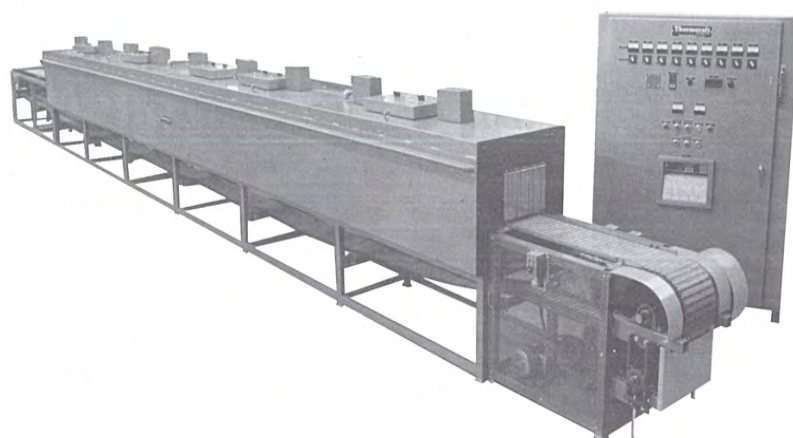
Teolliseen lämpökäsittelyyn käytetään kahden eri tyypin uuneja: kertapanosteisia uuneja (Kuva 5) ja jatkuvatoimisia uuneja (Kuva 6). Kertapanosteisissa uuneissa käsiteltävät kappaleet panostetaan ja poistetaan manuaalisesti uunista. Kertapanosteinen uuni koostuu eristetystä lämpökammioista, ulkoisesta teräskuoresta, kammion lämmitysjärjestelmästä ja ovesta, josta kappaleet ladataan ja poistetaan. Kertapanosteisen uunin käyttäminen tuotannon lämpökäsittelyssä sitoo merkittävästi työvoimaa juuri manuaalisen kappaleiden käsittelyn takia ja se tulee huomioida kustannuksia miettiessä. Kertapanosteisia uuneja käytetään erityisesti erikoiskappaleiden ja isojen kappaleiden käsittelyyn, sekä sellaisten kappaleiden käsittelyyn jotka vaativat useita lämpökäsittelysyklejä. (Bonami, 2010, 143)

Kertapanosteinen uunin, eli kammionuunin kammio voi olla joko ilma-atmosfääri, suojaava atmosfääri tai reaktiivinen atmosfääri. Usein ilma-atmosfäärin uunit ovat rakenteeltaan muiden atmosfäärityypin uuneja yksinkertaisia ja edukkaampia. Reaktiivisen tai suojaavan atmosfäärin tarjoavat uunit on rakennettu ilmatiiviiksi ja niissä on oltava kaasun annosteluun tarkoitetut laitteistot. Tämä on teknisesti monipuolisempi toteuttaa, joten ne ovat myös hinnaltaan kalliimpia. Kertapanosteisen uunin lämmitys toteutetaan usein sähkövastuksilla, jotka ovat lämmityskammion reunoilla. Osassa kammionuuneista, etenkin suoja- tai reaktiivikaasuisissa, on kiertoilmajärjestelmä, joka huolehtii kaasun ja lämmön tasaisesta leviämisestä kammioon. (Kivivuori, 2016, 129, 132, 135-136)



KUVA 5. Kertapanosteinen uuni (Garbolite Gero)

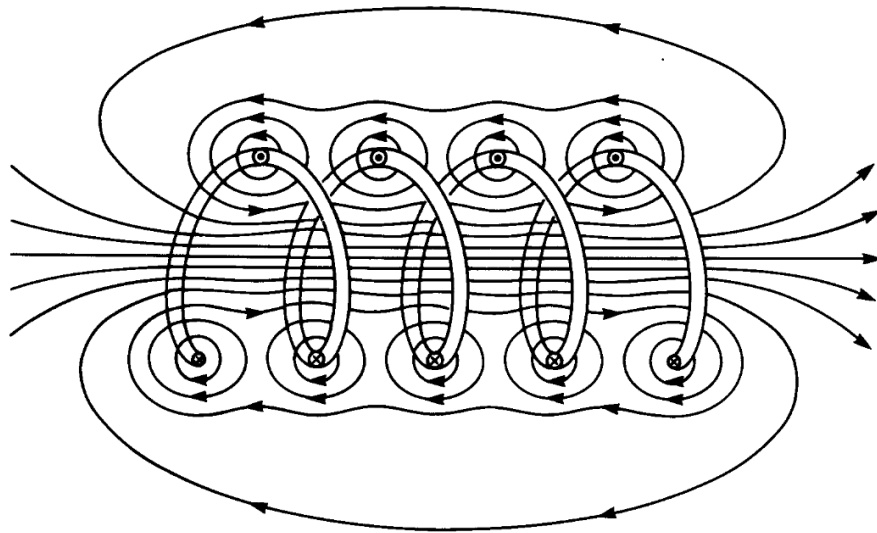
Jatkuvatoimisissa uuneissa on automaattinen kuljetusjärjestelmä. Näin ollen uunin kuormitus on tasainen ja yhtäjaksoinen. Jatkuvatoimiset uunit koostuvat eristetystä lämpökammioista, lämmöntuottojärjestelmästä ja sisäänmeno- ja ulostuloluukuista. Jatkuvatoimiset uunit toimivat siis taukoamattomissa sykleissä ja näin ollen ne soveltuvat hyvin automatisoituun tuotantoon ja korkeille valmistusvolumuille. (Bonami, 2010, 143)



KUVA 6. Jatkuvatoiminen uuni (Thermcraft Inc.)

4.2 Induktiolämpölaitteet

Sähkömagneettinen induktio on yksi tapa lämmittää sähköä johtavia kappaleita, kuten useimpia metalleja. Induktio on yleisesti käytössä oleva tuotannollinen lämmitysmenetelmä ja sitä käytetään muun muassa metallien lämpökäsittelyyn, liittämiseen ja sulattamiseen. Induktiolämmittäminen perustuu sähkövirtojen indusoitumiseen induktiokäämiltä lämmitettävään kappaleeseen. Nämä niin kutsutut pyörrevirrat purkavat ympärilleen energiaa ja aiheuttavat sähköä johtavassa kappaleessa sisäisen lämpenemisreaktion käynnistymisen. (Zinn & Semiatiin, 1988, 1-2, 6, 9)



KUVA 7. Induktiokäämiin läpi virtaavasta sähkövirrasta muodostuvat pyörrevirrat (Elements of Induction Heating)

Induktiolämmitysjärjestelmä koostuu yleensä induktiokäämistä, vaihtovirtalähteestä ja käsiteltävästä työkappaleesta. Käämejä on mahdollista muokata eri muotoisiksi halutun lämpövaikutuksen ja lämmityskuvion mukaan, esimerkiksi eri muotoisille työkappaleille. Induktiolämmitysjärjestelmässä käämi on kytkettynä virtalähteeseen ja sen läpi kulkeva vaihtovirta luo käämin ympärille kääntyilevän magneettikentän, joka kulkeutuu myös työkappaleen läpi. Induktiolla on mahdollisuus saavuttaa erittäin hyvä kontrolli lämmitettävään kappaleeseen kohdistuvan lämmityksen voimakkuuteen ja lämmityskuvioon. Tämä edellyttää kuitenkin laitteiston huolellista suunnittelua etenkin käämin muotoilussa ja virtalähteen taajuuden valitsemisessa. (Zinn & Semiatiin, 1988, 9, 10)



KUVA 8. Induktiolämmityslaite (EFD Induction)

Induktiolämmityksen toiminta perustuu kahteen energian purkautumismekanismiin, jotka ovat induktiolämmitysjärjestelmässä valjastettu lämmityksen tarkoitukseen. Ensimmäinen on lämpöenergian muodostuminen Joulen ensimmäisen lain mukaan, eli lämpöenergian muodostuminen teholla, joka on suoraan verrannollinen johtimen resistanssiin ja siihen syötettävän sähkövirran toiseen potenssiin. Tämä mekanismi tuottaa kaiken lämpöenergian työkappaleeseen, kun se on ei-magneettista materiaalia (esimerkiksi kuparia, alumiinia tai austeniittista ruostumatonta terästä). Toinen, vähemmän merkittävä lämpöenergian muodostumismekanismi on magneettinen hystereesi, eli ilmiö jossa ferromagneettinen kappale säilyttää magneettisuutensa senkin jälkeen, kun ulkoisen magneettikentän vaikutus siihen lakkaa. Tämän ilmiön tuottama energian muutos lämpöenergiaksi perustuu kitkavoimaan molekyylien välillä. Kitkavoima muodostuu molekyylien, eli niin sanottujen magneettisten dipolien välille, kun vaihtovirta luo niihin sähkömagneettisen kentän ensin yhdestä suunnasta ja sitten vastakkaisesta suunnasta. Nämä magneettiset dipolit kääntyvät ympäri kappaleeseen kohdistuvan magneettikentän muuttuessa, eli induktiokäämiin johdettavan vaihtosähkövirran suunnan muuttuessa. Magneettisten dipolien kääntöön vaadittava energia purkautuu työkappaleeseen lämpönä. (Zinn & Semiatin, 1988, 9, 12)

Elektromagneettiset induktiojärjestelmät ovat lähtöisin vuodelta 1831, jolloin Michael Faraday teki havainnon, jonka mukaan vaihtosähkövirta siirtyi rautarenkaan ympärille kierretystä käämistä toiseen. Seuraavien vuosikymmenten aikana tutkijat tiedostivat havainnon potentiaalin ja ryhtyivät tutkimaan mahdollisia sovelluskohteita ja samalla ke-

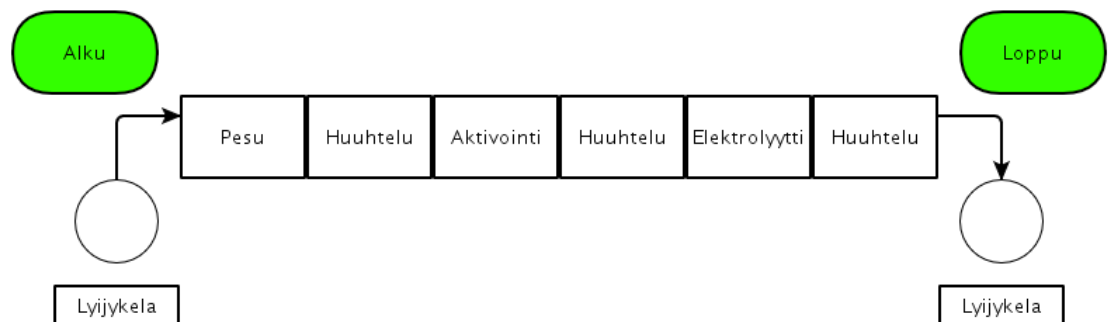
hittivät induktiolaitteistoa. Kuitenkin vasta 1800 -luvun jälkipuoliskolla tajuttiin induction tarjoamat mahdollisuudet sähköä johtavien materiaalien lämmittämiseen. Ensimmäinen merkittävä käyttökohde oli metallien sulattaminen. Myöhemmin 1900 -luvun puolella induktiolämmitykselle keksittiin uusia käyttökohteita, muun muassa metallien lämpökäsittelyt, joiden avulla metalleista saatiin kestävämpiä. Kehitystä edistäviä teollisuudenaloja olivat etenkin auto- ja sotateollisuus, jotka käyttivät induktiolämmitystä esimerkiksi kampiakselien ja panssaria lävistävien ammuksien valmistamiseen. (Zinn & Semiatin, 1988, 3-4)

5 LUOTIEN BONDAPROSESSIN LÄHTÖTILANNE

5.1 Käytössä oleva prosessi - Tinajuotosbondaus

Sako Oy:n käytössä oleva tuotantoprosessi kuparivaippaisille, bondatuille metsästysluodeille on tinajuotosbondaus. Siinä lyijy-ydin bondataan, eli liitetään, kuparivaippaan tinan avulla. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että lyijylanka tulee pinnoittaa tinakerroksella ennen kuparikupin ja lyijylangan yhdistämisvaihetta. Lyijylangan pinnoittaminen tinalla tapahtuu tinauslinjastolla, jonka toiminta perustuu sähkökemialliseen eli elektrolyyttiseen pinnoittamiseen.

Tinauslinjasto koostuu eri altaista, joiden lävitse lyijylanka vedetään sähkömoottorin avulla. Altaissa lyijylanka peitataan, huuhdellaan ja tinataan. Tinausaltaassa on elektrolyyttiliuos, jota lämmitetään lämpövastuksilla ja siihen ohjataan sähkövirtaa. Elektrolyyttiliuoksessa on tina-anodit, jotka luovuttavat elektrolyytin vaikutuksesta ioneita katodina toimivalle lyijylangalle. Näin lyijylanka saa ohuen, vain muutamia mikrometrejä paksun, tinakerroksen.



KUVIO 2. Tinauslinjaston eri vaiheet ovat pesu, huuhtelu, aktivointisuolaliuos, huuhtelu, elektrolyyttiliuos ja huuhtelu

Kun lyijylanka on tinattu, se kalibroidaan oikeaan ulkohalkaisijaan ja pätkitään katkaisukoneella sopivan kokoiseksi, muotoiseksi ja painoiseksi yhtä valmista luotia varten. Tämän jälkeen vedetty kuparikuppi ja tinattu lyijylanka yhdistetään valmistuskoneella. Kappale saa myös valmiin luodin ulkomuodon valmistuskoneella, sillä koneen yksi työvaiheista on supistus, jossa aihio painetaan supistustyynyyn ja sen ulkomuoto muokkautuu halutun muotoiseksi. Tämän jälkeen kappaleeseen ajetaan tarvittavat urat urakoneella.

Seuraava valmistusvaihe on luodin ominaisuuksiin merkittävästi vaikuttava valmistusvaihe, eli kuparivaipan ja lyijy-ytimen liittäminen toisiinsa. Tätä valmistusvaihetta kutsutaan luodin bondaamiseksi. Nykyisessä tuotantoprosessissa luodit bondataan tinajuotosmenetelmällä. Siinä kappaleet lämmitetään kammionuunissa niin, että lyijy-ytimen ja kuparisen ulkovaipan välissä oleva, vain muutaman mikrometrin paksuinen, tinakerros sulaa ja juottaa lyijy-ytimen kuparivaippaan. Tämän nimenomaisen työvaiheen onnistuminen, ja sitä kautta syntyneen liitoksen lujuus on tärkein tekijä, joka vaikuttaa luodin massan säilymiseen riistaosumassa. Massan säilyminen on metsästysluodille merkittävin laadun mittari, sillä mitä enemmän luoti säilyttää massastaan osumassa, sitä tehokkaammin eläin pysähtyy, eikä luodista irtoavat palaset pilaa lihaa. Tinajuottamisen jälkeen luodille tehdään vielä muita viimeisteleviä valmistusvaiheita ja luodin laatu varmistetaan luotikoilla, punnituksella ja lajittelulla.

Tinajuottaminen on valmistusmenetelmänä yleisesti ottaen laaduntuoton kannalta haasteikas, sillä luodin bondauksen laatuun vaikuttaa erittäin monta tekijää. Bondausliitoksen onnistuminen on kiinni muun muassa lyijylangan tinauksen onnistumisesta ja tasalaatuisuudesta. Tinauslinjastolla muodostuvaan tinakerrokseen vaikuttaa todella moni tekijä. Näitä on pelkästään elektrolyyttialtaassa vaikuttavat lyijylangan syöttönopeus, tina-anodien sijoittelu ja määrä, elektrolyyttiliuoksen määrä sekä elektrolyyttiliuoksessa olevien aineiden pitoisuudet, lämpötila ja siihen johdettava sähkövirta, sekä kaikkien edellä mainittujen tekijöiden vaihtelu. Liian nopea lyijylangan syöttönopeus johtaa liian ohueen tinakerrokseen, sillä tinaionit kerryttävät tinakerrosta lyijylankaan ajan mittaan. Vastavasti liian hidas nopeus johtaa liian paksuun tinakerrokseen. Tina-anodien lukumäärä on suoraan verrannollinen elektrolyyttiliuoksen tinapitoisuuteen. Tina-anodien sijoittelu taas vaikuttaa elektrolyyttiliuoksen tinapitoisuuden tasaisuuteen. Myös lämpötila, pitoisuudet ja sähkövirta vaikuttavat vastaavalla tavalla tinaionien kiinnittymiseen ja näin olen tinakerroksen paksuuteen. Lisäksi muun muassa erilaiset vikatilanteet, esimerkiksi tina-anodien huono kontakti johtimiin tai elektrolyyttiliuoksen vaihteleva pitoisuus voivat aiheuttaa tinauslaatuun vaihtelua. Myös muissa käsittelyvaiheissa tinauslinjastolla on bondausliitoksen laatuun vaikuttavia tekijöitä. Huuhtelujen, pesun ja aktivointien tulee onnistua, jotta tinaus elektrolyyttialtaassa voi onnistua.

Myös tuotannon tehokkuuteen liittyy tinajuotosmenetelmässä haasteita, sillä tinajuotosmenetelmällä laadukkaan luodin valmistaminen tarvitsee joitakin työvaiheita, jotka eivät

todellisuudessa lisää luodin loppukäyttäjälle arvoa, vaan ovat välttämättömiä muiden työvaiheiden onnistumisen kannalta. Näitä arvoa tuottamattomia työvaiheita muodostuu muun muassa materiaalin kuljettamisesta, ylimääräisestä käsittelystä, sekä liikkumisesta. Tinajuotosmenetelmä on haastava materiaalivirtaa tarkkailtaessa, sillä lyijylangan tinaamiseen tarkoitettavat koneet ovat suuria ja niissä käytetään voimakkaita kemikaaleja. Näin ollen koneet on haastava sijoittaa normaaleihin tuotantotiloihin ja vaativat erityisjärjestelyjä. Sakolla koneet ovat omassa, kemiallisten prosessien vaatimassa tilassa. Tämä lisää muun muassa materiaalin kuljettamista.

5.2 Tinajuotosprosessin tehokkuus – vaiheittainen arvonmääritys, arvovirtakuvaus ja hukka

Nykyisen Sako Oy:llä käytössä olevan tuotantoprosessin, tinajuotosbondaamisen, tehokkuutta voi analysoida monella tapaa. Tarkasteluun valitut arviointimenetelmät ovat arvovirtakuvaus ja materiaalivirran vaiheiden arvonmääritys. Lisäksi prosessia tarkastellaan hukan, eli arvoa tuottamattoman työn kannalta. Tarkoituksena on muodostaa mahdollisimman laaja ja tarkka kuvaus nykyisen tuotantoprosessin tehokkuudesta, jotta sitä voisi verrata uuteen suunnitteilla olevaan tuotantoprosessiin.

Ensimmäsenä tarkkailussa on materiaalivirran vaiheiden arvonmääritys. Siinä koko tuotantoprosessi on jaettu vaiheisiin ja jokaisen vaiheen kohdalta on arvioitu, luoko se asiakkaan näkökulmasta tuotteeseen lisäarvoa. Tämän arviointimenetelmän tarkoituksena on tunnistaa prosessissa olevat epätehokkuudet ja arvioida objektiivisesti prosessin tehokkuutta. Tämä arviointimenetelmä on valittu tarkailuun, sillä se huomioi myös työvaiheiden välillä tapahtuvan toiminnan ja antaa sitä kautta kokonaisvaltaisemman arvion tuotannon tehokkuudesta. Lisäksi materiaalivirran vaiheittainen kuvaus antaa mahdollisuuden tunnistaa ne vaiheet, jotka kaipaavat parannusta. Taulukossa on merkitty vihreällä ne työvaiheet, joiden arvioidaan tuottavan lisäarvoa tuotteeseen asiakasnäkökulmasta. Keltaisella taas on merkitty ne työvaiheet, joiden tekeminen on välttämätöntä, mutta ne eivät lisää tuotteeseen arvoa. Punaisella on listattu ne työvaiheet, joiden arvioidaan olevan asiakasnäkökulmasta arvoa tuottamattomia.

TAULUKKO 1. Lyijy-ytimen valmistusvaiheiden arvontuotto asiakasnäkökulmasta

Luotituotannon materiaalivirran vaiheet, joihin bondausmenetelmä vaikuttaa

Lyijy-ytimen valmistus:

1	Lyijykelojen saapuminen tehtaalle
2	Siirto lyijylangan kalibrointikoneelle
3	Hitsaus tyssäshitsauskoneella edelliseen lyijy-lankaan
4	Lyijylangan kalibrointi 1
5	Lyijykelan siirto lavalle
6	Siirto pumppukärryillä lähtöalueelle
7	Kuljetus ulkotrukilla
8	Siirto tinauslinjastolle pumppukärryillä
9	Hitsaus tyssäshitsauskoneella edelliseen lyijy-lankaan
10	Lyijylangan tinaaminen
11	Lyijykelan siirto lavalle
12	Siirto pumppukärryillä lähtöalueelle
13	Kuljetus ulkotrukilla
14	Siirto lyijylangan kalibrointikoneelle
15	Hitsaus tyssäshitsauskoneella edelliseen lyijy-lankaan
16	Lyijylangan kalibrointi 2
17	Siirto lyijy-ytimen valmistuskoneelle
18	Valmistus lyijy-ytimen valmistuskoneella
19	Siirto öljynpoistokoneelle
20	Materiaali läpi öljynpoistokoneesta
21	Materiaalin siirto luotien valmistuskoneelle

Lisäarvo:

VEAL
EAL
EAL
AL
EAL
EAL
EAL
EAL
EAL
AL
EAL
EAL
EAL
EAL
AL
EAL
AL
EAL
AL
EAL

TAULUKKO 2. Kuparivaipan ja lyijy-ytimen liittämisen prosessin vaiheiden arvontuotto asiakasnäkökulmasta

Kuparivaipan ja lyijy-ytimen liittäminen:

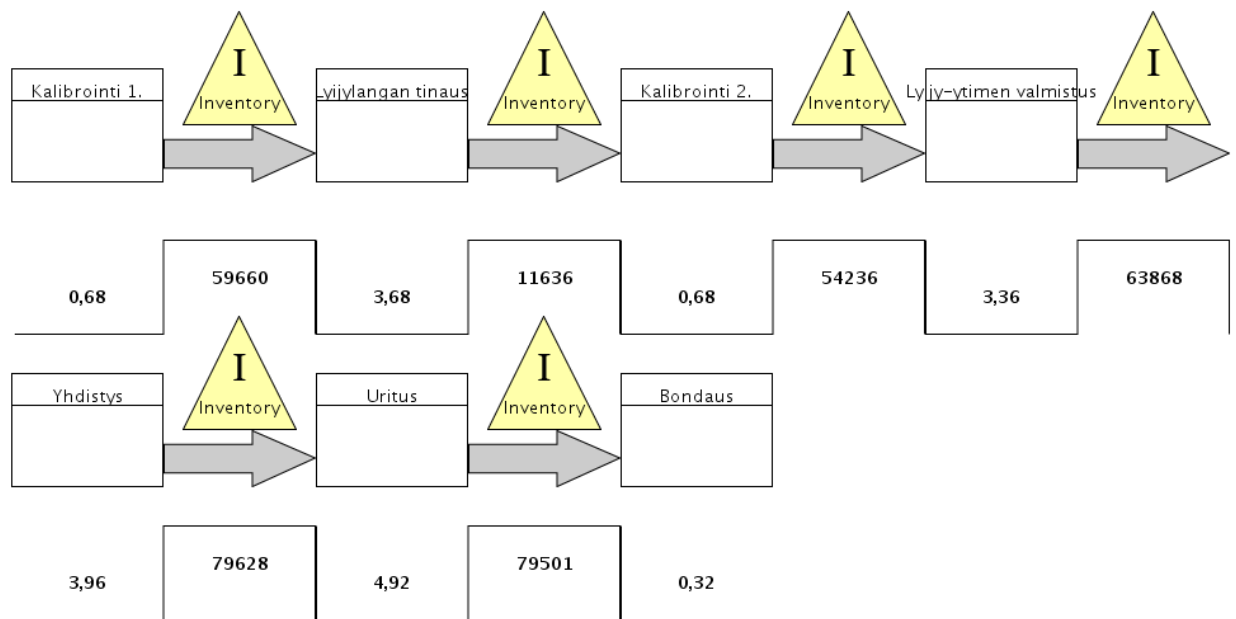
1	Luotien valmistus valmistuskoneella
2	Materiaalin siirto urakoneelle
3	Uran ajaminen
4	Kappaleiden siirto urakoneelta puulaatikoihin
5	Puulaatikoiden siirto lavalle
6	Siirto pumppukärryillä lähtöalueelle
7	Kuljetus ulkotrukilla
8	Siirto kammionuunille pumppukärryillä
9	Kappaleiden siirto puulaatikoista uunikoreihin
10	Korien nosto käsinosturilla uuniin
11	Lyijy-ytimen liittäminen vaippaan uunissa
12	Kappaleiden nosto käsinosturilla jäähdytysaltaaseen
13	Kappaleiden jäähdytys
14	Nosto käsinosturilla + materiaalin siirto puulaatikkoon
15	Lavan siirto pumppukärryillä lähtöalueelle
16	Kuljetus ulkotrukilla

AL
EAL
AL
EAL
EAL
EAL
EAL
EAL
EAL
EAL
AL
EAL
EAL
EAL
EAL
EAL

**Materiaali eteenpäin prosessissa**

Vaiheisiin jaottelu havainnollistaa tässä tapauksessa nykyisen tuotantoprosessin monivaiheisuutta ja sitä, että tuotantoprosessi sisältää verrattaen paljon vaiheita, jotka eivät jalosta tuotteen arvoa asiakkaan näkökulmasta. Taulukossa 1 on esitetty luodin lyijy-ytimen valmistusprosessi vaiheittain ja taulukossa 2 on taas esitetty luodin kuparivaipan ja lyijy-ytimen liitosprosessi. Nämä muodostavat yhdessä kokonaisuuden, joka sisältää kaikki työvaiheet joihin luodin bondausmenetelmä vaikuttaa. Tuotantoprosessissa on jokseenkin paljon kappaleiden manuaalista siirtoa ja kuljetusta eri laitteilla, kuten pumppukärriyllä, trukilla ja käsinosturilla sekä materiaalilaatikoiden siirtoja käsin. Nämä vaiheet ovat asiakkaan näkökulmasta arvoa tuottamattomia, sillä ne eivät konkreettisesti muokkaa tuotetta asiakkaan haluamaan suuntaan. Toisinsanoen nämä työvaiheet ovat hukkaa.

Nykyisestä tuotantoprosessista luotiin arvovirtakuvaus. Se tehtiin tutustumalla prosessiin yhdessä työntekijöiden kanssa ja kulkemalla koko prosessin läpi alusta loppuun keräten tietoa prosessin eri vaiheista. Arvovirtakuvaus on esitetty kuviossa 3 ja se on rajattu käsittelemään niitä prosessin osa-alueita, joihin diffuusiobondausprosessiin siirtyminen vaikuttaisi. Esimerkiksi kuparikupin valmistus on tästä kuvauksesta jätetty pois, sillä se pysyisi tämän muutoksen osalta nykyisellään. Arvovirtakuvauksessa on huomioitu nykyisen prosessin tuotetta prosessoivat vaiheet ja ne on esitetty prosessilaatikkoina (esimerkiksi Kalibrointi 1.). Prosessilaatikoiden lisäksi materiaalivirran kuvaamisessa on käytetty varaston tunnuksena kolmioita, sekä nuolia kuvaamaan materiaalin liikettä tuotannossa. Prosessilaatikoiden, varastokolmoiden ja liikenuolten alapuolella kulkee ns. ”Lead Time Ladder” eli aikajana, jossa on esitetty kuhunkin vaiheeseen kuluva aika, sekä prosessoinnin, että varastoinnin ja liikkeen osalta. Liiallisen tuotannollisen tiedon rajaamiseksi yksikkönä on käytetty aikayksikköä, joka on sekuntiyksikön kerrannainen. Tässä arvovirtakuvauksessa esitetyissä jaksoajoissa (CT) on käytetty Sako Oy:n työntutkimuksissa tuloksena saatuja jaksoaikoja. Prosessilaatikoiden välissä on esitetty liikkeeseen ja varastointiin kuluva aika. Liikkeeseen kuluva aika on laskettu kulkemalla todellista materiaalin reittiä ja mittaamalla matkaan kulunut aika sekuntikellolla. Varastointiin kuluva aika on laskettu teoriaosuudessa esiteltyllä Littlen lailla, joka on teoreettinen laskentamalli, jolla pystytään laskemaan arvio varastoajasta varaston koko yksikkömääränä ja seuraavan prosessin jaksoaika huomioimalla. Varastoaikojen laskemisessa käytetty yksikkömäärä oli bondaukseen käytettävän uunin eräkokoo, joka on uutta ja vanhaa prosessia verrattaessa riittävän tarkka arvio välivarastojen koosta.



KUVIO 3. Nykyisen tuotantoprosessin arvovirtakuvaus

6 DIFFUUSIOBONDAUSMENETELMIEN ARVIOINTI

6.1 Vaatimukset uudelle menetelmälle ja vaihtoehtojen esittely

Uuteen tuotantomenetelmään, diffuusiobondausmenetelmään, siirtymisen tutkiminen on lähtöisin tarpeesta kehittää tuotteita laadultaan uudelle tasolle. Aikaisemmissa Sakolla tehdyissä tuotekehitystutkimuksissa on osoitettu, että diffuusiobondausmenetelmällä valmistetulla luodilla voidaan saavuttaa murskauskokeessa tinajuotosmenetelmällä valmistettua luotia korkeampi jäämäpainoprosentti. Jäämäpainoprosentti on vertailukelpoinen mittari tuotteen laadusta, ja asiakasnäkökulmasta tarkasteltuna korkeamman jäämäpainoprosentin murskauskokeessa saanut metsästysluoti on lähes poikkeuksetta parempi.

Kun kehitystyö saatiin käyntiin, päätettiin uuden tuotantomenetelmän minimivaatimukset määrittää. Minimivaatimuksia määrittämässä oli mukana Sako Patruunat -liiketoimintayksikön johtaja, tuotantojohtaja ja tuotepäällikkö. Näin ollen saatiin kattavasti huomioitua eri näkökulmista tarkasteltuna minimivaatimukset, joiden tulee täytyä, jotta menetelmän voisi ottaa lähempään tarkkailuun. Vaatimuksia löytyi niin tuotteen laadun, tuotantotehokkuuden ja automaatioasteen, kuin kemikaali- ja työturvallisuuden piiristä. Minimivaatimuksista laadittiin listaus, jossa vaatimukset on esitetty seuraavasti:

1. Lämmitysratkaisun tulee saada aikaan kappaleissa kuparivaipain ja lyijy-ytimen välisen diffuusiobondauksen syntymiseen tarvittava lämpötila (Lyijy on vähintään saatava sulamaan, sulamispiste 328 °C.).
2. Lämmitysratkaisun on sovelluttava tuotantotehokkuudeltaan Sakon sarjatuotantoon, eli ratkaisun tuotantokapasiteetin tulee vastata muiden tuotantolinjan koneiden kapasiteettia. Lisäksi prosessin virtaustehokkuuden tulee parantua.
3. Luodin komponenttien valmistukseen on pystyttävä nykyisellä tuotantolinjalla.
4. Lämmitysratkaisun on sovelluttava nykyisissä tuotantotiloissa käytettäväksi, eli sen tulee mahtua layoutiin kohtuullisin järjestelyin ja täyttää tarvittavat kemikaali-, työ- ja paloturvallisuusvaatimukset.

5. Lämmitysratkaisun tulee tuottaa kappaleita, jotka ovat bondaukseltaan kestäviä ja tasalaatuisia (Bondausliitoksen kestävyyttä mitataan luodin murskaustestissä, hyväksyttävässä tuloksessa lyijy ei irtoa kuparivaipasta, jäämäpaino on yli 90% ja laadunvaihtelu kappaleiden välillä on hyväksyttävällä tasolla.).
6. Lämmitysratkaisun on sovelluttava bondaamaan kappaleet niin, ettei sula lyijy roisku tai valu kappaleista, eikä bondauksesta muodostu muuta laadullista haittaa (Kappaleiden massa tai muut ominaisuudet eivät saa vaihdella, kappaleiden on oltava visuaalisesti laadukkaita).

Näiden minimivaatimusten perusteella tehtiin selvitystä tähän käyttökohteeseen soveltuvista lämpölaitteista. Syvällisempään tarkasteluun valittiin potentiaalisesti tuotannolliseen käyttöön soveltuvat lämpölaitteet, jotka olivat linjauuni, kammiauuni, induktiolämpölaite ja kaasuliekkitoiminen lämmityslaite. Kun yleiskuva olemassa olevista laitteista oli muodostettu, alettiin potentiaalisesti käyttöön soveltuvia laitteita vertailemaan keskenään. Vertailussa huomioitiin monia erilaisia laitteen käyttöön ja tuotannolliseen soveltuvuuteen vaikuttavia ominaisuuksia. Konetehoa ja kapasiteettia arvioitiin markkinoilla olevien valmiiden ratkaisuiden perusteella. Vertailussa huomioitiin myös materiaalivirran tyyppi, eli se virtaavatko työkappaleet laitteeseen jatkuvasti vai onko laite panostoituminen. Laitteiden integroitavuutta tuotantoon arvioitiin ja arvioinnissa otettiin huomioon muun muassa laitteen koko ja yhdistettävyyden nykyiseen layoutiin, kemikaali-, palo- ja koneturvallisuus, sekä mahdollisesti tarvittavat tuotantotilojen muutostyöt. Myös asetusten vaihtoa ja soveltuvuutta eri luotityypeille vertailtiin, lähinnä markkinoilta löytyvien ratkaisujen tietojen perusteella. Tärkeitä vertailuun valittuja ominaisuuksia olivat myös laitteen automaatioaste lähtötilanteessa ja ennenkaikkea se, kuinka hyvin laitteen automaatioastetta voisi lisälaittein, kuten kuljettimin ja syöttölaittein nostaa. Automaatiota vertailtiin myös henkilösidonaisuutta, kuten laitteen panostusta ja purkamista, vaativien työvaiheiden kannalta. Näiden kaikkien ominaisuuksien lisäksi vertailussa huomioitiin muun muassa ratkaisun energiatehokkuutta, turvallisuusriskejä ja laadun-
tuottokykyä.

Arvioinnin perusteella muodostettiin vertailutaulukko, jossa eri lämpölaiteratkaisuiden tärkeimpiä ominaisuuksia vertaillaan keskenään. Taulukon tarkoitus on tiivistää hankittu tieto vertailukelpoiseen ja helposti saatavilla olevaan muotoon.

TAULUKKO 3. Diffuusiobondausratkaisuiden vertailutaulukko

Diffuusiobondausratkaisu				
Ratkaisu	Linjauuni	Kammiouuni	Induktiolaitteisto	Kaasuliekki
Konetehto (PPM)	PPM ei vielä tiedossa.	PPM ei vielä tiedossa.	Työkappale lämpenee erittäin nopeasti esim. verrattuna uuneihin. PPM ei vielä tiedossa.	PPM ei vielä tiedossa.
Materiaalivirta (virtaava/ panos)	Materiaali virtaa jatkuvasti koneen läpi. Automatisointi on helposti toteutettavissa.	Materiaali panostetaan kammioon ja puretaan kammioista erä kerrallaan. Tämä on mahdollista automatisoida osittain.	Materiaali virtaa jatkuvasti koneen läpi. Automatisointi on helposti toteutettavissa. Vaihtoehdot pyöröpöytä, lineaari ja vertikaali.	Materiaali virtaa jatkuvasti koneen läpi. Vaihtoehdot pyöröpöytä ja liekkiinjasto.
Integroitavuus tuotantoon	Laitteisto vie paljon tilaa layoutissa ja tarvitsee selvityksen esim palo- ja kaasuturvallisuuden vaatimuksista.	Tarvitsee selvityksen esim palo- ja kaasuturvallisuuden vaatimuksista.	Laitteisto on lähtökohtaisesti helposti integroitavissa normaaleihin tuotantotiloihin	Laitteiston integroiminen tuotantotiloihin tarvitsee selvitystyötä ja mahdollisia lisäjärjestelyjä (tulityötila).
Soveltuvuus eri kaliiperien luodeille	Soveltuu lähtökohtaisesti kaikille luotityypeille.	Soveltuu lähtökohtaisesti kaikille luotityypeille.	Eri kaliiperien luodeille tarvitaan mahdollisesti eri induktiokelat.	Lähtökohtaisesti mahdollinen säätää kaikille luotityypeille soveltuvaksi.
Asetusten vaihto (+muut järjestelyt)	Vain jigit/kennot ja säädöt tarvitsevat mahdollisesti asetusten vaihtoa.	Vain jigit/kennot ja säädöt tarvitsevat mahdollisesti asetusten vaihtoa.	Mahdollisesti esim. pyöröpöytänsä tulee asentaa lisäjigit kaliiperia vaihdettaessa.	Mahdollisesti esim. pyöröpöytänsä tulee asentaa lisäjigit kaliiperia vaihdettaessa.
Henkilösidonnaisuus	Uuni tarvitsee ylösajon ennen tuotantoa.	Panostus ja purkaminen tapahtuu lähtötilanteessa manuaalisesti. Uuni tarvitsee ylösajon ennen tuotantoa.	Henkilösidonnaisuus oletettavasti pieni, sillä automaatioaste on korkea eikä ylösajoa tarvita.	Henkilösidonnaisuutta on mahdollista laskea automaatioastetta nostamalla (lisälaitteet, kuljetimet).
Automaatio	Automatisointi on mahdollista esim. syöttörobotilla, joka asettaa luodit kennoihin.	Panostus ja purkaminen tapahtuu manuaalisesti. Automaatioastetta on mahdollista nostaa lisälaitteilla.	Saatavilla on täysin automatisoituja ratkaisuja, jotka on helppo integroida tuotantoon.	Automatisointi on mahdollista esim. linjakuljettimella, pyöröpöydällä ja syöttölaitteella.
Energiatehokkuus	Uuni vaati ylösajon ennen tuotannon aloittamista.	Uuni vaati ylösajon ennen tuotannon aloittamista.	Induktiomenetelmä on energiatehokas: vain työkappaleen lämmitetään, lämmitys aika on lyhyt, eikä ylösajoa ole.	Ei tarvitse ylösajoa ennen tuotannon aloittamista.

Taulukosta 3 voidaan nähdä, että diffuusiobondaukseen soveltuvien laitteiden ominaisuudet eroavat toisistaan jonkin verran. Esimerkiksi kammiouuni on materiaalivirtaustyyppiltään kertapanosteinen, eli se ladataan ja puretaan erä kerrallaan. Linjauuni, induktiolaitteisto ja liekkihehkuskonet ovat taas materiaalivirtaustyyppiltään pääsääntöisesti lineaarisesti virtaavia, eli niissä kappaleet kulkevat koneen läpi jatkuvassa virtauksessa. Lean -filosofiassa jatkuvaa kappaleiden virtausta pidetään parempana, sillä se usein minimoi erilaisia tuotantoon liittyviä hukkia. Esimerkiksi jatkuvasti virtaavaa konetta käytettäessä ei välttämättä muodostu niin paljon odotteluhukkaa kuin kertapanosteisessa

virtauksessa, sillä jatkuvasti virtaavan koneen ei tarvitse odottaa, että kaikki seuraavaan erään tarvittavat kappaleet ovat valmistuneet edellisistä työvaiheista. Eroja on myös eri laitetyyppien integroitavuudessa tuotantoon. Esimerkiksi kaasuliekillä toimivan liekkihehkuksen koneen integroiminen tavallisiin teollisuuden tuotantotiloihin voi olla haasteellista, sillä siinä tulee huomioida muun muassa palo- ja kaasuturvallisuusmääräykset. Käytännössä tämä voinee tarkoittaa sitä, että kaasuliekkitoimisen laitteen tuominen tuotantotiloihin edellyttää erillisen tulityöpisteen rakennuttamisen. Nämä seikat tulee ottaa huomioon myös muilla lämpölaitetyypeillä, mutta lähtökohtaisesti linjauunien, kammiouunien ja induktiolämpölaitteiden tarjoajat ovat huomioineet laitteen valmistusvaiheessa suurimmat turvallisuusriskit ja koneet on mahdollista viedä normaaleihin tuotantotiloihin.

6.2 Induktiolaitteistolla valmistetut testiluodit

Induktiolaitteiston soveltuvuutta kuparivaippaisten lyijy-luotien bondaamiseen testattiin myös käytännössä. Induktiolaitteistolla bondattiin kappaleita eri induktiolaitteiston parametreilla ja asetuksilla. Optimaalista asetusta haettiin muun muassa eri induktiokeloilla, pitoaikoja säätämällä, lämmitystehoa muuttamalla ja eri juoksutetta käyttämällä. Testiluotien bondaus eteni niin, että ensin kuparikuppiin annosteltiin pipetillä juoksutetta, jota käytetään liitettävien metallien pintojen puhdistamiseen paremman liitoksen saavuttamiseksi. Tämän jälkeen lyijylangasta valmistettu lyijy-ydin pudotettiin kuparikuppiin ja kappaleet asetettiin induktiokelan sisälle asetuslevyn avulla. Sitten induktiokelaan kytkettiin sähkövirta, jota pidettiin yllä lyijyn sulamiseen tarvittavaa pitoaikaa hieman pidempi aika. Parhaaksi pitoajaksi todettiin noin 20 sekuntia. Tämän jälkeen virta katkaistiin ja kappaleiden annettiin jäähtyä luonnollisesti. Tästä eteenpäin luotien valmistus tapahtui Sakon normaalisti käytössä olevan valmistusprosessin mukaisesti.

Näiden testiluotien valmistamisessa diffuusiobondausliitoksen muodostuminen ei tapahtunut teoriaosuudessa esitetyn mallin mukaan. Erona oli, että toinen materiaaleista kävi sulassa olomuodossa, eikä kappaleeseen kohdistettu lainkaan painetta. Teoriakirjassa esitettyssä mallissa kumpikin liitettävistä metalleista pysyy kiinteässä olomuodossa ja kappaleeseen kohdistetaan ulkoista painetta. Näin toimittiin, sillä kiinteässä olomuodossa tehdyt bondauskokeet osoittautuivat epäonnistuneiksi. Tämän jälkeen virta katkaistiin ja

kappaleiden annettiin jäähtyä luonnollisesti. Tästä eteenpäin luotien valmistus tapahtui Sakon normaalisti käytössä olevan valmistusprosessin mukaisesti.



KUVA 9. Testikappaleiden valmistus induktiolaitteistolla

Testikappaleet valmistettiin normaalin tuotantomenetelmän mukaisesti valmiiksi luodeiksi. Valmistuksen jälkeen luoteja testattiin murskaustestissä ja testin tuloksia vertailtiin nykyisen tuotantomenetelmän mukaisesti valmistettuihin luodeihin. Murskauskokeissa ammuttiin 5 kappaleen otanta induktiolämpölaitteella bondatuista luodeista. Luodit sieneytyivät toivotulla tavalla, eikä lyijy-ydin irronnut yhdestäkään luodista. Kunkin luodin lähtömassa oli 11,70 grammaa ja murskauskokeen jälkeen luotien jäämämassan keskiarvo oli punnittaessa 10,87 grammaa. Jäämämassaprosentti induktiolaitteistolla diffuusiobondatuille luodeille saadaan laskettua seuraavasti:

$$\text{Jäämämassaprosentti} = \frac{m_j}{m_e} \cdot 100\% = \frac{10,87 \text{ g}}{11,70 \text{ g}} \cdot 100\% = 93 \% \quad (3)$$



KUVA 10. Induktiolla diffuusiobondattujen luotien sieneytyminen murskauskokeessa

6.3 Kammiouunissa valmistetut testiluodit

Myös kammiouunissa valmistettiin diffuusiobondausliitokseen perustuvia testiluoteja. Kammiouunissa bondatut testiluodit valmistettiin niin, että vedetty kuparikuppi ja lyijy-ydin yhdistettiin ennen bondausta luotien valmistuskoneella. Juoksute täytyi siis annostella lyijy-ytimiin, ennen kappaleiden bondaamista. Tämän jälkeen kappaleet orientoitiin asetuskennoon. Testikappaleet laitettiin kammiouuniin asetuskennoissa, jottei sula lyijy valuisi kuparikupista bondauksen aikana.



KUVA 11. Testikappaleet bondauksen jälkeen, yhä orientoituina asetuskennoon

Kammionuunilla valmistustesteissä etsittiin parasta mahdollista valmistusprosessia. Uunin lämpötilaa, pitoaikaa ja juoksutteen määrää vaihtelemalla valmistettiin testikappaleita eri parametreilla. Testeissä parhaaksi yhdistelmäksi todettiin 5 minuutin pitoaika 500 °C lämpötilassa. Myös kammionuunissa bondattujen luotien diffuusiobondaus erosi oppikirjamallista, sillä lyijy käytettiin sulana, eikä ulkoista painetta kohdistettu kappaleisiin. Parhaiten onnistuneista testiluodeista ammuttiin murskauskoe. Viiden luodin otannassa jäämämassan keskiarvo oli punnittaessa 10,37 grammaa. Kunkin luodin lähtömassa oli 11,70 grammaa. Kammionuunissa valmistettujen testiluotien jäämämassaprocentti saadaan laskettua seuraavasti:

$$\text{Jäämämassaprocentti} = \frac{m_j}{m_e} \cdot 100\% = \frac{10,37 \text{ g}}{11,70 \text{ g}} \cdot 100\% = 90 \%$$



KUVA 12. Kammiouunissa diffuusiobondattujen luotien sieneytyminen murskauskokeessa.

6.4 Yhteenveto valmistustesteistä

Yhteenvetona diffuusiobondattujen luotien valmistustesteistä (induktio ja kammiouuni) voi todeta, että valmistusmenetelmällä ei ole suurta merkitystä lopputulokseen. Tärkeintä on kohdistaa työkappaleeseen haluttu lämpövaikutus ja pitää sitä yllä diffuusiobondausalueen syntymiseen vaadittava pitoaika. Tämä on mahdollista tehdä monella eri laitteella. Toisin sanoen sekä induktiolämpölaitteella, jossa indusoitunut sähkövirta lämmittää suoraan sisäisesti työkappaletta, että kammiouunissa, jossa lämpövastukset lämmittävät uunin atmosfääriä, johon asetettu työkappale lämpenee ulkoisesti, on mahdollista valmistaa kestävä diffuusiobondaus luodin kuparivaipan ja lyijy-ytimen välille. Liitosten lujuutta testattiin ensin sahaamalla aihiot kahtia ja repimällä lyijyä irti kuparivaipasta. Jos lyijy oli lujaa kiinni kuparivaipassa, kyseisillä parametreilla valmistetut luodit otettiin murskaustestiin. Kaikkiaan murskaustestejä ammuttiin useita sekä induktiolla, että kammiouunissa valmistetuilla luodeilla, mutta tässä opinnäytetyössä niistä on otettu huomioon vain kummallakin menetelmällä parhaiten pärjanneet luodit.

Kummallakin menetelmällä valmistetut luodit pärjäsivät murskauskokeessa erittäin hyvin, sillä lyijy ei irronnut yhdenkään luodin osalta kuparivaipasta ja jäämämassat olivat kilpailukykyisellä tasolla. Erinomaisena tasona kuparivaippaiselle lyijyluodille on yleisesti pidetty noin 90% suuruista jäämämassaprosenttia.

7 UUDEN PROSESSIN TEHOKKUUS

7.1 Vaiheittainen arvonmääritys, hukka ja arvovirtakuvaus

Uuden tuotantomenetelmään, eli diffuusiobondaamiseen, siirtyminen vaikuttaisi luotituotantoprosessiin. Prosessista poistuisi kokonaan lyijylangan tinaaminen ja toinen lyijylangan kalibroinneista. Lisäksi diffuusiobondausratkaisu olisi mahdollista toteuttaa samassa työsolussa muiden työvaiheiden kanssa. Nämä kaikki muutokset vaikuttavat prosessin vaiheisiin, arvovirtaukseen ja prosessissa olevaan hukkaan. On tärkeää verrata suunnitteilla olevaa prosessia nykyiseen, jotta saa käsityksen siitä, mikä merkitys uuteen tuotantomenetelmään siirtymisellä olisi tuotannon tehokkuuden kannalta. Tässä kappaleessa on esitettyä suunnitteilla olevan prosessin arvovirtakuvaus ja materiaalivirran vaiheiden arvonmääritys. Näitä verrataan nykyisen prosessin arvovirtakuvaukseen ja materiaalivirran vaiheiden arvonmääritykseen. Lisäksi tässä kappaleessa arvioidaan tapahtuisiko uuteen prosessiin siirryttäessä kehitystä hukkaa sisältävien toimien osalta.

Taulukossa 4 on esitetty luotituotantoprosessin vaiheet, kun käytössä on suunnitteilla oleva diffuusiobondausmenetelmä. Ylhäällä on kuvattu luodin lyijy-ytimen valmistusvaiheet ja alhaalla on esitetty lyijy-ytimen ja kuparivaipan liitosprosessin vaiheet diffuusiobondausmenetelmällä. Verrattaessa tässä vaiheittain kuvattua diffuusiobondausprosessia nykyisen tuotantomenetelmän kuvaukseen voidaan huomata, että diffuusiobondausprosessissa erillisten työvaiheiden määrä olisi huomattavasti pienempi (nykyisessä prosessissa 35 vaihetta, diffuusiobondausprosessissa 13 vaihetta). Lisäksi kun tarkastellaan ei arvoa tuottavia vaiheita (kuvattu taulukossa 4 punaisella), voidaan todeta niiden määrän merkittävä laskeminen. Tämänhetkisessä tuotantoprosessissa on vaiheittaisen arvioinnin mukaan 26 arvoa tuottamatonta vaihetta, kun taas diffuusiobondausprosessissa olisi vain seitsemän arvoa tuottamatonta vaihetta.

TAULUKKO 4. Lyijy-ytimen valmistuksen ja luodin bondauksen vaiheiden arvontuotto

Luotituotannon materiaalivirran vaiheet, joihin bondausmenetelmä vaikuttaa

Lyijy-ytimen valmistus:

1	Lyijykelojen saapuminen tehtaalle
2	Siirto lyijylangan kalibrointikoneelle
3	Hitsaus tyssäshitsauskoneella edelliseen lyijy-lankaan
4	Lyijylangan kalibointi
5	Siirto lyijy-ytimen valmistuskoneelle
6	Valmistus lyijy-ytimen valmistuskoneella
7	Materiaalin siirto luotien valmistuskoneelle

Lisäarvo:
VEAL
EAL
EAL
AL
EAL
AL
EAL

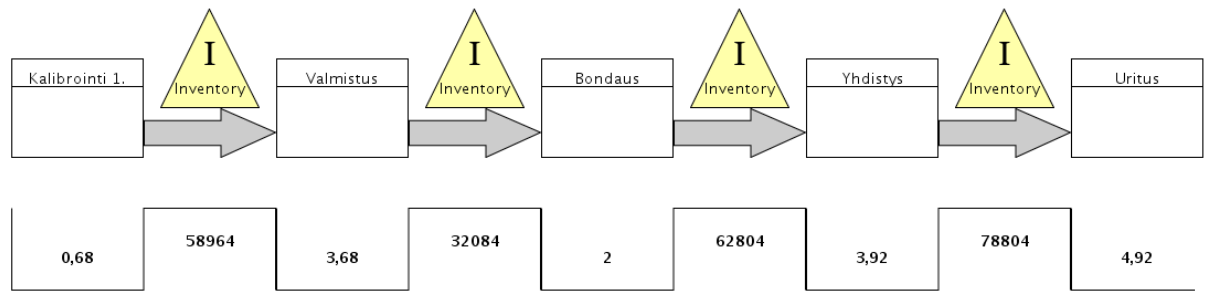
Kuparivaipan ja lyijy-ytimen liittäminen:

1	Materiaalin siirto luotien valmistuskoneelle
2	Luotien valmistus
3	Materiaalin siirto urakoneelle
4	Uran ajaminen
5	Materiaalin siirto diffuusiobondaukseen
6	Diffuusiobondaus

EAL
AL
EAL
AL
EAL
AL

**Materiaali eteenpäin prosessissa**

Kehitystä tapahtuu myös eri hukan muotojen poistamisesta tai vähentämisestä. Etenkin kahden eri hukan muodon, tarpeettoman kuljettamisen ja varastoinnin, poistamisesta. Tarpeetonta liikkumista vähentäisi huomattavasti se, että uudessa tuotantoprosessissa kaikki tuotantokoneet olisivat samassa työsolussa, eikä materiaalia tarvitsisi kuljettaa eri tiloihin ollenkaan. Lisäksi materiaalin kuljettamisesta koituvaa hukkaa vähentäisi se, että työvaiheita olisi yksinkertaisesti vähemmän, eikä materiaalia tarvitsisi liikuttaa niin monen työvaiheen välillä. Myös varastointiin kuluva aika pienenesi huomattavasti. Tärkein vaikuttava tekijä siihen olisi se, että varastojen määrä vähenisi, kun työvaiheita olisi vähemmän. Lisäksi diffuusiobondausmenetelmään siirtyminen poistaisi ylikäsittelyä, sillä prosessista poistuisi tarpeetonta materiaalin käsittelyä, joka nykyisellä menetelmällä on välttämätöntä. Ylikäsittelyä on esimerkiksi lyijylangan tinaaminen, sillä se ei itsessään lisää tuotteen arvoa asiakasnäkökulmasta, vaan on välttämätön työvaihe tinabondausprosessin onnistumiseksi. Kun tätä työvaihetta ei tarvitsisi tehdä, vaan lyijy-ytimen bondattaisiin kuparivaippaan suoraan diffuusiobondausmenetelmän avulla, tältä asiakkaalle arvoa tuottamattomalta vaiheelta väistytettäisiin. Myös virheiden määrä mahdollisesti laskisi, sillä kun monimutkainen tinajuotosprosessi vaihtuisi modernimpaan valmistusmenetelmään prosessista poistuisi paljon muuttujia, jotka saattavat aiheuttaa virheitä.



KUVIO 4. Arvovirtakuvaus tulevasta tilasta

Kuviossa 4 on esitetty arvovirtakuvaus tulevasta tilasta, eli suunnitteilla olevasta diffuusiobondausprosessista. Sen arvot on laskettu käyttäen Sako Oy:n työntutkimuksista saatuja jaksoaikoja. Bondausprosessin jaksoaika on arvioitu markkinoilla olevien laitevalmistajien tarjoamista tiedoista. Varastointiin kuluva aika on laskettu teoriaosuudessa esitellyllä Littlen lailla, joka on teoreettinen laskentamalli, jolla pystytään laskemaan arvio varastojasta varaston koko yksikkömääränä ja seuraavan prosessin jaksoaika huomioiden. Vertailukelpoisuuden säilyttämiseksi yksikkömääränä oli sama kappalemäärä, jota käytettiin nykyisen prosessin varastoaikojen laskemiseen. Kappaleiden varastointiin kuluvan ajan lisäksi prosessien välissä materiaalin kuljettamiseen kuluva aika on huomioitu, se mitattiin sekuntikellolla kulkemalla suunnitellun tuotantoprosessin materiaalin kulkema reitti. Aikajanalla on siis prosessien välissä tapahtuvaan toimintaan, varastointiin ja materiaalin kuljettamiseen, kuluvan ajan summa.

Verrattaessa tulevan tilan arvovirtakarttaa nykyisen prosessin arvovirtakarttaan on perusteltua todeta, että uusi prosessi olisi virtaustehokkuudeltaan tehokkaampi. Tehokkuuden kehitys näkyy ennenkaikkea koko tuotantoprosessin läpimenoajan pienenemisenä. Taulukko 5 on vertailutaulukko nykyisen tuotantoprosessin ja suunnitteilla olevan tuotantoprosessin virtaustehokkuudesta. Taulukkoon on kirjattu kummankin prosessin arvovirtakartassa olevat ajat summana. Eli esimerkiksi varastointi -kohdassa on kyseisen prosessin kokonaisvarastoaika. Taulukkoja vertailemalla voi laskea, että tuotannon kokonaisläpimenoaika pienenesi uuteen prosessiin siirryttäessä 33%. Lisäksi varastoaika, eli aika jonka kappaleet odottavat prosessointia, pienenesi 32%. Materiaalin kuljettamiseen kuluva aika, eli liike, pienenesi myös 93%. Kuljettamiseen kuluvan ajan muutos on verrattua suuri ja suuri muutos perustuu siihen, että uudessa prosessissa kaikki tuotantoprosessit olisivat samassa työsolussa.

TAULUKKO 5. Nykyisen tuotantoprosessin ja suunnitteilla olevan prosessin virtaustehokkuuden vertailu

Nykyinen tuotantoprosessi

	Liike:	Varastointi:	Jalostus:	Kokonaisaika:
Aika	4688	343841	17,6	348547

Tuotantoprosessi diffuusiobondausmenetelmällä

	Liike:	Varastointi:	Jalostus:	Kokonaisaika:
Aika	336	232320	15,2	232671

8 POHDINTA

Tämän opinnäytetyön tuloksena on, että Sako Oy:n nykyisestä luotien bondausprosessista, tinajuotosbondaamisesta, siirtyminen diffuusiobondausprosessiin parantaisi tuotannon virtaustehokkuutta, sillä se pienentäisi tuotannon kokonaisläpivirtausaikaa. Lisäksi diffuusiobondausprosessiin siirtyminen poistaisi erilaisia tuotantoprosessissa olevia hukkia. Kokonaisuudessaan diffuusiobondauksen voidaan tässä tapauksessa todeta olevan tehokkaampi tuotantoprosessi nykyiseen tinajuotosbondaamiseen verrattuna. Toisaalta on huomioitavaa, ettei uuteen prosessiin siirtyminen tarkoita automaattisesti, että virtaustehokkuudesta tulee optimaalinen ja kaikki prosessissa oleva hukka poistuu – työvaiheen välillä olisi esimerkiksi yhä materiaalin kuljettamista ja välivarastoja. Virtaustehokkuuden parantaminen ei olekaan kertaluontoinen projekti, jonka pystyy hoitamaan muuttamalla valmistusmenetelmää tehokkaammaksi. Virtaustehokkuuden parantaminen on niin sanottua jatkuvaa parantamista ja siinä pyritään kehittämään prosessin tehokkuutta yhä uudelleen – virtaustehokkuus ei ole ikinä täydellinen.

Arvovirtaukuvauksen ja prosessien materiaalivirran vaiheittainen arvonmääritys olivat tutkimyöstyökaluina siinä mielessä toimivia, että ne mahdollistivat nykyisen ja suunnitteilla olevan prosessin teoreettisen vertaamisen keskenään. Yleisesti arvovirtakuvausta on pidetty tapana tunnistaa nykyisen prosessin heikkouksia ja työkaluna luoda pohja nykyisen prosessin tehostamiselle. Tässä opinnäytetyössä sitä sovellettiin hieman eri käyttötarkoitukseen, nykyisen ja suunnitteilla olevan prosessin vertaamiseen.

Opinnäytetyössä käytetyt tutkimusmenetelmät olivat luetettavia, sillä ne pohjautuivat pääosin tuotantoprosessien tarkasteluun käytännössä. Haasteena oli kuitenkin tutkimustulosten tarkkuus ja objektiivisuus. Tutkimustulosten tarkkuuden asettaa hieman kyseenalaiseksi esimerkiksi se, että arvovirtakuvauksessa käytettiin varastoaikojen laskemiseen arvioitua varastokokoa ja Littlen lakia, joka on teoreettinen laskentamalli eikä välttämättä täysin vastaa todellisia tuotannon varastoaikoja. Tosin tämä menettely mahdollisti nykyisen prosessin vertaamisen suunnitteilla olevaan prosessiin. Jos varastoaajat olisi mitattu tuotannon todellisista varastoista, ei suunnitteilla olevan prosessin varastoaikoja olisi voinut mitata, sillä uutta prosessia ei ole vielä olemassa. Objektiivisuutta tuloksiin tuo taas esimerkiksi se, että asiakkaalle tuotettu arvo on jokseenkin objektiivinen käsite. Lisäksi prosessissa olevan hukan arvioiminen on objektiivista toimintaa, eikä sen määrää tai suu-

ruutta voi mitata. Kuitenkin kokonaisuudessaan opinnäytetyössä käytetyt tutkimusmenetelmät olivat riittäviä luomaan kohtalaisen tarkan kuvan prosessien virtaustehokkuudesta ja niissä piilevästä hukasta. Tässä tarkoituksessa se riittääkin hyvin, sillä se mahdollistaa uuden ja suunnitteilla olevan prosessin vertailun.

Opinnäytetyö vastasi kohdeyrityksen tarvetta siinä mielessä, että se loi pohjan uuteen valmistusprosessiin siirtymiselle. Nykyisen ja suunnitteilla olevan prosessien vertailu virtaustehokkuuden ja hukan osalta auttoi luomaan käsitystä uuteen prosessiin siirtymisen tuotannollisista eduista. Lisäksi opinnäytetyössä valmistetut testiluodit pärjäsivät murskauskokeessa hyvin ja se vahvisti käsitystä siitä, että diffuusiobondausmenetelmällä voidaan valmistaa erittäin luja bondaus kuparivaipan ja lyijy-ytimien välille.

LÄHTEET

Wright, C. 2017. Fundamentals of Assurance for Lean Projects. Cambridgeshire: IT Governance Publishing.

Six Sigma. Leanin Historiaa. Luettu 29.03.2019. <http://www.sixsigma.fi/index.php/fi/lean/leanin-historiaa>

Modig, N. & Åhlström, P. 2013. Tätä On Lean – Ratkaisu Tehokkuusparadoksiin. Neljäs painos. Halmstad: Bulls Graphics Ab.

Six Sigma. Littlen Laki. Luettu 29.03.2019. <http://www.sixsigma.fi/fi/lean/littlen-laki>

Paananen, E. 2014. Messinkihylsyisten Keskisyytytyspatruunoiden Jälleenlataus. Kuudes painos. Porvoo: Bookwell Oy.

Hyytinen, T. 2016. Metsästäjän Asekirja. Jyväskylä: Arma Fennica.

Sako Oy. Sako Super Hammerhead. Luettu 31.03.2019. <https://www.sako.fi/cartridges/sako-cartridges/super-hammerhead>

Davis, J. R. 2014. Metals Handbook. Seitsemäs painos. ASM International.

Bonami, G. J. 2010. Heat Treatment: Theory, Techniques, and Applications. New York: Nova Science Publishers.

Kivivuori, S. 2016. Lämpökäsittelyoppi 2. Helsinki: Teknologiateollisuus ry.

Zinn, S., & Semiati, S. L. 1988. Elements of Induction Heating: design, control and applications. Ohio: ASM International.

