

Opinnäytetyö (AMK)

Elektroniikka

Elektroniikkatuotanto

2011

Tuomas Äijälä

# AALTOJUOTOSKONEEN ESILÄMMITTIMEN KEHITTÄMINEN



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU  
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

Turun ammattikorkeakoulu

Elektroniikka | Elektroniikkatuotanto

Opinnäytetyön valmistumisajankohta: 2011 | Sivumäärä: 35

Ohjaaja: Ins. (YAMK), Yngvar Wikström

Tuomas Äijälä

## AALTOJUOTOSKONEEN ESILÄMMITTIMEN KEHITTÄMINEN

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli kehittää Turun ammattikorkeakoulun elektroniikkatuotannon tiloissa käytettävälle ERSA 350C -aaltojuotoskoneelle uusi esilämmitin käyttäen pohjana vanhaa harjoitustyönä rakennettua esilämmitintä. Tavoitteena oli korjata vanhassa esilämmittimessä todetut puutteet muuttamalla lämmittimen rakennetta ja korvaamalla joitain osia uusilla. Uusi esilämmitin perustuu pakotettuun konvektioon eli ilman koneelliseen kierrättämiseen. Tarvittava lämpö tuotetaan kolmella 2 kW:n kiuasvastuksella ja ilman kierrätyksestä vastaa taajuusmuuttajaohjattu kolmivaihemoottori.

Työn teoriaosuudessa tarkasteltiin yleisesti aaltojuotosprosessia ja sen tämän hetkistä asemaa elektroniikkateollisuudessa. Lisäksi selvitettiin aaltojuotoskoneen eri moduulien merkitystä ja perehdyttiin aaltojuotoksessa käytettäviin materiaaleihin. Teoriaosuudessa pohdittiin myös esilämmityksen merkitystä aaltojuotoksen onnistumisen kannalta sekä tutkittiin lämpötilan vaikutuksia piirilevyn ja komponentteihin. Lisäksi teoriaosuudessa tarkasteltiin lyhyesti myös taajuusmuuttajiin ja oikosulkumoottoreihin liittyvää teoriaa.

Opinnäytetyön työosuudessa esilämmittimen rakenteeseen tehtiin tarvittavat muutokset uuden moottorin kiinnittämistä varten ja rakennetta muutettiin paljon myös ilman kierron osalta. Tavoitteena oli saada ilma virtaamaan tasaisesti ulos lämmittimestä siten, että ilma ehtisi lämmitä riittävästi. Ulostulevan ilmavirtauksen tuli olla myös riittävän voimakas, jotta fluksi ehtisi kuivua piirilevyltä. Seuraavaksi suoritettiin taajuusmuuttajan käyttöönotto asentamalla tarvittavat ohjainlaitteet sekä säätämällä laitteen parametrit käyttötarkoitusta varten sopiviksi. Tarkoituksena oli myös testata esilämmittimen toiminta suorittamalla aaltojuotoskoneella sarja koeajoja.

Saavutetut tulokset vastasivat odotuksia, sillä esilämmittimen tuottama lämpötila-alue oli melko laaja ja siihen pystyttiin vaikuttamaan muuttamalla laitteen säätöjä. Lisäksi ilmavirtauksen tasainen jakautuminen saavutettiin, eikä piirilevyn lämmityksessä tapahdu enää notkahduksia. Esilämmittimen säädettävyyden parani merkittävästi, joten myös läpimenoaika ja juotoslaatu paranivat.

ASIASANAT:

Aaltojuotos, piirilevyn esilämmitys

Tuomas Äijälä

## ENHANCING A WAVE SOLDERING MACHINE PREHEATER

The main objective of this thesis was to develop a new preheater for the ERSA 350-C wave soldering machine located at Turku University of Applied Sciences, using the old preheater as a base of construction. The old preheater which had been built as practical work was not functioning as intended, so it needed some updates on its structure, and some of the main components had to be replaced with new ones. The operating principle of the new preheater is the same as that of the old model, and it is based on forced convection which means circulation of air. Required heat is generated by three 2 kW heat resistors and air circulation is carried out by a three phase short circuit motor which is controlled by a frequency converter.

In the theoretical part of this thesis, the wave soldering process and its current position in electronics industry was examined. Materials used in the wave soldering process and different modules of the wave soldering machine were also made familiar with. The significance of preheating in the wave soldering process and its effects on soldering quality were studied. It was also studied what kind of effects heating has on circuit boards and components. At the end of the theoretical part, theory about frequency converters and short circuit motors is presented briefly.

In the practical part of the thesis, the structure of preheater was modified greatly by building a new support for the motor and re-constructing the inner parts of the preheater to improve circulation and flow of the air. The main goal was to achieve constant airflow and temperature high enough for a successful preheating process. The rate of airflow must also be kept high so that the flux has time to dry off from the surface of the circuit board. The last part of the practical work was the implementation of the frequency converter, which included the installation of controllers and the adjustment of frequency converter parameters. The correct operation of the preheater was ensured by performing test runs on the wave soldering machine.

The results of the test runs were successful. The measured temperature range of the preheater was quite wide and it could easily be controlled by altering the preheater adjustments. Constant flow of air was also achieved, which means that temperature drops will not occur during the preheating process. Adjustability of the new preheater was found to be much better compared to the old model, which resulted in improving of soldering quality and a shorter lead time.

### KEYWORDS:

Wave soldering, preheating

# SISÄLTÖ

## KÄYTETYT LYHENTEET

1 JOHDANTO	1
2 AALTOJUOTOSPROSESSIN KUVAUS	2
2.1 Fluksaus	2
2.1.1 Vaahtofluksaus	2
2.1.2 Ruiskufluksaus	3
2.1.3 Aaltofluksaus	5
2.1.4 Harjafluksaus	5
2.2 Esilämmitys	6
2.3 Juotostapahtuma	7
2.4 Piirilevyn kuljettaminen	9
3 AALTOJUOTOKSESSA KÄYTETTÄVÄT MATERIAALIT	10
3.1 Lyijyttömät juoteseokset	10
3.1.1 SAC-juoteseokset	10
3.1.2 SnCuNi-juoteseokset	11
3.2 Fluksit	11
3.3 Piirilevypinnoitteet	13
4. PIIRILEVYN ESILÄMMITTÄMINEN	15
4.1 Lämmitysmenetelmät	15
4.2 Lämpö vian aiheuttajana	16
5. ESILÄMMITTIMESSÄ KÄYTETTY LAITTEISTO	18
5.1 Taajuusmuuttaja	18
5.1.1 Danfoss VLT2800 -taajuusmuuttaja	19
5.2 Oikosulkumoottori	19
6. ESILÄMMITTIMEN SUUNNITTELU	21
6.1 Lähtökohdat	21
6.2 Ongelma	22
7. RAKENNUS JA KÄYTTÖÖNOTTO	23
7.1 Rakennus- ja muutostyöt	23
7.2 Asennus ja käyttöönotto	25
7.2.1 Sähkökytkennät	26
7.2.2 Taajuusmuuttajan käyttöönotto	27
8 MITTAUKSET JA TULOKSET	30

8.1 Testikortti	30
8.2 Testimenettely	30
8.3 Profilointilaitteisto	30
8.3.1 Datapaq 9000 -dataloggeri	31
8.3.2 Termoparit	31
8.4 Tulokset	32
9 YHTEENVETO	33
LÄHTEET	34

# Liitteet

## Kuvat

Kuva 1 Vaahtoflukseri	3
Kuva 2 Rumpuflukseri	3
Kuva 3 Suljettu flukseri toiminnassa, piirilevyn alapuolelta katsottuna	4
Kuva 4 Ultraääniflukseri	4
Kuva 5 Aaltoflukseri	5
Kuva 6 Harjaflukseri säädettävällä terällä	6
Kuva 7 Konvektioesilämmitin	7
Kuva 8 Perusmalli ja paranneltu versio juotosaallosta	8
Kuva 9 Kaksoisaalto	9
Kuva 10 Aaltojuotokseen soveltuvat fluksityypit	12
Kuva 11 VLT 2800 -taajuusmuuttaja	19
Kuva 12 Harjoitustyönä rakennettu esilämmitin, josta tehtiin seuraava sukupolvi	21
Kuva 13 Moottorin tuenta	23
Kuva 14 Imuilman säätö	24
Kuva 15 Ilmanohjain	25
Kuva 16 Juotoskoneen sähkökytkennät	27
Kuva 17 Ohjainlaitteet takaa sekä edestä kuvattuna	28
Kuva 18 Termoparien kiinnitystapoja	32

## TAULUKOT

Taulukko 1 Fluksin tehtävät eri lämpötiloissa	11
---	----

## KÄYTETYT LYHENTEET

Ag	Hopea
Cu	Kupari
ENIG	Electroless Nickel Immersion Gold, nikkeli-kultapinnoite
HASL	Hot Air Solder Leveling, kastotinaus
Ni	Nikkeli
OSP	Organic Solderability Preservative, orgaaninen pinnoite
Pb	Lyijy
R	Non-activated rosin, hartsipohjainen fluksi, joka ei sisällä aktivaattoreita
RA	Rosin activated, aktivoitu hartsipohjainen fluksi
RMA	Rosin mildly activated, lievästi aktivoitu hartsipohjainen fluksi
RoHS-direktiivi	The Restriction of the use of certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment on Euroopan unionin säännös, jolla rajoitetaan tiettyjen haitallisten aineiden käyttöä sähkö- ja elektroniikkalaitteissa
SAC	SnAgCu juoteseos
SMD	Surface Mount Devices, pintaliitoskomponentit
SMT	Surface Mount Technology, pintaliitostekniikka
Sn	Tina
SN100C	Nihon Superior yrityksen patentoima SnCuNi-juoteseos
THD	Through Hole Devices, läpiladottavat komponentit

# 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella ja rakentaa uusi esilämmitin Turun ammattikorkeakoulun elektroniikkatuotannon laboratoriossa käytettävälle ERSA 350C -aaltojuotoskoneelle. Työn pohjana käytettiin vanhaa esilämmitintä, joka puolestaan rakennettiin korvaamaan juotoskoneen alkuperäinen esilämmitin. Koska kyseinen kokeilumalli oli osoittautunut vajaatehoiseksi puhallustehonsa suhteen, oli laitteen rakenteen ja ominaisuuksien päivittäminen todettu ajankohtaiseksi. Vanhan esilämmittimen puhallustehosta ei ollut saatu kunnollisia tutkimustuloksia, joten uuden esilämmittimen kohdalla puhallustehon vaikutusta fluksin kuivattamiseen piirilevyn pinnalta on tutkittu tarkemmin.

Vastaavasta aiheesta oli aikaisemmin rakennettu harjoitustyönä edellä mainittu esilämmitin, jota käytettiin tämän työn lähtökohtana. Lisäksi aihetta sivuten oli tehty diplomityö lämpökäyttäytymisestä aaltojuotosprosessissa, jota käytettiin vertailukohtana tästä työstä saatuihin tuloksiin. Itse aaltojuotosprosessista löytyy myös huomattavan paljon materiaalia opinnäytetöiden ja muiden dokumenttien muodossa.

Tämän työn tarkoituksena on kehittää uusi esilämmitin aaltojuotoskoneelle päivittämällä vanhan esilämmittimen rakennetta. Tärkeimpänä tavoitteena on saada esilämmittimen ilmavirtauksen voimakkuudesta säädettävä, jotta voitaisiin välttää edellisen mallin ongelmat. Lisäksi kiinnitetään erityistä huomiota ulostulevan ilman tasaiseen virtaukseen ja ilman lämmittämiseen kierrättämällä, jotta saavutetaan optimaalinen lämmitystulos. Esilämmitintä on tarkoitus testata suorittamalla sarja koeajoja, joissa selvitetään esilämmittimen lämmöntuottokyky sekä piirilevyn kuivumisen tehokkuus ja sen jakautuminen piirilevyllä.

Erityisesti tässä työssä panostettiin mekaaniseen suunnitteluun eli siihen millä ratkaisulla ilmavirtausta saadaan säädettyä halutunlaiseksi. Lisäksi taajuusmuuttajan asennus ja käyttöönotto muodostivat ison osan työtä. Joitain käytännön ongelmia jouduttiin kuitenkin rajaamaan työn ulkopuolelle, koska muuten kokonaisuudesta olisi tullut liian laaja. Mm. ilmavirtausta saatiin parannettua lämmityksen kustannuksella, joskin ongelma olisi ollut ratkaistavissa.



## 2 AALTOJUOTOSPROSESSIN KUVAUS

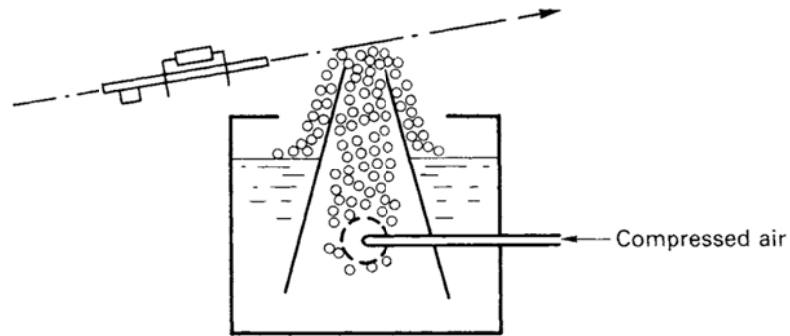
Aaltojuottaminen on yksi elektroniikkateollisuuden vanhimpia juottamismenetelmiä ja sitä käytetään edelleen monentyppisissä valmistusprosesseissa. Nykypäivän elektroniikkatuotannossa aaltojuotos yleensä täydentää reflow-prosessia, ja sillä voidaan juottaa niin läpiladottuja (THD) kuin pintaliitoskomponenttejäkin (SMD). Aaltojuotoksen peruseräaattena on, että komponentit juottuvat kulkiessaan sulan juotosaallon yli. Aaltojuotoksen lopputulos riippuu monesta tekijästä, joita ovat mm. fluksin ja flukserin tyyppi, käytetty juoteseos, esilämmitys, juotospadan lämpötila, kuljettimen nopeus ja kulma, suojaakaasun käyttö, juoteaallon tasaisuus sekä kuonan määrä. Aaltojuotosprosessi käsittää fluksauksen, esilämmityksen, juottamisen sekä piirikortin kuljettamisen. Tarvittaessa piirikortti voidaan myös puhdistaa aaltojuotoksen jälkeen.

### 2.1 Fluksaus

Fluksaus on juotoksen onnistumisen kannalta yksi tärkeimmistä vaiheista aaltojuotoksessa. Fluksi puhdistaa piirilevyn epäpuhtauksia ja helpottaa juotoksen syntymistä. Fluksaus tapahtuu aaltojuotoslinjan alkupäässä heti ladonnan jälkeen, ja sen peruseräaana on fluksin tasainen levittäminen piirilevyn alapinnalle. Tätä varten on kehitetty useita erilaisia fluksin annostelijoita. Fluksin oikean määrän annosteleminen levyn pinnalle on tärkeää, koska vain tällöin voidaan saavuttaa hyvä juotoslaatu.

#### 2.1.1 Vaahtofluksaus

Vaahtoflukseri on rakenteeltaan samankaltainen kuin aaltoflukseri, mutta toimintaperiaate on erilainen. Paineistettua ilmaa johdetaan huokoisen putken läpi, joka on sijoitettu fluksialtaan pohjalle. Putkessa olevat reiät ovat kooltaan mikrometriluokkaa, jolloin saadaan aikaiseksi hyvin pieniä kuplia. Putkesta nousevat ilmakuplat pakottavat fluksin nousemaan savupiippumaista kapenevaa suutinta pitkin muodostaen aallon, josta fluksi valuu takaisin säiliöön. Piirilevy kulkeutuu vaahdotetun fluksiaallon yli kastellen vain levyn alapinnan. Vaahtoflukserin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 1. [1, 2]



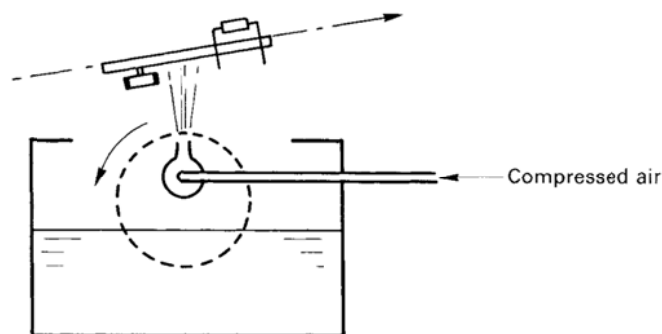
**Kuva 1** Vaahtoflukseri [2]

Vaahtofluksauksen huonoihin puoliin lukeutuu nesteen suuri haihtuvuus. Lisäksi piirilevylle levitettävän fluksin määrää on vaikea kontrolloida, sitä voidaan säätää pääasiassa muuttamalla kuljettimen nopeutta. Avonainen fluksisäiliö aiheuttaa myös huomattavan paloturvallisuusriskin. [3]

#### 2.1.2 Ruiskufuksaus

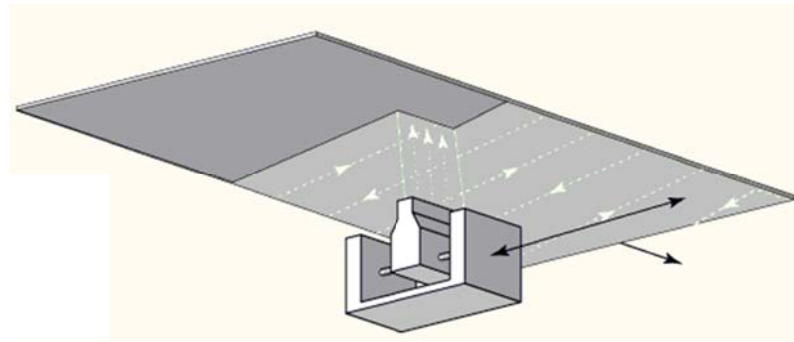
Ruiskufuksaus on nykyään käytetyin fuksausmenetelmä aaltojuotoksessa, ja se tunnetaan myös nimillä sumutusfuksaus tai sprayfuksaus. Ruiskuflukserista on olemassa oikeastaan kolme eri versiota: pyörivään rumpuun perustuva flukseri, suljettu fuksiruisku sekä ultraääneen perustuva flukseri.

Rumpuflukserin toiminta (kuva 2) perustuu pyörivään rei'itettyyn rumpuun, jonka sisälle on asennettu ilmasuutin. Rumpu nostaa pyöriessään fluksia altaan pohjalta, ja ilmasuutin puhaltaa fluksin piirilevyn alapinnalle. Levylle sumutettavan fluksin määrää voidaan säätää muuttamalla rummun pyörimisnopeutta ja puhallettavan ilman painetta. Rumpuflukserin ainoa huono puoli on fluksiastian takaisin putoavat fluksipisararat, jotka tuovat mukanaan epäpuhtauksia. [4]



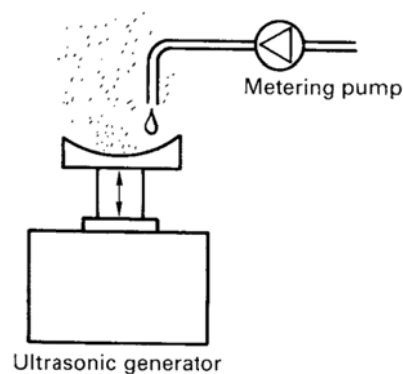
**Kuva 2** Rumpuflukseri [2]

Suljetussa ruiskuflukserissa ei käytetä lainkaan ilmaa fluksin ruiskuttamisessa, vaan fluksi paineistetaan ja sumutetaan suuttimen kautta hienona sumuna piirilevyn pinnalle. Suljettu ruiskuflukseri voi koostua yhdestä suuttimesta jota liikutetaan poikittain levyn kulkusuuntaan nähden tai useammasta rinnakkaisesta suuttimesta, jolloin liikettä ei tarvita. Tekniikan suurin etu muihin verrattuna on fluksin vähäinen kulutus, koska haihtuminen ei ole yhtä voimakasta kuin muissa menetelmissä. Fluksin säilyttäminen erillisessä astiassa auttaa arvioimaan jäljellä olevan fluksin määrän ja parantaa paloturvallisuutta. Huonona puolena voidaan mainita suuttimien tukkeutuminen, varsinkin jos flukseri on ollut pitkään käyttämättömänä. [1, 2] Kuvassa 3 on kuvattuna suljettu ruiskuflukseri, jossa suutinta liikutetaan edestakaisin piirilevyn kulkusuuntaan nähden.



**Kuva 3** Suljettu flukseri toiminnassa, piirilevyn alapuolelta katsottuna [5]

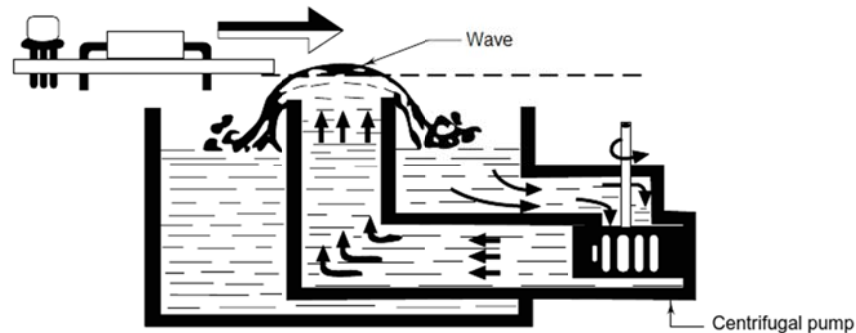
Ultraääniflukserissa (kuva 4) fluksi annostellaan ultraäänigeneraattorin pinnalle, jossa värähtely saa fluksin muuttumaan erittäin hienojakoiseksi sumuksi. Fluksipilvi ohjataan piirilevyn pinnalle puhaltamalla kevyesti typpeä tai ilmaa flukserin alapuolelta. Fluksin annostelua ohjataan sensoreilla. Ultraääniflukserissa käytetään ainoastaan alkoholipohjaisia flukseja, vesipohjaiset eivät käy, koska vesi on liian raskasta. [2]



**Kuva 4** Ultraääniflukseri [2]

### 2.1.3 Aaltofluksaus

Aaltoflukserin toimintaperiaate on hyvin samankaltainen kuin juoteaallon. Fluksi pumpataan säiliöstä kapean suuttimen läpi jonka reunoilta se valuu takaisin säiliöön muodostaen parabolisen aallon. Piirilevy kulkee aallon yli siten, että vain sen alapinta koskettaa fluksiin. [4] Aaltoflukserin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 5.

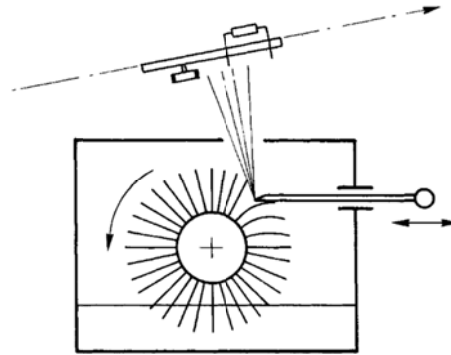


**Kuva 5** Aaltoflukseri [6]

Aaltofluksereiden käyttö elektroniikkateollisuudessa on vähentynyt huomattavasti pintaliitoskomponenttien yleistyttyä. Aaltoflukserissa ei ole kunnollisia säätömahdollisuuksia joten fluksin määrä piirilevyllä on usein liian suuri. Tästä johtuen esilämmitystä on tehostettava huomattavasti, jotta fluksi ehtisi haihtua. [1, 2]

### 2.1.4 Harjafluksaus

Harjafluksaus on nykypäivänä vähemmän käytetty fluksausmenetelmä. Harjaflukserista on olemassa kaksi erilaista mallia. Harjaflukserin alkuperäisessä versiossa fluksisäiliön ja piirilevyn alapinnan väliin on sijoitettu harja, joka nostaa fluksia säiliöstä ja levittää sitä levyn alapinnalle siten, että harja koskettaa piirilevyn pintaa. Kehittyneempi versio harjaflukserista toimii samalla periaatteella, mutta harja ei kosketa lainkaan piirilevyä. Kyseisessä mallissa harjan reitille on asetettu terä johon harjakset osuvat pyöriessään, jolloin harjaksiin kertynyt fluksi lentää pieninä pisaroina piirilevyn alapinnalle. Fluksin määrää ja sumutusta voidaan säätää muuttamalla harjan nopeutta ja terän asemaa harjaan nähden. [2] Kuva 6 esittää harjaflukserin kehittyneempää versiota, jossa fluksauksen lopputulokseen voidaan vaikuttaa säätämällä terän asemaa.



**Kuva 6** Harjaflukseri säädettävällä terällä [2]

Alkuperäisessä harjaflukserissa on muutamia rajoittavia puutteita, minkä takia sitä ei enää juurikaan käytetä. Tärkein ongelma on, että fluksin levittymistä piirilevyille ei voida kontrolloida, jolloin jotkut osat piirilevystä voivat jäädä ilman fluksia. Toinen ongelma liittyy harjan fyysiseen kontaktiin piirilevyn kanssa, minkä takia komponentteja saattaa siirtyä pois paikoiltaan. Toisessa mallissa näitä ongelmia ei esiinny, mutta siinäkin on huonot puolensa. Mm. fluksipisarat saattavat kulkeutua levyn yläpinnalle piirilevyssä olevien avoimien reikien kautta, mikä ei ole toivottavaa. [2]

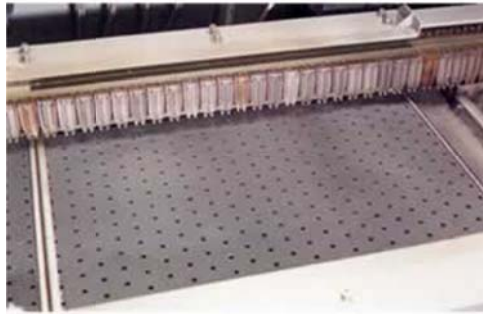
## 2.2 Esilämmitys

Esilämmityksen tärkeimpiä tehtäviä ovat fluksin aktivoiminen ja liuottimien haihduttaminen fluksista, piirilevyn lämpötilaerojen tasaaminen sekä lämpötilan nostaminen lähelle juotoslämpötilaa. Piirilevyn esilämmittäminen on välttämätön vaihe aaltojuotoksessa, koska ilman esilämmitystä piirilevy ja erityisesti komponentit vahingoittuisivat liian äkillisestä lämpötilan noususta. Esilämmityksen tavoitteena onkin nostaa komponenttien lämpötila niin korkeaksi, että lämpösokki olisi korkeintaan 100 °C niiden osuessa juotosaaltoon. Lyijyttömässä juottamisessa piirilevyn tulisi saavuttaa vähintään 100 °C:n lämpötila esilämmityksen aikana. Lämpötilan nousunopeus saa olla korkeintaan 2 °C/s, jotta vältettäisiin suuret lämpötilaerot piirilevyllä. Toinen huomioitava seikka on lämpötilan tasainen jakautuminen piirilevyllä, koska epätasainen lämmitys on yleinen syy juotosvirheisiin. Epätasainen lämmitys aiheuttaa mm. komponenttien koteloiden halkeilua sekä piirilevyn vääntymistä.

Useimmiten esilämmityksessä tuotettava lämpöenergia aikaansaadaan infrapunalämmittimillä. Fluksin liuottimien haihduttamisessa käytetään yleensä levymäisiä säteilijöitä, jotka tuottavat keskipitkää tai pitkää infrapunasäteilyä ja jotka sijaitsevat esilämmittimen alkuosassa. Korkeamman lämpötilan tuottamiseen käytetään

kvartsilamppuja, jotka tuottavat lyhyttä infrapunasäteilyä. Kvartsilamput sijaitsevat yleensä esilämmittimen loppupäässä ennen juoteaaltoa.

Koska nykyään on siirrytty enenevässä määrin vesipohjaisten fluksien käyttöön, vaaditaan myös esilämmittimeltä enemmän tehoa fluksin haihduttamiseksi. Tätä varten on kehitetty pakotettuun konvektioon eli ilman koneelliseen kierrättämiseen perustuvia esilämmittimiä (kuva 7), joissa tarvittava lämpö aikaansaadaan yleensä infrapunasäteilijöillä ja ilmavirtaus tuotetaan jonkinlaisella puhaltimella. [5] Konvektiolämmittimessä infrapunaelementeillä kuumennettu ilma puhalletaan paneelissa olevien reikien kautta piirilevyn alapinnalle. Ilmavirtaus edesauttaa fluksin kuivumista piirilevyltä ja nopeuttaa lämmönjohtumista ja näin ollen nopeuttaa piirilevyn läpimenoaikaa.



**Kuva 7** Konvektioesilämmitin [5]

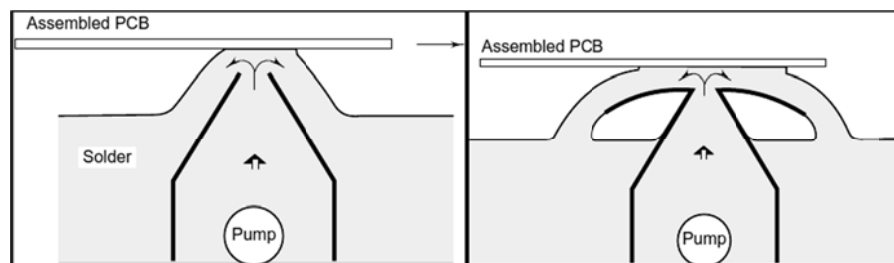
Kun juotetaan tiheästi kalustettuja piirilevyjä tai korkean lämpömassan omaavia komponentteja, saattaa pelkkä alapuolelta lämmittäminen osoittautua liian tehottomaksi. Tämän vuoksi useissa aaltojuotuskoneissa on lämmityselementtejä myös piirilevyn yläpuolella, erityisesti ennen juotosaaltoa. Lisäksi lämmityksen olisi hyvä tapahtua suljetussa tilassa, jotta lämpö ei pääsisi karkaamaan. [5]

### 2.3 Juotostapahtuma

Juotostapahtuma on aaltojuotoksen tärkein vaihe, jossa komponentit juottuvat piirilevylle. Kaikki edellä mainitut vaiheet valmistelevat piirilevyä enemmän tai vähemmän juotostapahtumaa varten. Aaltojuotuskoneessa juottuminen tapahtuu piirilevyn kulkiessa juoteaallon yli. Juoteaalto aikaansaadaan pumpaamalla sulaa juotetta suuttimen läpi, josta se valuu takaisin säiliöön. Piirilevyn alapinta koskettaa sulaan juoteaaltoon, jolloin komponentit juottuvat kiinni piirilevyn juotospintoihin. Kapillaari-ilmion ansiosta sula juote nousee reikien kautta myös piirilevyn toiselle puolelle.

Juoteaallolla on kaksi tehtävää: siirtää lämpö piirilevyyn ja komponentteihin sekä kuljettaa sulaa juote juotospinnoille.

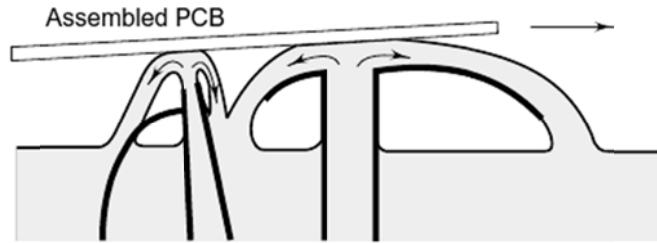
Juotuskoneiden valmistajat ovat käyttäneet koneissaan useita erilaisia versioita juotosaallosta, jotka poikkeavat niin aallonmuodoltaan kuin juotteen pumppaustekniikalta. Yksinkertaisimmillaan juotuskoneessa on vain yksi juotosaalto, jossa sulaa juotetta pumpataan suuttimen läpi ja jonka jälkeen se putoaa suuttimen reunoilta takaisin säiliöön. Mallin kehittyneemmässä versiossa suuttimen molemmille reunoille on asennettu levyt, jotka pidentävät aallon harjaa ja tekevät aallosta tasaisemman. Aallon muoto auttaa ylimääräistä juotetta imeytymään takaisin aaltoon, jolloin oikosulut vähenevät merkittävästi. [6] Kuvassa 8 on esitelty molemmat juotosaaltotyypit.



**Kuva 8** Perusmalli ja paranneltu versio juotosaallosta [6]

Yhdellä aallolla varustetut juotuskoneet eivät sovellu kovinkaan hyvin pintaliitoskomponenteille niiden koteloinnista johtuen, joten tilalle on kehitetty kaksoisaalto juotuskoneita, joissa on kaksi erityyppistä juoteaaltoa peräkkäin (kuva 9). Ensimmäinen aalto eli nk. chip-aalto on tyypiltään kapea ja turbulентtinen, ja sen tehtävänä on varmistaa että juotetta tulee jokaiselle liitokselle. Jotta juote saataisiin kulkeutumaan kaikkiin paikkoihin, on se pumpattava suurella nopeudella piirilevyn alapinnalle. Chip-aallon korkeuden tulisi myös olla mahdollisimman korkea. Chip-aallon aikaansaamiseksi voidaan käyttää useita erityyppisiä suuttimia ja tekniikoita. [1, 6]

Koska ensimmäinen aalto jättää piirilevylle paljon ylimääräistä tinaa ja muodostaa oikosulkuja, tarvitaan toinen aalto puhdistamaan piirilevy. Toinen aalto on tyypiltään tasainen ja hitaasti liikkuva, ja sen tarkoituksena on tasoittaa juotokset ja puhdistaa piirilevy ylimääräisestä tinasta. Yleensä toisena juotosaaltona käytetään nk. lambda-aaltoa. Aallon korkeus tulisi säätää siten, että vähintään  $\frac{1}{2}$  ja enintään  $\frac{2}{3}$  piirilevyn paksuudesta uisi aallossa. On tärkeää, että aallot sijaitsevat mahdollisimman lähellä toisiaan, jotta juote ei ehdi jähmettyä aaltojen välillä. [1, 6]



**Kuva 9** Kaksoisaalto [6]

Lisäksi on olemassa nk. yhdistelmäaaltoon perustuvia juotoskoneita, joissa pyritään yhdistämään kaksoisaallon ominaisuudet yhteen aaltoon. Tämä saadaan aikaan väräyttämällä aaltoa kohdasta, jossa piirilevy siirtyy aaltoon. Aallon ulostulopuoli on yleensä asymmetrinen ja tasaisesti virtaava. [2]

#### 2.4 Piirilevyn kuljettaminen

Kuljettimen tehtävänä on kuljettaa piirilevy koko aaltojuotosprosessin läpi. Kuljettimen nopeus määrittelee piirilevyn läpimenoajan, ja sen olisi hyvä olla välillä 0,3–3 m/min. Jos halutaan saavuttaa samaan aikaan hyvä juotosjälki ja saanto, tulee kuljettimen nopeus sovittaa kaikkiin aaltojuotosprosessin vaiheisiin saumattomasti. Myös kuljettimen kulmalla voidaan vaikuttaa juotoslaatuun, suositeltu kulma on 4–9°. Kuljettimesta on olemassa kahta eri mallia: palettikuljetin ja sormikuljetin. [6]

Palettikuljettimessa käytetään neliskulmaisia paletteja, joihin piirilevyt kiinnitetään. Paletissa on säädettäviä kiskoja, joten siihen on mahdollista kiinnittää erikokoisia piirilevyjä samanaikaisesti. Paletit kiinnitetään kuljettimeen, joka koostuu yleensä kahdesta kiinteästä kiskosta, joissa on kiertävät ketjut. Ketjuissa on koukkuja, jotka pitävät paletin paikoillaan sen kulkiessa juotosprosessin läpi. Palettikuljettimen suurin etu on mahdollisuus kuljettaa erikokoisia kortteja koneen läpi samaan aikaan. Huonoja puolia ovat palettien puhtaanapito sekä huono kustannustehokkuus suurissa erissä. [4, 6]

Sormikuljetin on samantapainen kuin palettikuljetin, mutta toinen kuljettimen kiskoista on säädettävä. Radan leveys säädetään käytettävän piirilevykoon mukaan. Piirilevyt asetetaan palettien tapaan ketjussa oleviin koukkuihin, joissa ne kulkeutuvat juotosprosessin läpi. Sormikuljetin soveltuu hyvin suurille sarjoille, joissa piirilevykokoa ei tarvitse kovin usein muuttaa. Huonona puolena voidaan pitää, että erikokoisia piirilevyjä ei voida ajaa samanaikaisesti. Lisäksi kuljettimen sormet likaantuvat helposti ja ne tarvitsevat säännöllistä puhdistusta. [4, 6]



## 3 AALTOJUOTOKSESSA KÄYTETTÄVÄT MATERIAALIT

### 3.1 Lyijyttömät juoteseokset

Heinäkuun alussa vuonna 2006 voimaan tullut RoHS-direktiivi kieltää haitallisten yhdisteiden käytön sähkö- ja elektroniikkalaitteissa, mukaan lukien lyijyn. Ennen direktiivin voimaan tuloa juotteet ovat lähes yksinomaan koostuneet tinasta 63 % ja lyijystä 37 %. Lyijyn kieltämisen seurauksena tilalle on kehitelty uusia juoteseoksia, joiden ominaisuudet on pyritty saamaan tinalyijyn tasolle. Tina ei yksin sovellu juotteeksi, joten siihen pitää sekoittaa muita metalleja kuten hopeaa, kuparia, antimonia, indiumia, kultaa, sinkkiä tai vismuttia. Harvinaisten ja arvokkaiden metallien käyttö juotteissa nostaa hinnan moninkertaiseksi tinalyijyn verrattuna, joten muiden metallien kuin tinan käyttö juotteissa on pyritty minimoimaan. Käytetyimmät aaltojuotokseen soveltuvat lyijyttömät juotteet ovat SAC- ja SnCuNi-juoteseokset.

#### 3.1.1 SAC-juoteseokset

SAC- eli SnAgCu-juoteseokset ovat käytetyimpiä tinalyijyn korvaajia aaltojuotoksessa. SAC-juote koostuu tinasta, hopeasta ja kuparista, joiden seossuhteet vaihtelevat valmistajien kesken. Tyypillisesti hopean määrä juotteessa on 3,0–4,0 paino- % ja kuparin osuus on 0,5–0,9 paino- %. Loppuosuus koostuu tinasta. Eri koostumuksen omaavat SAC-juotteet erotetaan toisistaan merkinnällä  $SAC_{x_1x_2y}$ , missä  $x_1$  ja  $x_2$  tarkoittavat hopean määrää juotteessa ja  $y$  kuparin määrää juotteessa, josta ilmoitetaan vain kymmenys. Esimerkiksi SAC387 pitää sisällään 3,8 % hopeaa ja 0,7 % kuparia. [7]

SAC-juotteiden on todettu olevan virumiskestävyydeltään huomattavasti tinalyijyä parempia ja väsymiskestävyydeltään vähintään tinalyijyn tasolla. Vetolujuus on myös tinalyijyä parempi, toisaalta SAC:lla tehdyt juotokset ovat niin kovia, että juotettu komponentti voi murtua. SAC-juotteiden ongelmana on seoksen aggressiivisuus sulana, jolloin se syövyttää useita metalleja. Sulan juotteen kanssa kosketuksissa olevat pinnat tulisi suojapinnoittaa, jotta juotteeseen ei liukenisi ylimääräisiä metalleja. SAC-juotteiden huonona puolena voidaan pitää myös korkeaa sulamislämpötilaa ja kallista hankintahintaa, joka johtuu korkeasta hopeapitoisuudesta. [7]

### 3.1.2 SnCuNi-juoteseokset

Tina-kupari-nikkeli-juoteseos on melko uusi vaihtoehto lyijyttömään aaltojuottamiseen jos sitä verrataan SAC-juotteisiin. Yleisin käytetty SnCuNi-seos on japanilaisen Nihon Superior yrityksen patentoima SN100C-juoteseos, joka koostuu tinasta 99,3 %, kuparista 0,7 % sekä hyvin pienestä määrästä nikkeliä. Vaikka nikkeliä on seoksessa häviävän pieni määrä, on todettu, että sillä on merkittävä vaikutus juotteen juoksevuuden kannalta. [7]

SnCuNi-juoteseokset ovat monilta ominaisuuksiltaan SAC-seoksia edellä. SnCuNi-juotteet ovat ennen kaikkea hankintahinnaltaan huomattavasti edullisempia kuin SAC-juotteet. SnCuNi-juotteet eivät myöskään ole yhtä aggressiivisia kuin SAC-juotteet, joten juotteen saastuminen tai juotepadan kuluminen eivät ole niin suuria huolenaiheita. Lisäksi juotosjälki SnCuNi-juotteilla on parempi, juotoksen pinta on kirkas ja tasainen eikä rakeinen kuten SAC-juotteilla. Oikeastaan ainoa huono puoli SnCuNi-juoteseoksissa on n. 10 °C korkeampi lämpötila SAC-juotteisiin verrattuna. [7]

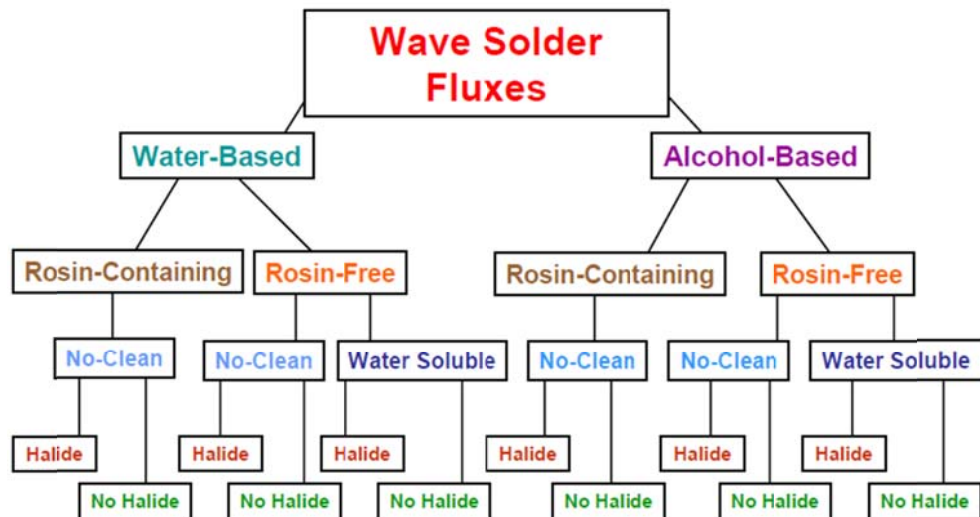
### 3.2 Fluksit

Juoksutteet eli fluksit ovat juotteissa käytettäviä lisäaineita, joiden tärkeimpinä tehtävänä on toimia katalyyttinä eli parantaa juotettavuutta sekä poistaa epäpuhtauksia piirilevyiltä. Taulukossa 1. on käsitelty tarkemmin fluksin toimintaa eri lämpötiloissa. Tyypillinen fluksi koostuu neljästä komponentista: aktivaattorista, liuottimista, pohja-aineesta sekä lisäaineista. Fluksilla on merkittävä vaikutus juotoksen onnistumisen kannalta, joten on tärkeää valita prosessille sopiva fluksityyppi. Fluksin valintaan aaltojuotoksessa vaikuttavat mm. käytettävä fluksausmenetelmä, piirilevyllä käytetyt pinnoitteet, komponenttien tiheys levyllä, käytettävät puhdistusmenetelmät sekä liitettävien osien ja metallien juotettavuus.

**Taulukko 1.** Fluksin tehtävät eri lämpötiloissa [8]

Lämpötila	Fluksin tehtävä
25 °C	Huuhtelee irtoroskat ja pölyn
75 °C	Fluksi aktivoituu, liuottaa rasvat ja sormenjäljet piirilevyiltä
75–140 °C	Fluksi sulaa ja polttaa oksidit
183–260 °C	Toimii katalyyttinä, helpottaa juotoksen muodostumista

Elektroniikkateollisuudessa käytettävät fluksit voidaan jakaa kahteen päätyyppiin: hartsipohjaisiin flukseihin sekä vesiliukoisiin flukseihin. Vesiliukoiset fluksit taas voidaan jakaa orgaanisiin ja epäorgaanisiin flukseihin, joista jälkimmäisiä ei käytetä elektroniikkateollisuudessa. Oikeastaan fluksien jaottelussa ei ole yhtä oikeaa tapaa, vaan ne voidaan luokitella eri ominaisuuksien mukaan. [9] Kuvassa 10 fluksit on jaoteltu ainesosiensa perusteella.



**Kuva 10** Aaltojuotokseen soveltuvat fluksityypit [9]

Hartsipohjaiset fluksit on valmistettu nimensä mukaisesti hartsista, jota saadaan mm. havupuiden piikasta. Hartsipohjaisia flukseja on saatavilla kolmea eri tyyppiä R, RMA ja RM, jotka eroavat aktiivointiasteeltaan. Hartsin määrällä voidaan vaikuttaa juotoksessa syntyvien jäänteiden määrään. Jäänteiden puhdistaminen vaatii liuotinpohjaisen puhdistusaineen tai lämpimän veden ja saippuan yhdistelmän. Hartsipohjaiset fluksit ovat käytetyimpiä flukseja reflow-juottamisessa hartsin tahmeudesta johtuen, mutta eivät sovellu kovin hyvin aaltojuotokseen. [10]

Elektroniikkateollisuudessa käytettävät vesiliukoiset fluksit ovat glykolipohjaisia ja ne on valmistettu orgaanisista materiaaleista. Vesiliukoisten fluksien käyttö on lisääntynyt huomattavasti aaltojuotoksessa, mutta reflow-juotoksessa ne ovat harvinaisempia niiden huonomman tarttuvuuden vuoksi. Vesiliukoiset fluksit kuuluvat korkean aktiivisuustason flukseihin ja tarvitsevat siksi huolellisen puhdistuksen. Vesiliukoisille flukseille on olemassa paljon erilaisia puhdistusaineita eivätkä ne vaadi vaarallisten yhdisteiden käyttöä. [10]

Näistä kahdesta fluksityypistä on lisäksi olemassa nk. no-clean-versioita jotka eivät jätä jälkeensä merkittäviä jäämiä, eikä niitä siksi tarvitse puhdistaa. No-clean-fluksit sisältävät vain 1–5 % kiinteää ainesta kun vastaavat puhdistusta vaativat fluksit sisältävät vähintään 30 % kiinteää ainesta. No-clean-fluksit ovat ympäristöystävällisiä ja säästävät aikaa ja rahaa, joka muuten kuluisi piirilevyjen puhdistamiseen. No-clean-fluksit soveltuvat myös hyvin aaltojuotoskäyttöön. Jotta fluksi voitaisiin luokitella no-clean fluksiksi, täytyy sen täyttää seuraavat ehdot:

- Ei saa jättää korroosiota aiheuttavia jäämiä
- Ei saa jättää tahmeita jäämiä jotka keräävät pölyä
- Ei saa syövyttää juotoksessa käytettäviä laitteita ja on oltava turvallinen käyttää
- Juotokset on pystyttävä visuaalisesti tarkastamaan ja piirilevyt elektronisesti testaamaan jäämiä puhdistamatta
- Juotettavuuden on oltava hyvällä tasolla. [10]

Elektroniikkateollisuudessa käytettyjen fluksityyppien lisäksi on olemassa epäorgaanisiin happoihin pohjautuvia vesiliukoisia flukseja. Nämä fluksit ovat vahvasti aktivoituja ja aiheuttavat runsaasti korroosiota, minkä vuoksi niitä ei voida käyttää elektroniikkatuotannossa. Epäorgaanisia flukseja käytetäänkin lähinnä kovajuotoksissa kuten kupariputkien juottamisessa. [10]

### 3.3 Piirilevypinnoitteet

Piirilevypinnoitteiden tärkein tehtävä on suojata piirilevyllä olevia paljaita kuparipintoja oksidoitumiselta ja himmentymiseltä, jotta juotettavuus säilyisi hyvänä. Ennen kuin piirilevy voidaan pinnoittaa, on piirilevy puhdistettava epäpuhtauksista. Lyijyttömän elektroniikan aikakaudella on siirrytty käyttämään pelkästään lyijyttömiä piirilevypinnoitteita, joista tärkeimmät ovat HASL, ENIG, OSP sekä immersiotina ja -hopea. [11]

HASL tulee sanoista Hot Air Solder Leveling ja tarkoittaa kuumakastotinausta, jossa piirilevy upotetaan sulaan juotteeseen. Ylimääräinen juote poistetaan yleensä paineilmalla. Ennen lyijyttömyyteen siirtymistä käytettiin tina-lyijy pinnoitteita, nykyään käytetään vaihtoehtoisesti SnCu-, SN100C- tai SAC-seoksia. Seoksen pintajännitys vaikuttaa pinnoitteen paksuuteen ja tasaisuuteen. HASL-pinnoitetuilla levyillä on erinomainen varastoitavuus, alhaiset kustannukset, ja ne kestävät hyvin useampia juotuskertoja ja huonoa käsittelyä. Huonoja puolia ovat pinnan epätasaisuus,

pinnoitteen aiheuttamat oikosulut sekä prosessin vaatiman korkean lämpötilan aiheuttamat viat piirilevyllä. [11]

Electroless Nickel Immersion Gold eli ENIG on kaksikerroksinen piirilevy-pinnoite, jossa alimpana kerroksena piirilevyn kuparin päällä käytetään 3–6 µm nikkeliä ja nikkelin päällä on 0,03–0,05 µm:n kerros kultaa. Kuparin ja kullon välissä käytetään nikkeliä, jotta kulta ei liukenisi kupariin. Kulta on erinomainen piirilevy-pinnoite joka liukenee lähes välittömästi juotteeseen saaden aikaan erittäin tasaisen pinnan. Kulta ei muodosta oksideja joten varastointi ei tuota ongelmia. Huonoja puolia ovat prosessin monimutkaisuus, kullon kalleus, sekä juotoskertojen huono kesto. [11]

Organic Solderability Preservative eli OSP on piirilevyn pinnoittamiseen käytetty ohut orgaaninen pinnoite. Orgaaninen pinnoite suojaa piirilevyn kuparipintoja hapettumiselta ja hajoaa juottamisen aikana. Orgaanisten pinnoitteiden ominaisuudet ovat kehittyneet paljon ensimmäisistä pinnoitteista, ja nykyään ne kestävät useampia juotoskertoja ja korkeampia lämpötiloja. Orgaanisten pinnoitteiden käyttö on edullista ja levitysprosessi on yksinkertainen. Huonoja puolia ovat heikkohko varastoitavuus, pinnoitteen paksuuden vaikea arviointi, heikkeneminen jokaisen juotoskerran jälkeen sekä huono mekaanisen rasituksen kesto. [11]

Immersio- eli kastotinauksessa piirilevy päällystetään ohuella kerroksella puhdasta tinaa. Kerroksen paksuus on tyypillisesti 0,6–1,2 µm, ja se suojelee kuparia hapettumiselta ja tarjoaa erinomaisen juotettavuuden. Immersiotinaus tuottaa hyvän ja tasaisen pinnan, kestää uudelleenjuottamista ja on edullinen pinnoitevaihtoehto. Tinapinnoite kuitenkin heikkenee jokaisen juotoskerran jälkeen, eikä kestä hyvin mekaanista rasitusta. Kerroksen paksuutta on lisäksi vaikea mitata ja tina voi aiheuttaa tinaviikisiä. [11]

Immersiohopea on yksi ensimmäisistä piirilevy-pinnoitteista, koska jalometallina hopea kestää hyvin hapettumista ja on yksi parhaimmista johteista. Hopeakerroksen paksuus piirilevyn pinnalla on tyypillisesti 0,1–0,4 µm. Immersiohopean käyttö on kasvanut huomattavasti lyijyttömyyden aikakaudella sen hyvien ominaisuuksien ansiosta. Pinnoitusprosessi on yksinkertainen ja tuottaa tasaisen lopputuloksen. Lisäksi kerroksen paksuus on helppo mitata eikä pinnoite heikkene edes useamman juotoskerran jälkeen. Huonoja puolia ovat huono mekaanisen rasituksen kesto sekä hopeapinnoitteen tummuminen. [11]

## 4 PIIRILEVYN ESILÄMMITTÄMINEN

Lämpökäsittelyt ovat kaikissa elektroniikan valmistusprosesseissa välttämättömiä, koska ilman lämpöä ei ole mahdollista saada aikaan juotosliitosta. Lämpötilan vaihtelut aiheuttavat lämpölaajenemista, ja se vaihtelee eri materiaaleilla. Kaikki piirilevyn osat eivät välttämättä pääse laajenemaan vapaasti, jolloin piirilevylle syntyy lämpötilaeroja, jotka aiheuttavat piirilevylle jännitteitä. Jännitteet taivuttavat piirilevyä ja aikaansaavat murtumia komponenteissa ja liitoksissa. Tämän takia piirilevyn tasainen lämmittäminen juotosprosessin aikana on ensisijaisen tärkeää. Esilämmityksen yksi tärkeimmistä tehtävistä onkin varmistaa, ettei piirilevyllä esiinny suuria lämpötilaeroja sen siirtyessä juotosaaltoon. [12]

Esilämmitys vaikuttaa fluksin toimintaan, juotokseen sekä levyyn. Esilämmityksen tehtävänä on haihduttaa fluksista liuottimia sekä sulattaa fluksin kiinteät ainesosat. Esilämmitys tasaa lämpötilaeroja piirilevyllä ja nostaa piirilevyn ja komponenttien lämpötilan lähelle juotoslämpötilaa, jotta vältettäisiin voimakas lämpötilannousu. Ideaalitulanteessa lämpösokkia ei esiinny lainkaan, koska juotoslämpötila saavutetaan jo esilämmityksessä. Tosiasiassa ideaaliarvoja on mahdotonta saavuttaa, joten on todettu että juotosaallon komponentteihin kohdistama lämpösokki saa olla korkeintaan 100 °C. Esilämmitys parantaa merkittävästi juotoslaatua ja vähentää lämpövaihteluiden aiheuttamia vikoja. Esilämmittäminen lyhentää myös juotokseen tarvittavaa aikaa. [12]

Lyijyttömien juotteiden käyttöönotto on kasvattanut esilämmitykseen kohdistuvia vaatimuksia entisestään, koska piirilevyä on lämmitettävä enemmän juotoksen onnistumiseksi. Lyijyttömien juotteiden myötä alkoholipohjaisten fluksien käyttö on vähentynyt ja tilalle ovat tulleet vesipohjaiset fluksit, jotka myös vaativat esilämmitykseltä korkeampia lämpötiloja haihtumisen takaamiseksi. Lyijyttömien juotteiden aiheuttamia muutoksia joudutaankin usein kompensoimaan pidentämällä esilämmitysaluetta, hidastamalla kuljettimen nopeutta tai lisäämällä esilämmittimen lämmitystehoa. Riittävän lämmitystehon takaamiseksi esilämmitin saattaa koostua useammasta lämmitysalueesta, joissa lämpö tuotetaan erityyppisillä lämmityselementeillä. [12]

### 4.1 Lämmitysmenetelmät

Aaltojuotosprosessin esilämmityksessä erilaisilla lämmitysmenetelmillä pyritään aikaansaamaan tasainen lämpöjakauma piirilevyllä sen rakenteesta ja kalustuksesta

riippumatta. Lämmön siirtämiseen on olemassa kolme erityyppistä menetelmää: säteily, konvektio ja konduktio.

Lämpösäteily on hiukkasten tai energian siirtymistä säteilylähteestä ympäristöön tai kohteeseen. Lämpösäteily on sähkömagneettista säteilyä, joka ei tarvitse väliainetta energian siirtämiseen. Säteilylämmittimiä käytetään esilämmittimissä aikaansaamaan voimakas lämmön nousu piirilevyllä. Tyypillisiä IR-alueella toimivia säteilylämmittimiä ovat Calrod- ja keraamiset säteilijät, IR- ja kvartsilamput sekä vastuslevyt. [12]

Konvektio eli kuljettuminen tarkoittaa lämmön siirtymistä kaasussa tai nesteessä lämmön aiheuttamien virtausten mukana. Virtauksen saa aikaiseksi noste, joka saa kuuman aineen nousemaan ylös. Viilentynyt aine puolestaan laskeutuu alas. Kaasu- tai nestemolekyylien virtausnopeutta voidaan kasvattaa ulkopuolisella energialla esim. käyttämällä puhallinta. Tällöin kyseessä on pakotettu konvektio. Esilämmittimissä käytetään yleisesti pakotettua konvektiota fluksin ainesosien haihduttamiseen piirilevyn pinnalta sekä varmistamaan lämpöenergian tunkeutuminen hankaliinkin paikkoihin. [12]

Konduktio eli johtuminen on lämmön siirtymistä aineen sisällä tai kahden toistensa kanssa kosketuksissa olevan aineen välillä. Lämpöenergia siirtyy aina korkeammasta potentiaalista matalampaan, jotta se saavuttaisi tasapainotilan. Esilämmityksessä johtumista tapahtuu piirilevyssä, komponenteissa sekä piirilevyn ja komponenttien välillä. [12]

#### 4.2 Lämpö vian aiheuttajana

Lämpö aiheuttaa vikoja piirilevyille ja komponentteihin laajentamalla materiaaleja. Jos materiaalit pääsevät laajenemaan vapaasti, ongelmia ei pitäisi esiintyä. Tosiasiassa piirilevysuunnittelu ja komponenttien sijoitteluratkaisut estävät usein materiaalien lämpölaajenemisen, jolloin törmätään ongelmiin. Koska eri materiaalit omaavat erilaiset lämpökertoimet, laajenevat ne myös eri tahtiin. Eri tahtiin laajenevat materiaalit aiheuttavat lämpötilaeroja, jotka synnyttävät jännitteitä piirilevyille ja komponentteihin. Jännitteet aiheuttavat piirilevyn taipumista ja vikoja komponenttien suojarakenteisiin ja sähköisiin kontakteihin. Siksi jo piirilevysuunnittelussa tulisi valita käytettävät materiaalit siten, että niiden lämpökertoimet olisivat mahdollisimman lähellä toisiaan. [12]

Elektroniikan valmistusprosesseissa on ensisijaisen tärkeää, että lämpötilaa pystytään kontrolloimaan. Tällä pyritään välttämään komponenttien vikaantumiset ja jännitteiden muodostuminen piirilevyille. Esilämmitys on tärkeä osa lämpötilan hallintaa

aaltojuotosprosessissa. Monet lämmön aiheuttamat viat voidaan välttää säätämällä esilämmityksen parametrit oikein, ja valitsemalla esilämmitin, joka koostuu oikean tyyppisistä lämmitysratkaisuista. Tasaisella lämmityksellä saavutetaan parempi juotoslaatu ja pienempi vikaantumisprosentti. Lisäksi juotuskoneen rakenteellisilla ratkaisuilla voidaan vaikuttaa merkittävästi lämpökäyttäytymiseen. Jos esimerkiksi aaltojuotuskoneen esilämmittimen ja juotosaallon etäisyys toisistaan on suuri, ehtii lämpötila pudota, jolloin piirilevyyn ja komponentteihin kohdistuu suurempi lämpösokki.

[12]



## 5 ESILÄMMITTIMESSÄ KÄYTETTY LAITTEISTO

Turun ammattikorkeakoulu sai lahjoituksena Fläkt Woods Oy:ltä käytetyn taajuusmuuttajan sekä kolmivaiheoikosulkumoottorin, joita käytettiin hyödyksi tässä projektissa. Tässä luvussa on esitelty lyhyesti taajuusmuuttajiin sekä oikosulkumoottoreihin liittyvää teoriaa, koska edellä mainitut laitteet ovat olennainen osa tässä työssä rakennetun esilämmittimen toimintaa.

### 5.1 Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttajan tehtävänä on muuttaa verkosta saatavan vaihtovirran ja -jännitteen taajuutta. Taajuusmuuttajia käytetään pääasiallisesti oikosulkumoottoreiden nopeuden ja vääntömomentin säätöön. Moottorin nopeutta voidaan säätää portaattomasti ja sovittaa nopeus haluttuun prosessiin, jolloin prosessia saadaan tehostettua merkittävästi. Taajuusmuuttajakäytön tärkeimpiä etuja ovat moottorin kiihtyvyyden, nopeuden ja momentin portaaton säätö, prosessin automatisointi, kustannustehokkuus sekä kauko-ohjausmahdollisuus. [13]

Yleisin taajuusmuuttajatyyppe on jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja, joka on toimintaperiaatteeltaan kolmivaiheinen. Taajuusmuuttaja koostuu tasasuuntaajasta, suodatin- ja kapasitanssipiiristä sekä vaihtosuuntaajasta. Tasasuuntaajassa vaihtojännite tasasuunnataan diodi- tai tyristorisillan avulla tasajännitteeksi. Tasasuunnattu jännite syötetään välipiirille, joka koostuu kondensaattoreista ja kuristimista. Välipiirin tehtävänä on vakauttaa vaihtosuuntaajaan syötettävää jännitettä ja toimia sähköenergian välivarastona. Tasajännite muunnetaan moottorille sopivaksi vaihtojännitteeksi kuudesta kytkimestä koostuvan vaihtosuuntaussillan avulla. Vaihtosuuntaajassa moottorin vaiheet kytketään vuorotellen kondensaattorin positiiviseen ja negatiiviseen potentiaaliin, ja kytkentöjä vaihdetaan nopeassa tahdissa käyttäen pulssileveysmodulaatiota. Lopputuloksena syntyy vaihtojännitettä, joka on pulssileveydeltään vaihtelevaa kanttiaaltoa. Ennen ulossyöttöä suodatettu jännite muistuttaa sinikäyrää. [13]

Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan ohjaus perustuu joko skalaarisäätöön, skalaarivektorisäätöön tai suoraan momenttisäätöön. Skalaarisäätö on yksinkertaisin taajuusmuuttajan ohjaustapa, jossa säädettäviä muuttujia ovat jännite ja taajuus. Skalaarivektorisäätö on paranneltu versio skalaarisäädöstä, jossa taajuusmuuttaja saa tietoa moottorin nopeudesta ja moottorin asennosta. Skalaarivektorisäädössä

säädettävät muuttujat ovat jännite, taajuus ja virta. Suora momenttisäätö on taajuusmuuttajan ohjaustavoista kehittynein, ja siinä säädettäviä muuttujia ovat magneettivuo ja momentti. Magneettivuolle ja momentille asetetaan raja-arvot, joiden sisällä niiden on pysyttävä.

#### 5.1.1 Danfoss VLT 2800 -taajuusmuuttaja

Moottorin ohjaamisesta vastaa Danfossin VLT 2800 -sarjan taajuusmuuttaja. Taajuusmuuttajalla ohjataan 2,2 kW:n oikosulkumoottoria joka toimii tähtikytkennässä, eli staattorin käämien toiset päät ovat oikosulussa keskenään. VLT 2800 -sarja edustaa markkinoiden pienikokoisimpia monitoimitaajuusmuuttajia, ja ne on todettu käytössä erittäin luotettavaksi ja kestäviksi. VLT 2800 -sarjaa voidaan ohjata paikallisesti käyttäen taajuusmuuttajan valikoita tai kauko-ohjauksella erillisellä ohjauspaneelilla tai tietokoneella. VLT 2800 -sarjan taajuusmuuttajissa on monia käytettävyyteen ja turvallisuuteen liittyviä hyödyllisiä ominaisuuksia, kuten automaattinen moottorinsovitus (AMT) ja oikosulkutilanteen tunnistus. Kuva 11 esittää Fläkt Woods Oy:ltä lahjoituksena saatua taajuusmuuttajaa.



**Kuva 11** VLT 2800 -taajuusmuuttaja

#### 5.2 Oikosulkumoottori

Oikosulkumoottori on yksinkertaisen rakenteensa ansiosta suosituimpia sähkömoottorityyppejä teollisuudessa. Oikosulkumoottorit omaavat hyvän hyötysuhteen ja tarvitsevat vain vähän huoltoa. Ainoat kuluvat osat

oikosulkumoottorissa ovat sen laakerit. Oikosulkumoottorin tärkeimmät komponentit ovat paikallaan pysyvä staattori eli seisojakäämitys sekä staattorin sisällä pyörivä roottori. Oikosulkumoottorissa käytetään häkkikäämittyä roottoria, jossa roottorin uriin on upotettu metallisauvoja, jotka on oikosuljettu keskenään molemmista päistään oikosulkurenkailla. Staattorikäämitys on puolestaan symmetrinen, ja se on kytketty joko tähteen tai kolmioon. [14]

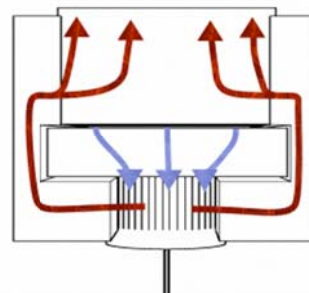
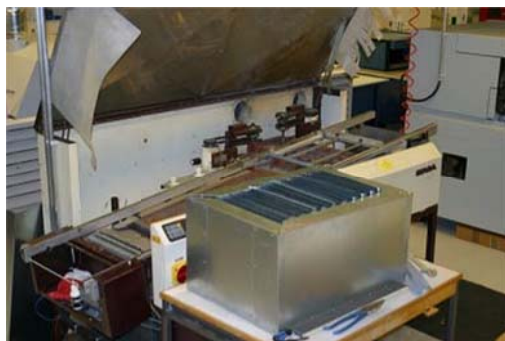
Oikosulkumoottorin toimintaperiaate on myös melko yksinkertainen. Kun oikosulkumoottorin staattoriin kytketään jännite, syntyy roottorin ympärillä pyörivä magneettikenttä, jonka kenttäviivat leikkaavat roottorinkäämin sauvoja. Pyörivä magneettikenttä indusoi roottoriin virran, joka magnetoii roottorin. Magnetoitunut roottori pyrkii seuraamaan staattorin pyörivää magneettivuota, joka saa aikaan roottorin pyörimisliikkeen. Moottori alkaa pyöriä, kun sähköinen vääntömomentti on suurempi kuin roottoria jarruttavan kuorman vääntömomentti, ja sen pyörimissuunta on aina sama kuin magneettikentän. Oikosulkumoottoria kutsutaan myös epätahtimoottoriksi, koska roottori pyörii aina hitaammin kuin magneettikenttä. Magneettikentän ja roottorin pyörimisnopeuksien eroa kutsutaan jättämäksi. [14]

## 6 ESILÄMMITTIMEN SUUNNITTELU

### 6.1 Lähtökohdat

Suunnittelun pohjana käytettiin Turun ammattikorkeakoulussa harjoitustyönä rakennettua vanhaa esilämmitintä, joka oli rakennettu korvaamaan aaltojuotoskoneen alkuperäinen esilämmitin. Alkuperäinen lämmitin perustui pitkäaaltoiseen infrapunasäteilyyn, jonka taipumuksena on heijastua kaikilta kiiltäviltä metallipinnoilta. Tästä syystä lämpö ei jakautunut riittävän tasaisesti piirilevyille, joten tilalle kehitettiin uudentyyppinen esilämmitin.

Vanha esilämmitin perustui säteilyn sijasta pakotettuun konvektioon eli ilman koneelliseen kierrättämiseen. Lämmöntuotannosta vastasivat kolme 2 kW:n kiuasvastusta, joista kaksi oli sijoitettu ilman ulostulojen eteen ja yksi imuilman eteen. Ilman kierrättämisestä vastasi yksivaihemoottori, jonka akseliin oli liitetty puhallin. Kuvassa 12 on esitetty vanha esilämmitin ja sen toimintaperiaate.



**Kuva 12** Harjoitustyönä rakennettu esilämmitin, josta tehtiin seuraava sukupolvi [3]

Esilämmittimen rakenne oli suunniteltu siten, että lämpötila saatiin nostettua sopivalle tasolle kierrättämällä ilmaa laatikon sisällä. Imuilma otettiin laatikon keskeltä samasta paikasta kuin poistuva ilma, jolloin osa ilmasta imeytyi takaisin puhaltimelle ja osa poistui yläkautta. Ilman ulostuloaukolle oli suunniteltu ilmavirtausta ohjaavia levyjä, joista joka toinen päästi ilman ulos laatikosta ja joka toinen kierrätti sen takaisin puhaltimelle. Lisäksi laitteeseen oli suunniteltu kansiosa, jonka tarkoituksena oli pitää lämmin ilma kierrossa palauttamalla se takaisin puhaltimelle.

## 6.2 Ongelma

Vaikka vanha esilämmitin oli toiminut odotetulla tavalla, oli sen käytössä ilmennyt kuitenkin muutamia puutteita. Suurin puute oli ilman virtausnopeuden säädön puute ja tehoton moottori, minkä vuoksi piirikorttiin kohdistuva ilmavirtaus ei ollut riittävän voimakas. Virtausnopeuden tulisi olla mahdollisimman korkea, jotta piirilevyn kuivumisnopeus pysyisi riittävällä tasolla eikä liian korkeita lämpötiloja esiintyisi. Tavoitteena olikin saada esilämmitin haihduttamaan fluksi pienemmällä lämpötilalla mutta suuremmalla ilmavirtauksella. Ilman kierrätyksestä vanhassa lämmittimessä vastasi yksivaihemoottori, joka toimi vakiokierrosnopeudella ja oli erittäin äänekäs.

Ratkaisuna ongelmalle hankittiin edellistä yksivaihemoottoria huomattavasti tehokkaampi kolmivaiheoikosulkumoottori, ja sen ohjaamiseen hankittiin taajuusmuuttaja. Lisäksi vanha puhallin korvattiin uudella vastaavanlaisella puhaltimella, jonka ilmantuotto on huomattavasti vanhaa suurempi.

Toinen ongelma liittyi ulostulevan ilmavirtauksen epätasaiseen jakautumiseen. Koska puhallin imi ilmaa laatikon keskeltä ja puhalsi sitä reunoilta, oli ilmavirtaus selvästi voimakkaampaa laatikon molemmissa päädyissä sen jäädessä keskeltä vaatimattomaksi. Tarkoituksena on, että piirilevy komponentteineen lämpiäisi koko esilämmittimen alueella tasaisesti eikä lämpötilaan saisi tulla notkahduksia. Tähän liittyen huomattiin myös, että lämpötila pääsi putoamaan liikaa esilämmittimen ja juotospadan välillä, joten tämäkin asia vaati korjausta.

Ilman kierrättämiseen liittyvään ongelmaan ainoa ratkaisu löytyi esilämmittimen rakenteen muuttamisesta. Uudessa mallissa osa imuilmasta voidaan johtaa laatikon ulkopuolelta ja osa ilmasta kierrätetään, jolloin ulostulevan ilmavirtauksen pitäisi olla tasaisempi. Tälläkin ratkaisulla on kuitenkin omat haittapuolensa. Jos ilmaa johdetaan lämmittimen ulkopuolelta, ilman kierrätys laatikon sisällä huononee jossain määrin. Tämä voi aiheuttaa tilanteen, jossa ulostuleva ilma ei ehdi lämmitä riittävästi kulkiessaan vastusten ohi. Edellä mainittuun ongelmaan haettiin ratkaisua suunnittelemalla imuilman kanavaan säädin, jolla voidaan säätää ulkoa otettavan ilman ja laatikon sisältä otettavan ilman suhdetta. Myös lämpövastusten määrää olisi voinut lisätä ja imuilman ohjata vastusten läpi. Esilämmittimen ja juotospadan välistä rakoa saatiin pienennettyä merkittävästi katkaisemalla yksi juotoskoneen poikkialkeista. Palkki voitiin katkaista, koska sillä ei ollut juurikaan vaikutusta koneen rakenteen kestävyYTEEN.

## 7 RAKENNUS JA KÄYTTÖÖNOTTO

### 7.1 Rakennus- ja muutostyöt

Kun suunnitteluvaihe oli saatu päätökseen, aloitettiin esilämmittimen rakennus- ja modifiointi. Aluksi vanha esilämmitin oli irrotettava juotoskoneesta. Lämmittimen irrottamista hankaloittivat jotkin juotoskoneen osat kuten flukseri ja ketjukuljetin, jotka jouduttiin purkamaan asennusten tieltä. Lisäksi moottorin ja lämpövastusten sähkökytkennät oli purettava. Tämän jälkeen esilämmitin purettiin alkutekijöihinsä töiden helpottamiseksi.

Työt aloitettiin purkamalla vanhan moottorin kiinnitystuet, koska ne eivät soveltuneet uudelle, huomattavasti kookkaammalle moottorille. Tilalle suunniteltiin ja rakennettiin tukevampi moottorinkannatin (kuva 13), joka kestäisi uuden moottorin painon. Materiaalina käytettiin järeää alumiinista kulmaprofiilia ja 2 mm:n paksuista peltilevyä. Kiinnitykseen käytettiin kulmarautoja. Moottorituen rakentamisessa oli myös huomioitava, että uusi rakenne ei saa hankaloittaa moottorin kytkentäkotelon avaamista tai tulla kaapeleiden läpivientien eteen. Moottorin akselia varten ei tarvinnut porata uutta reikää, koska uusi moottori asennettiin samaan kohtaan kuin vanha.



**Kuva 13** Moottorin tuenta

Toinen ratkaisua vaativa ongelma oli esilämmittimestä ulosvirtaavan ilman epätasainen jakautuminen. Puhallus oli voimakkainta lämmittimen reunoilla mutta heikko keskivaiheilla. Ongelman ratkaisemiseen käytettiin paljon aikaa, ja lopulta päädyttiin siihen ratkaisuun, että ainakin osa sisään tulevasta ilmasta ohjataan puhaltimelle lämmittimen ulkopuolelta. Tällä ratkaisulla pyrittiin aikaansaamaan tasaisempi ilmavirtaus koko esilämmittimen alueella. Lisäksi ulostuloilman lämpötilaan voidaan

vaikuttaa säätämällä lämmittimen ulkopuolelta otettavan ja kierrätettävän ilman suhdetta. Tässäkin ratkaisussa oli kuitenkin omat riskinsä: jos ilmaa ei kierrätetä riittävästi, se ei välttämättä ehdi lämmitä riittävästi ulos tullessaan. Riskeistä huolimatta ratkaisua päätettiin kokeilla. Ulos tulevalle ilmalle oli kehitettävä myös jonkinlaisia ohjaimia, joilla ilmavirtaus saataisiin jaettua tasaisemmin.

Esilämmittimen sisäosien muutostyöt aloitettiin rakentamalla puhaltimen imupuolelle kotelo, johon osa ilmasta ohjataan lämmittimen ulkopuolelta ja osa kierrätetään. Kotelo asennettiin hieman puhaltimen yläpuolelle ja puhaltimen kohdalle tehtiin reikä imuilmaa varten. Kotelo ylettyy pitkittäissuunnassa lämmittimen päästä päähän ja leveyssuunnassa lämmittimen molempiin reunoihin jää rako ulostuloilmaa varten. Ulkoa tulevan ilman kanavaan rakennettiin säätölevy (kuva 14), jolla pystytään säätämään ulkoa otettavan ja kierrätettävän ilman suhdetta. Puhaltimelle takaisin kierrätettävälle ilmalle tehtiin kanavia ilmanohjainkotelon yläosaan, ja ne pyrittiin sijoittamaan siten, että imuilman vaikutus ulostulevaan ilmavirtaukseen olisi mahdollisimman pieni. Kotelon sisälle asennettiin vastus, jonka läpi kaikki puhaltimelle tuleva ilma ohjataan. Laatikon molempiin reunoihin ulostulevan ilman reitille asennettiin myös vastaavanlaiset vastukset.



**Kuva 14** Imuilman säätö

Laatikosta poistuvan ilmavirran ohjaamiseen hyödynnettiin vanhan esilämmittimen peltisiä ilmanohjaimia, joiden yläosaan porattiin reikiä vieriviereen ulostulevaa ilmaa varten (kuva 15). Imuilman kotelon päälle rakennettiin kaukalo ilmanohjaimia varten, jonka tarkoituksena on ohjata laatikon reunoilta tuleva ilmavirtaus ilmanohjaimien sisään. Ilmanohjaimet sijoitettiin aivan esilämmittimen yläosaan, jotta piirilevyn ja puhallettavan ilman välinen etäisyys olisi mahdollisimman pieni.



**Kuva 15** Ilmanohjain

Nyt kun esilämmittimen rakennustyöt oli saatu valmiiksi, voitiin siirtyä laitteen asennukseen. Vaikka esilämmittimen rakenne oli muuttunut paljon alkuperäisestä, säilytettiin rakenteessa myös useita toimivaksi todettuja ominaisuuksia. Suurimmat muutokset kohdistuivatkin esilämmittimen sisäosien rakenteeseen ja moottorin tuentaan perusrakenteen pysyessä samana.

## 7.2 Asennus ja käyttöönotto

Seuraava työvaihe oli esilämmittimen asentaminen takaisin juotoskoneeseen ja esilämmittimen toiminnan testaaminen. Työt aloitettiin sahaamalla poikki yksi juotoskoneen poikkipalkeista, joka esti esilämmittimen asentamisen riittävän lähelle juotospataa. Kun palkki oli poissa tieltä, voitiin lämmitintä sovitella paikoilleen. Vanhan esilämmittimen kiinnityksiä ei voitu hyödyntää, koska ne olivat liian heikot uudelle lämmitimelle. Uuden lämmittimen tuentaan oli oikeastaan kaksi vaihtoehtoa: joko rakentaa esilämmittimelle maahan asti ylettyvä tukikehikko tai kiinnittää se juotoskoneen rakenteisiin. Asennettaessa esilämmitintä oli otettava huomioon myös se, että piirilevyjen tuli kulkea esilämmittimen ja juotospadan yli noin 6<sup>o</sup>:n kulmassa vaakatasoon nähden, joten myös esilämmitin oli asennettava hieman vinoon. Paremmaksi vaihtoehdoksi todettiin ensimmäinen vaihtoehto eli tukikehikon rakentaminen, koska tällä tavalla kaltevuuskulmaa voidaan säätää helpommin sekä vähentää kotelon resonointia. Tukikehikko rakennettiin pääasiassa vanhoista kulmaprofiileista, ja sen kaikkiin kulmiin asennettiin säädettävät kierrejalat. Esilämmitin nostettiin tukikehikon päälle, eikä sitä kiinnitetty millään tavalla.

Lopuksi suoritettiin esilämmittimen osien kokoonpano. Lämmittimen kokoaminen kävi nopeasti, koska rakenne on suunniteltu siten, että kaikki osat ovat sekä asennettavissa



että purettavissa tiettyä järjestystä noudattaen. Ketjukuljetin ja flukseri asennettiin paikoilleen ja esilämmittimen kaltevuus säädettiin silmämääräisesti kohdilleen.

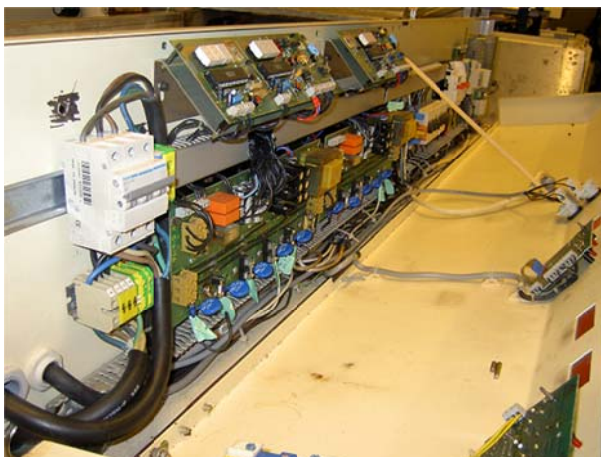
### 7.2.1 Sähkökytkennät

Toinen suurempi työvaihe esilämmittimen asentamisen lisäksi oli sähkökytkentöjen tekeminen. Laitteen sähköistäminen ei olisi muuten ollut suuri vaiva, jos ei olisi tarvinnut perehtyä sähköturvallisuusasioihin, johtojen ja sulakkeiden mitoituksiin tms.

Vanhan esilämmittimen yksivaihemoottorin tarvitsema virta otettiin juotoskoneen omasta sähköliitännästä ja moottorin toimintaa ohjattiin juotoskoneen säätimillä. Koska uusi moottori toimii kolmella vaiheella ja vaati huomattavasti suurempia virtoja toimiakseen, ei alkuperäistä sähköliitaintä voitu hyödyntää. Juotoskoneen muihinkaan sähköjärjestelmiin ei kajottu, koska sähköjen kytkeminen olisi tullut tällöin turhan monimutkaiseksi. Aluksi sähköt ajateltiin vetää juotoskoneen vieressä sijaitsevasta 16 A:n voimavirtapistokkeesta, mutta hanke ei onnistunut, koska kyseinen pistoke oli kytketty vikavirtasuojakytkimen taakse eikä kyseistä taajuusmuuttajaa voi käyttää tämäntyyppisen vikavirtasuojan kanssa. Siksi sähköt päädyttiin vetämään vähän kauempana sijaitsevasta 32 A:n voimavirtapistokkeesta joka ei ole vikavirtasuojattu.

Laitteen verkkovirtakaapeliksi hankittiin viisi metriä tavallista 32 A:n pistokkeilla varustettua 5-johtimista voimavirtakaapelia. Kaapelin voimavirtapistokkeeseen tuleva pää jätettiin ehjäksi ja toisen pään liitin purettiin. Tämän jälkeen kaapeli katkaistiin sopivan mittaiseksi ja kytkettiin 10 A:n automaattisulakkeisiin. Sulakekoko oli pienennettävä, koska taajuusmuuttajan ja moottorin välissä käytetyn kaapelin johdinten pinta-ala on 1,5 mm<sup>2</sup> kun taas verkkojohdossa se on 6 mm<sup>2</sup>. Sulakekoko määräytyy pienimmän kaapelin perusteella, joka tässä tapauksessa oli moottorin ohjauskaapeli. Automaattisulakkeet ja nolla- ja suojajohtimen läpivientiliittimet asennettiin juotoskoneen sisälle DIN-kiskoon. Kaapeleiden läpivienneissä käytettiin vedonpoistollisia läpivientiholkkeja. Automaattisulakkeilta lähtevät johtimet kytkettiin puolestaan taajuusmuuttajan verkkovirtaliittimiin ja nolla- ja maajohtimet yhdistettiin kytkemällä ne taajuusmuuttajan maadoitusliittimeen. Pääkytkintä tai hätäkatkaisijaa ei tässä tapauksessa asennettu, koska kaikki aaltojuotoskoneen sähköt olisi pitänyt vetää niiden kautta. Verkkovirtatuloon olisi myös voitu asentaa suodatin suodattamaan taajuusmuuttajan verkkoon tuottamia häiriöitä, mutta sitä ei tässä tapauksessa koettu tarpeelliseksi. Kuva 15 esittää aaltojuotoskoneen sähkökytkentöjä, jossa etualalla taajuusmuuttajaa varten tehdyt kytkennät. DIN-kiskoon on asennettu 10 A:n

automaattisulake, joka toimii samalla pääkatkaisijana. Kaapeleiden läpiviennit on tehty käyttäen vedonpoistollisia holkkeja.



**Kuva 16** Juotoskoneen sähkökytkennät

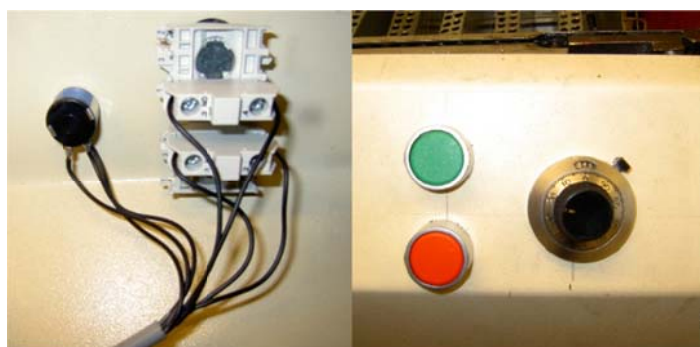
Moottori kytkettiin taajuusmuuttajan moottorilähtöön käyttäen EMC-häiriöiltä suojattua 4-johtimista kaapelia. Kaapelia ympäröivä kuparisukka ja maadoitusjohdin yhdistettiin yhdeksi johtimeksi kaapelin molemmissa päissä ja kytkettiin taajuusmuuttajan ja moottorin maadoitusliittimiin. Moottori kytkettiin arvokilven mukaisesti toimimaan tähtiliitännässä, eli moottorin käämien toiset päät oikosuljettiin. Käytettäessä tähtikytkentää moottori ei anna kaikkia tehoreservejään, mutta sillä ei ole niin väliä käytettäessä moottoria puhaltimena. Moottorinsuojakytkintä tai muita vastaavia komponentteja ei tässä tapauksessa tarvittu, koska taajuusmuuttaja hoitaa niiden tehtävät.

### 7.2.2 Taajuusmuuttajan käyttöönotto

Ennen kuin taajuusmuuttaja voitiin johdottaa, oli sille rakennettava riittävän tukeva alusta kiinnitystä varten. Suurien vuotovirtojen takia vaatimuksena oli, että asennuspaikka on riittävän hyvin maadoitettu. Asennuslevy valmistettiin 3 mm:n vahvuisesta L-profiilin teräksestä, joka asennettiin juotoskoneen vasempaan reunaan. Riittävä maadoitus varmistettiin kiinnittämällä asennuslevy juotoskoneen runkopalkkeihin ja testaamalla johtavuus eri kohdista yleismittarilla. Taajuusmuuttajan etäisyys moottoriin ja säätimiin haluttiin pitää mahdollisimman lyhyinä, jotta häiriöt pysyisivät pieninä.

Vaikka taajuusmuuttajaa voidaan käyttää paikallisesti sen oman ohjauspaneelin kautta, todettiin järkevämmäksi vaihtoehdoksi toteuttaa ohjaus etänä. Etäohjaus valittiin käsiohjauksen sijaan, koska oikeiden säätöjen löytäminen laitteen valikoista on työlästä ja toiseksi, taajuusmuuttaja sijaitsee melko hankalassa paikassa. Etäohjausta varten hankittiin 3 m 7-johtimista ohjauskaapelia, 10-kierroksen tarkkuus-potentiometri moottorin nopeuden säätöön sekä painikkeet moottorin käynnistykseen ja pysäytykseen. Ohjauskaapeli oli tässä tapauksessa suojaamatonta, vaikka ohjekirjassa käskettiin käyttää häiriösuojattua kaapelia. Säätimet jouduttiin myös asentamaan melko kauas taajuusmuuttajasta, koska juotoskoneen etupaneelissa ainoa vapaa tila oli koneen keskivaiheilla.

Tarkkuuspotentiometri liitettiin yhteen taajuusmuuttajan analogiatuloista, joka oli tarkoitettu moottorin potentiometriohjaukseen. Potentiometri oli kalibroitava säätämällä taajuusmuuttajan parametreja, jotta koko säätöalue saatiin käyttöön. Käynnistys- ja pysäytysnapit liitettiin taajuusmuuttajan digitaalituloihin ja valittiin kyseisille digitaalituloille parametreista funktiot, joilla moottori saatiin käyntiin ja pysähdyksiin. Kuva 17 esittää ohjainlaitteita juotoskoneeseen asennettuna.



**Kuva 17** Ohjainlaitteet takaa sekä edestä kuvattuna

Taajuusmuuttajan käyttöönotto osoittautui odotettua työläemmäksi operaatioksi, koska laitteen parametreihin perehtyminen ja niiden kuntoon säätäminen veivät paljon aikaa. Taajuusmuuttajassa on 642 parametria, joilla pystytään vaikuttamaan moottorin ja taajuusmuuttajan eri toimintoihin. Valtaosaa parametreista ei kuitenkaan tarvita esilämmittimen moottorin ohjauksessa, mikä osaltaan helpotti laitteen säätöjen tekemistä.

Ensimmäinen toimenpide oli palauttaa taajuusmuuttajaan tehdasasetukset, koska laite hankittiin käytettynä ja käytössä olivat edellisen käyttäjän tekemät asetukset. Parametrien ohjelmointi suoritettiin taajuusmuuttajan oman ohjauspaneelin kautta.

Aluksi taajuusmuuttajalle oli syötettävä moottorin tiedot, jotta moottori tunnistuisi oikein. Tarvittavat tiedot olivat moottorin teho, jännite, taajuus, virta ja nimellinopeus, joiden arvot löytyivät moottorin arvokilvestä. Lisäksi suoritettiin moottorin automaattinen sovitus (AMT), jolla saatiin sovitettua moottori ja taajuusmuuttaja mahdollisimman hyvin yhteen.

Seuraavaksi taajuusmuuttajalle valittiin kolmesta vaihtoehdosta sopivin toimintatapa puhallinkäyttöä ajatellen. Asetuksen valitseminen poisti ne parametrit käytöstä, joita ei tarvittu kyseisessä sovelluksessa. Etäohjausta varten asennetut säätimet saatiin toimimaan halutulla tavalla valitsemalla parametreista oikeat toiminnot säätimiä varten. Kahteen laitteen digitaalituloista liitettiin painikkeet, joilla voidaan antaa käynnistys- ja pysäytyskäskyt taajuusmuuttajalle. Koska painikkeet olivat tyypiltään palautuvia, oli käynnistykseen ja pysäytykseen käytettävä pulssiohjausta. Yhteen laitteen analogiatuloista liitettiin potentiometri, jolla ohjataan moottorille syötettävää taajuutta. Potentiometri piti kalibroida, jotta se toimisi koko säätöalueella. Kalibroiminen aiheutti paljon päänvaivaa, koska taajuusmuuttaja hävitti kalibroinnin minimi- ja maksimirajat aina kun laite irrotettiin verkkovirrasta. Pitkällisen säädön jälkeen potentiometri saatiin kuitenkin toimimaan halutulla tavalla.

Kun kaikki säädöt saatiin kohdilleen, oli aika testata taajuusmuuttajan ja ohjainlaitteiden toiminta. Laitteiston todettiin toimivan odotetulla tavalla, eikä ongelmiin törmätty. Tämän jälkeen esilämmitin oli valmis tarkempia mittauksia ja testejä varten, joista tarkemmin luvussa 8.

## 8 MITTAUKSET JA TULOKSET

Mittausten tavoitteena oli mitata piirilevyn kuivumisen tehokkuutta sekä sen jakautumista piirilevyllä poikittain kulkusuuntaan nähden. Eniten kuivumisnopeuteen voidaan vaikuttaa lisäämällä ilmavirtauksen nopeutta, mutta myös lämpötilalla on suuri merkitys lopputulokseen. Lisäksi oli tarkoitus ottaa selvää uuden esilämmittimen lämmitystehosta ja säädettävyydestä.

### 8.1 Testikortti

Testikorttina käytettiin Yngvar Wikströmin suunnittelemaa piirilevyä, joka on suunniteltu aaltojuotosprosessin optimointia varten. Piirilevyllä on erikokoisia ja -muotoisia johdinkuvioita, joiden avulla nähdään puuttuvat juotokset ja oikosulut. Piirilevyn materiaalina on käytetty yksipuolista FR4-epoksilasikuitulevyä, ja se on pinnoitettu nikkeli-kultapinnoitteella.

### 8.2 Testimenettely

Tarkoituksena oli selvittää esilämmittimen tuottama lämmitysteho käyttämällä puhallinta eri nopeuksilla sekä säätämällä kierrätettävän ilman ja ulkoa otettavan ilman suhdetta. Esilämmittimen päällä käytettiin kansiosaa, joka ohjaa lämpimän ilman takaisin kiertoon. Prosessin lämpötilat taltioitiin profilointilaitteistolla. Profiloinnista saatuja lämpötiloja käytettiin esilämmittimen säätöjen tekemiseen. Tavoitteena oli löytää sopiva esilämmitysprofiili lyijyttömälle juotteelle. Testikortin alapinnalle ruiskutettiin fluksia, jonka haihtumisnopeutta ja -tasaisuutta tutkittiin esilämmityksen aikana silmämääräisesti.

### 8.3 Profilointilaitteisto

Jotta lämpötilat juotoksessa saadaan säädettyä kohdilleen, tarvitaan profilointilaitteistoa, jolla pystytään tallentamaan lämpötiloja juotosprosessin eri vaiheissa. Profilointilaitteisto käsittää yleensä dataloggerin, lämpösuojan dataloggerille, termopareja sekä termoparien kiinnittämiseen tarvittavat välineet. Profilointilaitteet voidaan jakaa kahteen kategoriaan: niihin, jotka näyttävät mittaustulokset reaaliaikaisina, ja niihin, jotka tallentavat tiedot muistiinsa, jolloin tietoja voidaan tarkastella myöhemmin tietokoneella. Tässä työssä käytettiin tallentavaa dataloggeria.

Lämpötilamittaukset aloitetaan kiinnittämällä lämpötila-anturit eli termoparit eri kohtiin piirilevylle ja komponentteihin, joista dataloggeri tallentaa lämpötila-arvoja muistiinsa. Termoparien kiinnityskohdiksi valitaan yleensä eri lämpömassan omaavat komponentit, jotta saavutettaisiin tasainen lämpöjakauma komponenteissa. Dataloggeri tarvitsee suojaan lämpösuojausta, koska se kulkeutuu piirilevyn mukana juotosuunin läpi. Mittausten jälkeen dataloggerin mitaamat lämpötilat näytetään joko reaaliaikaisina tai ladataan myöhemmin tietokoneelle. Mittausten perusteella voidaan muuttaa juotuskoneen parametreja ja saada juotosprofiili halutuksi.

### 8.3.1 Datapaq 9000 -dataloggeri

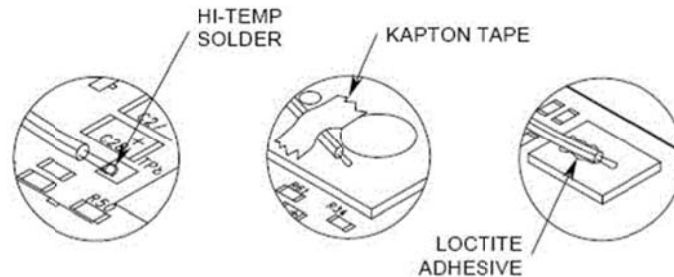
Juotosprosessin lämpötilojen tallennukseen käytettiin Turun ammattikorkeakoulun Datapaq 9000 -sarjan kuusikanavaista dataloggeria, joka soveltuu reflow- ja aaltojuotuskoneiden lämpöprofiilien luomiseen. Dataloggerin keräämiä tietoja tarkasteltiin Datapaqin tietokoneohjelmistolla, jolla saatiin kuvaaja juotosprosessin lämpötiloista.

### 8.3.2 Termoparit

Termoparit ovat antureita, joita käytetään lämpötilan mittaamiseen. Termoparien toiminta perustuu Seebeckin ilmiöön, jossa kahden eri metallin liitoksessa syntyy lämpötilasta riippuva jännite. Termoparit mittaavat lämpötilan johtojen liitoskohdasta, joka on yleensä punottu tai hitsattu yhteen. Termoparit ovat halpoja ja pitkälle standardoituja ja niillä on laaja lämpötila-alue. Toisaalta termoparit ovat melko epätarkkoja yltäen vain 0,5 °C:n tarkkuuteen. Eniten käytetään niin kutsuttua K-tyyppin termoparia, jota myös tässä työssä käytettiin. K-tyyppin termopareissa positiivinen johdin on nikkeli-kromiseosta ja negatiivinen johdin nikkeli-alumiiniseosta. [15]

Termoparien kiinnittämiseen piirilevylle voidaan soveltaa useaa eri menetelmää (Kuva 18). Suositeltavin menetelmä on termoparien juottaminen korkealämpöisellä juotteella. Juotteen sulamislämpötilan tulee olla selvästi juotosprofiilin huippulämpötilaa korkeampi ja juotetta tulee käyttää hyvin vähän. Toisessa menetelmässä termoparin liitoskohtaan sivellään lämpöä johtavaa tahnaa, jonka jälkeen termoparit kiinnitetään piirilevyn lämpöä kestäväällä polyamiditeipillä (kapton-teippi). Menetelmä on helppo ja nopea ja soveltuu useimpiin kohteisiin. Kolmantena kiinnitysmenetelmänä voidaan käyttää lämpöä kestävää liimaa. Liima kuitenkin johtaa huonosti lämpöä ja on epäluotettavampi tapa kuin edellä mainitut kiinnitystavat. Parhaaseen tulokseen

päästään kuitenkin, jos termoparit pystytään kiinnittämään piirilevyyn mekaanisesti ilman edellä mainittuja kiinnitystapoja, esim. puristamalla juotospinnan ja komponentin väliin. [15] Tässä tapauksessa termoparien kiinnittämiseen käytettiin kapton-teippiä.



**Kuva 18** Termoparien kiinnitystapoja [15]

#### 8.4 Tulokset

Esilämmittimen tuottama lämpötila saatiin säätymään noin 80 °C–180 °C muuttamalla puhaltimen nopeutta sekä säätämällä kierrätettävän ja ulkoa ohjattavan ilman suhdetta. Lyijytön prosessi vaatii piirilevyn esilämmittämisen vähintään sataan asteeseen, joten lämmitystehon pitäisi riittää hyvin. Suurin lämpötila, jonka esilämmitin kykeni tuottamaan, oli yli 180 °C, ja se saavutettiin käyttämällä pelkkää ilman kierrätystä sekä pitämällä puhaltimen nopeus mahdollisimman korkeana. Lämpötilan saavuttamiseksi esilämmittimen päällä oli käytettävä kansiosaa. Lyijyttömälle prosessille sopiva esilämmityslämpötila (105–120 °C) saatiin aikaiseksi käyttämällä puhallinta noin puolella teholla ja avaamalla hieman ilmanoton säätölevyä.

Kun esilämmittimelle oli löydetty sopivat arvot, päästiin testaamaan fluksin haihtumista piirilevyn pinnalta. Fluksin haihtumista testattiin eri lämpötiloilla ja puhallinnopeuksilla, ja lopputulosta arvioitiin silmämääräisesti. Puhalluksen voimakkuudella todettiin olevan suurempi merkitys fluksin haihtumisen kannalta kuin lämpötilalla. Paras lopputulos saavutetaan kuitenkin yhdistämällä riittävä lämmitys ja ilmavirtaus toisiinsa. Säädettävän puhallinnopeuden ansiosta fluksin haihtumisen tehokkuus parani huomattavasti vanhaan esilämmittimeen verrattuna.

## 9 YHTEENVETO

Tässä opinnäytetyössä rakennettiin Turun ammattikorkeakoulun elektroniikkatuotannon laboratoriossa käytettävälle aaltojuotokoneelle uusi esilämmitin käyttäen pohjana vanhaa, harjoitustyönä rakennettua lämmitintä. Tavoitteena oli korjata vanhassa lämmittimessä havaitut puutteet, jotka liittyivät tehottomaan ja epätasaiseen ilmavirtaukseen sekä heikkoon lämmitystehtävään.

Työ osoitti, että aaltojuotoksen lopputulokseen voidaan vaikuttaa merkittävästi oikeilla esilämmityksen säädöillä sekä esilämmittimen ja juotokoneen rakenteen oikeaoppisella suunnittelulla.

Saavutettujen tulosten valossa esilämmittimen säädettävyys ja tehokkuus paranivat merkittävästi portaattoman nopeudensäädön ja ilmankierrätysratkaisujen ansiosta. Erityisesti piirilevyyn kohdistuvan ilmavirtauksen voimakkuutta ja tasaisuutta saatiin parannettua melko paljon. Lämpötilaa voidaan helposti muuttaa säätämällä puhaltimen nopeutta sekä muuttamalla ilmanotokanavan säätölevyn asentoa. Uusi esilämmitin mahdollistaa piirikorttien nopeamman lämmittämisen sekä tehokkaamman fluksin haihtumisen piirilevyiltä. Saavutetut tulokset näkyvät lähinnä piirikortin läpimenoajan lyhenemisellä sekä juotoslaadun parantumisella, koska kuljetinnopeutta voidaan nostaa eikä fluksia jää levyille yhtä paljon kuin ennen.

Esilämmitin ei vielä kukaan vastannut täysin odotuksia, minkä takia jatkokehittely saattaa tulla tarpeeseen. Esilämmittimen lämmöntuotokkyky voisi olla parempi, ja se voitaisiin saavuttaa korvaamalla kiuasvastukset tehokkaammilla lämmönlähteillä tai tehostamalla ilman kierrätystä. Olisi myös hyvä, jos lämmitintä voisi ohjata aaltojuotokoneen alkuperäisillä säätimillä, koska nyt vastuksiin kytketään virta juotokoneen omista säätimistä, kun taas puhallinta ohjataan erillisillä säätimillä.



## LÄHTEET

- [1] Reid, K., Indiana University Purdue University Indianapolis, "Wave Soldering" [www-dokumentti] saatavilla: [http://www.iupui.edu/~ecet360/lesson14\\_wave/wavenotes.html](http://www.iupui.edu/~ecet360/lesson14_wave/wavenotes.html) (Luettu 16.10.2011)
- [2] Strauss, R., "SMT Soldering Handbook", Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford 1998
- [3] Wikström, Y., "Aaltojuotosprosessin saannon parantaminen" [www-dokumentti] saatavilla: [https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/15255/Wickstrom\\_Yngvar.pdf](https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/15255/Wickstrom_Yngvar.pdf) (Luettu 6.11.2011)
- [4] Precht, M., "Soldering Processes And Equipment", John Wiley & Sons, Inc. New York 1993
- [5] Tarr, M., The University of Bolton School of Built Environment & Engineering, "Wave soldering" [www-dokumentti] saatavilla: [http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0225\\_wave](http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0225_wave) (Luettu 16.10.2011)
- [6] Khandpur, R. S., "Printed Circuit Boards: Design, Fabrication and Assembly", McGraw-Hill Professional Publishing, Blacklick, OH, USA 2005
- [7] Alatalo, M., Bernhardt E., Havia E., Montonen H., Elektroniikan 3K-tehdas, "Comparing SAC and SnCuNi Solders in Lead-Free Wave Soldering Process" [www-dokumentti] saatavilla: [http://www.3ktehdas.com/uutiset/Next\\_05.pdf](http://www.3ktehdas.com/uutiset/Next_05.pdf) (Luettu 23.10.2011)
- [8] Wikström, Y., "Aaltojuotoskoneen ominaisuuksia", [www-dokumentti] saatavilla: <https://elektroniikka.turkuamk.fi/7050030/osa14/smd14.html> (Luettu 23.10.2011)
- [9] Shea, C., Arora, S., Brown, S., ALPHA – A Cookson Electronics Company, "Selection of Wave Soldering Fluxes for Lead-Free Assembly" [www-dokumentti] saatavilla: [http://alpha.cooksonelectronics.com/leadfree/pdfs/Selection of Wave Soldering Fluxes for Lead Free Assembly.pdf](http://alpha.cooksonelectronics.com/leadfree/pdfs/Selection%20of%20Wave%20Soldering%20Fluxes%20for%20Lead%20Free%20Assembly.pdf) (Luettu 7.11.2011)
- [10] TutorialsWeb, "SMT Components & Assembly" [www-dokumentti] saatavilla: <http://www.tutorialsworld.com/smt/smt.htm> (Luettu 7.11.2011)
- [11] Cullen, D., MacDermid Inc., "Printed Circuit Board Surface Finishes", [www-dokumentti] saatavilla: [http://www.accessengineeringlibrary.com/mghpdf/0071588264\\_ar032.pdf](http://www.accessengineeringlibrary.com/mghpdf/0071588264_ar032.pdf) (Luettu 24.10.2011)
- [12] Suominen, A., "Lyijyttömän aaltojuotosprosessin lämpökäyttäytyminen" [www-dokumentti] saatavilla: [https://elektroniikka.turkuamk.fi/workshop/\\_bin/download.asp?hID=207](https://elektroniikka.turkuamk.fi/workshop/_bin/download.asp?hID=207) (Luettu 31.10.2011)

[13] Wikipedia "Taajuusmuuttaja", [www-dokumentti] saatavilla:  
<http://fi.wikipedia.org/wiki/Taajuusmuuttaja> (Luettu 26.10.2011)

[14] Tampereen teknillinen korkeakoulu (TTKK), "SÄHKÖVOIMATEKNIikkaOPUS", [www-dokumentti] saatavilla: [http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt\\_opus/10sahkokoneet\\_1osa.pdf](http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf) (Luettu 27.10.2011)

[15] Pietiko Oy, "Termopari lämpötila-anturina" [www-dokumentti] saatavilla:  
<http://www.pietiko.fi/mittarikirjallisuus/Termopari.pdf> (Luettu 7.11.2011)