

Atte Korkia-Aho

# **Polttoleikkauksen nopeuden optimointi Taguchi- menetelmällä**

Opinnäytetyö

Kevät 2016

SeAMK Tekniikka

Kone- ja tuotantotekniikan tuotanto-ohjelma

SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

## Opinnäytetyön tiivistelmä

Koulutusyksikkö: Tekniikan yksikkö

Tutkinto-ohjelma: Konetekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Kone- ja tuotantotekniikka

Tekijä: Atte Korkia-Aho

Työn nimi: Polttoleikkauksen nopeuden optimointi Taguchi-menetelmällä

Ohjaaja: Kimmo Kitinoja

Vuosi: 2016 Sivumäärä: 55 Liitteiden lukumäärä:0

---

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia, kuinka Taguchi-menetelmää sovelletaan polttoleikkauksessa. Ensimmäisenä tavoitteena oli nostaa polttoleikkauksenopeutta huonontamatta pinnanlaatua. Toisena tavoitteena oli optimoida polttoleikkauksessa käytettävät leikkauskaasut ja etsiä sieltä mahdollisia säästöjä. Työssä laadittiin myös polttoleikkauksparametritaulukko.

Taguchi-menetelmällä pystytään käsittelemään suuri määrä prosessiin vaikuttavia muuttujia, pienellä määrällä kokeita. Polttoleikkauksen pinnanlaatuun vaikuttavat kaikki polttoleikkauksparametrit, sekä ulkoiset häiriötekijät. Ulkoisia häiriötekijöitä ovat esimerkiksi leikattavan levyn lämpötila ja pinnassa oleva hilse. Taguchi-menetelmässä eniten aikaa kuluu parametrisuunnitteluvaiheeseen, koeappareiden mittaamiseen ja mittaustulosten analysointiin. Näin pystytään tekemään tarvittavat kokeet tuotannon ohella, eikä aikaa kulu paljon polttoleikkaamiseen ja oikeiden arvojen hakemiseen. Taguchi-menetelmä soveltuu hyvin polttoleikkauksen polttoleikkauksparametrien optimointiin, koska muuttujia on paljon ja leikkauspinnanlaatuun vaikuttaa monta tekijää yhtä aikaa.

Taguchi-menetelmällä saaduilla optimiarvoilla saatiin nostettua polttoleikkauksenopeutta huonontamatta leikkauspinnanlaatua. Leikkauskaasun ja lämmityshapen paineet pysyivät samalla tasolla kuin mitä ne olivat ennen tutkimusta. Leikkaushapen painetta nostettiin, jolloin saatiin sula siirtymään hyvin leikkausrailosta pois. Polttoleikkauksenopeuden nosto ei lisännyt jäysteen määrää ja kappaleet lähtivät hyvin irti levystä, joten kappaleiden jälkikäsitteilyyn ja levyn purkamiseen ei kulu ylimääräistä aikaa.

Avainsanat: Taguchi-menetelmä, polttoleikkaus, polttoleikkauksparametrit, ortogonaalimatriisi, S/N-suhde, optimointi

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

## Thesis abstract

Faculty: School of Technology

Degree programme: Mechanical Engineering

Specialisation: Mechanical and Production Engineering

Author: Atte Korkia-Aho

Title of thesis: Optimization of flame cutting parameters using the Taguchi-method

Supervisor: Kimmo Kitinoja

Year: 2016      Number of pages: 55      Number of appendices: 0

---

The purpose of this thesis was to find out how to use Taguchi-method in flame cutting. The first objective was to raise cutting speed and keep the quality of surface on the same level as it was before. The second objective was the optimizing of cutting gasses to get some savings. Also a table of cutting parameters was composed in this thesis.

Taguchi-method can handle at the same time many variables that have an effect on the process. That brings down the number of experiments. Cutting parameters and external problem factors affect surface quality. External problem factors can be, for example, the temperature of a plate or scale on a hot rolled steel surface. The most time-consuming parts in the Taguchi-method are parameter design, getting results of the samples and analyzing the results. Therefore, all necessary tests can be run along with the production and cutting and finding the right parameters will not take so much time. Taguchi-method can be used for the parameter optimization of flame cutting because there are many variables and different factors have an effect on the surface of cutting.

The optimal values provided by the Taguchi-method enabled the raising of the cutting speed without impairing the cutting surface. The pressures of the cutting gas and heating oxygen were kept at the same level as they were before the study. The pressure of the cutting oxygen was raised to make the melted steel run out of the kerf. The raising of the cutting speed did not increase the quantity of slag at the bottom of the kerf and thus the pieces could be easily detached from the plate. Therefore, post-processing of the pieces does not take extra time.

Keywords: Taguchi-Method, flame cutting, flame cutting parameters, orthogonal matrix, S/N ratio, optimization

## SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä.....	1
Thesis abstract.....	2
SISÄLTÖ.....	3
Kuvio- ja taulukkoluetelo.....	5
<b>1 JOHDANTO</b> .....	<b>8</b>
1.1 Työn tausta .....	8
1.2 Työn tarkoitus ja tavoitteet .....	8
1.3 Työn rajaus .....	8
1.4 Yritysesittely.....	9
<b>2 POLTTOLEIKKAUS</b> .....	<b>11</b>
2.1 Leikkausvirheet ja leikkauspinnanlaatu .....	12
2.2 Polttoleikkaukone .....	14
2.3 Leikkauskaasut .....	15
<b>3 TAGUCHI-MENETELMÄ</b> .....	<b>17</b>
3.1 Taguchi-filosofia.....	17
3.2 Systemisuunnittelu.....	18
3.3 Parametrisuunnittelu .....	18
3.3.1 Ortogonaalimatriisi.....	20
3.3.2 Signaali-kohinasuhde.....	21
3.4 Toleranssisuunnittelu .....	22
<b>4 STANDARDIN SFS EN 1090-2 +A1 SOVELTAMINEN</b>	
<b>POLTTOLEIKKAUKSESSA</b> .....	<b>23</b>
4.1 Koekappale .....	23
4.2 Kovuuden arvo.....	23
4.3 Nimellimitat.....	24
4.4 Profiilinsyvyys .....	25
4.5 Kohtisuoruus .....	25
4.6 Mittausvälineet .....	27
4.6.1 Kovuuden arvo.....	28
4.6.2 Nimellimitat .....	29

4.6.3	Profiilinsyvyys .....	29
4.6.4	Kohtisuoruus .....	30
5	<b>TAGUCHI-MENETELMÄN SOVELTAMINEN</b>	
	<b>POLTTOLEIKKAUSKONEELLA .....</b>	<b>31</b>
5.1	Systeemisuunnittelu .....	32
5.2	Parametrisuunnittelu .....	32
5.2.1	Ohjaustekijät ja niiden tasot .....	33
5.2.2	Matriisin valinta .....	34
5.2.3	Ohjaustekijöiden sijoitus matriisiin .....	35
5.3	Toleranssisuunnittelu .....	35
5.4	Mittapöytäkirja .....	36
6	<b>TULOKSET .....</b>	<b>37</b>
6.1	Mittaustuloksen levynpaksuudelle 25 mm .....	37
6.1.1	Sn-suhteen laskenta .....	38
6.1.2	Optimiarvot .....	39
6.1.3	Konfirmaatiokokeet .....	40
6.2	Mittaustulokset levynpaksuudelle 40 mm .....	41
6.2.1	S/N-suhteen laskenta .....	42
6.3	Mittaustulokset levynpaksuudelle 50 mm .....	43
6.3.1	S/N-suhteen laskenta .....	43
6.3.2	Optimiarvot .....	45
6.3.3	Konfirmaatiokokeet .....	45
6.4	Mittaustulokset levynpaksuudelle 100 mm .....	46
6.4.1	S/N-suhteen laskenta .....	47
6.4.2	Optimiarvot .....	48
6.4.3	Konfirmaatiokokeet .....	48
6.5	Taguchi menetelmän soveltuminen polttoleikkaukseen .....	49
7	<b>YHTEENVETO JA POHDINTA .....</b>	<b>51</b>
	<b>LÄHTEET .....</b>	<b>54</b>

## Kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuvio 1 Polttoleikkaus varusteet. (Galvery & Marlow 2001, 34.).....	12
Kuvio 2 Leikkaussuihku. (Lepola & Makkonen 2001, 308.).....	13
Kuvio 3 Thermcut polttoleikkauskone. ....	15
Kuvio 4 Tuotteen tai prosessin optimointi malli. (Karjalainen 1999, 49). ....	19
Kuvio 5 Esimerkki koejärjestelystä. (Karjalainen 1999, 69.).....	21
Kuvio 6 Profiilinsyvyyden keskiarvo Rz5. (SFS-EN ISO 9013. 2003, 32.) .....	25
Kuvio 7 Kohtisuoruuden määrittäminen. (SFS-EN ISO 9013. 2003, 24.) .....	26
Kuvio 8 Kohtisuoruus- tai kaltevuustoleranssi, u. (SFS-EN ISO 9013. 2003, 30.)	27
Kuvio 9 Kovuusmittari. (TeknoNDT. 2015.).....	29
Kuvio 10 Pinnankarheusmittari. (Linna Trade.) .....	30
Taulukko 1 Vastetaulukko. (Karjalainen 1999, 70.).....	22
Taulukko 2 Kovuuden suurimmat sallitut arvot (HV 10). (SFS-EN 1090-2 + A1. 2012,33).....	24
Taulukko 3 Nimellismittojen sallitut eromitat toleranssiluokalle 2. (SFS-EN ISO 9013. 2003, 36.).....	24
Taulukko 4 Profiilinsyvyyden laskenta. (SFS-EN ISO 9013. 2003, 28.) .....	25
Taulukko 5 Mitat $\Delta a$ . (SFS-EN ISO 9013. 2003, 24.) .....	26
Taulukko 6 Kohtisuoruus- tai kaltevuustoleranssi, u. (SFS-EN ISO 9013. 2003, 28.).....	27
Taulukko 7 Tarkkuusmittauslaitteet. (SFS-EN ISO 9013. 2003, 22.) .....	28

Taulukko 8 Yleismittauslaitteet. (SFS-EN ISO 9013. 2003, 22.) .....	28
Taulukko 9 Sisämatriisi. (Karjalainen 1999, 91.) .....	34
Taulukko 10 Sisä- ja ulkomatriisi. (Karjalainen 1999, 68.) .....	35
Taulukko 11 Mittapöytäkirja. ....	36

## Käytetyt termit ja lyhenteet

<b>S/N-suhde</b>	S/N-suhde eli signaali-kohinasuhde tulee elektroniikan ja radiotekniikan alalta. Taguchin hävikkifunktio on suoraan sidoksissa S/N-suhteeseen. Mitä suuremmaksi suhde saadaan, sitä pienempi hävikki on. (Karjalainen 1999, 63-69.)
<b>Sinkopuhallus</b>	Leikattavan levyn pintakäsittelyä, jossa hiekka puhalletaan kovalla paineella levyn pintaan epäpuhtauksien poistamiseksi.
<b>Pinnankarheus</b>	Pinnoille annetaan pinnankarheuden arvo, jonka suuruus riippuu pinnan käyttöympäristöstä. Esimerkiksi pinnoissa, joissa tiiviste hankaa teräksen pintaa, pitää olla pieni pinnankarheuden arvo.
<b>Profiilinsyvyys</b>	Profiilinsyvyys $R_z$ on yksi pinnankarheuden suureista, jolla määritetään pinnalle pinnankarheus. Profiilinsyvyys saadaan laskemalla keskiarvo pinnasta mitatuista korkeuseroista. Profiilinsyvyyden yksikkö on $\mu\text{m}$ . (Sandvik Coromat.)
<b>Kohtisuoruus</b>	Kohtisuoruusarvo $u$ saadaan laskemalla leikkauspinnan korkeimman ja matalimman kohdan erotus.
<b>Ortogonaalimatriisi</b>	Ortogonaalimatriisi käytetään Taguchi-menetelmässä koesuunnitteluun. Ortogonaalimatriisien avulla pystytään käsittelemään useaa muuttujaa kerralla, pienellä määrällä kokeita. (Karjalainen 1999, 55.)
<b>Hilse</b>	Hilseellä tarkoitetaan kuumavalssauksessa levyn pintaan syntyvää ohutta kerrosta. Hilse lähtee irti levyn pinnasta lohkeilemalla, joka vaikeuttaa polttoleikkausta.



# 1 JOHDANTO

## 1.1 Työn tausta

Tällä hetkellä yrityksessä polttoleikkaajille on määritelty polttoleikkausnopeuden arvo, jota he käyttävät. Kaikki muut leikkausparametrit säädetään sen mukaan, miten leikkaajat ovat ne parhaaksi kokeneet. Tämä mahdollistaa sen, että leikataan suuremmilla kaasujen paineilla kuin tarvitsisi. Eri suuttimille ja levyn paksuuskille löytyy ohjearvoja laitevalmistajalta. Näistä arvoista ei kuitenkaan käytetä kuin lämmityshapen painetta. Varsinkin taulukon leikkausnopeus on huomattavasti suurempi kuin millä ennen opinnäytetyötä leikattiin.

## 1.2 Työn tarkoitus ja tavoitteet

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutustua Taguchi-menetelmään ja kuinka sitä sovelletaan polttoleikkaukseen. Ensimmäisenä tavoitteena oli lisätä nykyistä leikkausnopeutta. Se pitää toteuttaa kuitenkin niin, että säätöjen jälkeen polttoleikatut kappaleet ovat standardien määrittelemissä rajoissa. Toisena tavoitteena oli optimoida leikkauskaasut ja etsiä sieltä mahdollisia säästöjä. Opinnäytetyön kolmantena tavoitteena oli muodostaa polttoleikkaajille leikkausparametritaulukko, jota voidaan hyödyntää leikatessa polttokoneella.

## 1.3 Työn rajaus

Yrityksessä polttoleikataan tällä hetkellä kolmella eri koneella. Suurin levyn paksuus, jota pystytään leikkaamaan, on 250mm. Skaala on hyvin laaja, joten sovittiin, että optimoidaan vain yleisimmät yrityksessä leikattavien levyjen paksuudet (25mm, 40mm, 50mm ja 100mm). Materiaalina tulee olemaan S355K2+N teräs sinkopuhallettuna. Tässä työssä keskitytään optimoimaan ainoastaan Teknohaus P4000 polttoleikkaukseen leikkausparametrit, joten muut leikkaukoneet jätetään huomiotta.

Materiaalin laatuja ja paksuuksien valintaan vaikutti suoraan niiden menekki. Suoritettavat kokeet tehdään tuotannon ohella, joten harvemmin leikattavia laatuja ja paksuuksia ei käytetä. Laadun valintaan vaikutti myös se, että S355K2+N levy on helppoa leikata, joten tämä myös helpottaa optimointia. Levyt sinkopuhalletaan, jolloin saadaan levyn pinnalta epäpuhtaudet pois ja näin optimointiprosessissa on vähemmän polttoleikkaukseen vaikuttavia muuttujia.

#### **1.4 Yritysesittely**

Ferrum Steel Oy on vuonna 2005 perustettu osakeyhtiö, jonka toimiala on teräksen esikäsittely. Yrityksen toiminta perustuu asiakaslähtöisyyteen ja tarkoituksena onkin tehdä tuotteet asiakkaan haluamaan valmistusasteeseen. Ferrum Steel Oy pystyy toimittamaan tuotteet nopeasti ja joustavasti, jolloin asiakkaan oma tuotannon hallinta helpottuu. Vahvuus alueena onkin mahdollisuus tehdä valmiita kokoonpanoja. Laajan alihankinta verkoston avulla pystytään tekemään pintakäsittelyä, koneistamaan, särmäämään, mankeloimaan sekä hitsaamaan suuretkin osat ja kokoonpanot. (Ferrum Steel Oy, viitattu 13.11.2015.)

Yritys aloitti toimintansa Ilmajoella viiden henkilön kanssa. Aluksi oli kaksi leikkaavaa konetta sekä porakoneita. Hyvin pian kävikin selväksi, että toimitilat jäävät pieniksi ja vuonna 2007 päästiin muuttamaan Seinäjoen Kapernaumiin uusiin toimitiloihin. Tällöin yrityksessä työskenteli 15 henkilöä. Yrityksen sijoittuminen Seinäjoelle tapahtui, koska suurten kuljetusyhtiöiden terminaalit sijaitsevat lähellä ja alueella on hyvät pintakäsittelypalvelut sekä tukkukaupat. Tuotantotilojen laajennusta alettiin suunnitella vuonna 2009, koska huomattiin laserleikkauksen tarve. Vuonna 2010 saatiinkin laajennus valmiiksi, jolloin hankittiin laserleikkaus-, polttoleikkaus-, jäysteenpoistokone ja lämpökäsittelyuuni. Tällöin työntekijöitä olikin jo noin 40 henkilöä. Yrityksen jatkaessaan kasvuaan tarvittiin lisää tilaa. Syksyllä 2010 ostettiin läheinen konepajakiinteistö, jolloin pystyttiin lisäämään leikkauskapasiteettia ja rakentamaan sinkopuhalluslinja. (Ferrum Steel Oy, viitattu 13.11.2015.)

Aluksi yrityksen asiakkaat keskittyivät vanhan Vaasan läänin alueelle. Seinäjoelle muuton jälkeen pystyttiin valmistamaan pitemmälle jatkojalostettuja tuotteita, joten

nykyään asiakkaat ovat ympäri Suomea. Tällä hetkellä yrityksessä työskentelee n.65 Henkilöä ja liikevaihto oli vuonna 2014 n. 10,7 miljoonaa euroa. Lähitulevaisuuden hankintoja tulee olemaan uusi laserleikkauskone, sinkopuhalluslinja ja varastohalli. Yrityksen toiminta perustuu standardeihin ISO 9001, ISO 14001 ja SFS-EN 1090, joka on osoitus tehokkaasta ja laadukkaasta toiminnasta. (Ferrum Steel Oy, viitattu 13.11.2015.)

## 2 POLTTOLEIKKAUS

Tässä osiossa käydään läpi mitä polttoleikkaus on ja kuinka se tapahtuu. Tarkastellaan myös leikkauspinnanlaatuun vaikuttavia tekijöitä ja mistä leikkausvirheet johtuvat. Lopuksi esitellään työssä käytettävää polttoleikkauskonetta.

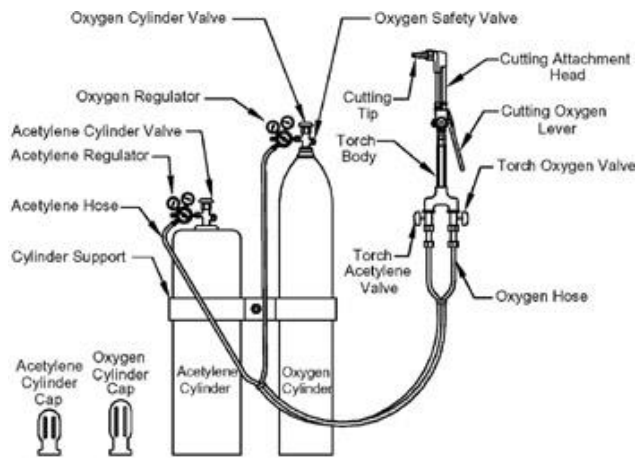
Polttoleikkauksessa teräs lämmitetään lähelle sulamispistettä ja poltetaan sitä puhtaassa hapessa. Happisuihku poistaa leikkausrailoista metallioksidin hapen liike-energian avulla (Mattila & Lakso 1997, 2). Palamisreaktiosta ei kuitenkaan synny niin paljon lämpöä, että se yksin pystyisi ylläpitämään reaktiota. Tämän takia tarvitaan lisälämpöä, jota saadaan esikuumennusliekistä. (Hirvonen ym. 1976, 77.)

Polttoleikkaus on mahdollista silloin kun metallin sulamispiste on korkeampi kuin sen syttymislämpötila. Metallin on myös johdettava huonosti lämpöä ja sen tulee palaa puhtaassa happisuihkussa (Männikkö ym. 1990, 10). Polttoleikkaus soveltuu parhaiten seostamattomalle teräkselle. Edellä mainittujen tekijöiden takia polttoleikkaaminen ei ole mahdollista esimerkiksi kuparille ja alumiinille. (Lepola & Makkonen 2001, 303-304.)

Polttoleikkaus aloitetaan kumentamalla aloituskohta syttymislämpötilaan, jonka jälkeen kuumennettuun kohtaan päästetään happisuihku. Leikkausnopeus määräytyy sen mukaan kuinka hyvin palaminen tapahtuu leikkausrailon alaosassa. Liian suuren leikkausnopeuden huomaa siitä, että palaminen railon alaosassa on jäljessä verrattuna yläosaan. Väärä leikkausnopeus huonontaa leikkausjälkeä. Polttoleikkaus lopetetaan katkaisemalla leikkaushapen virtaus. (Lepola & Makkonen 2001, 306-307.)

Kuviossa 1 on esitetty polttoleikkaukseen tarvittavat välineet. Tarvitaan kaksi kaasupulloa, jossa toisessa on happi ja toisessa polttokaasu. Paineensäätimet (Regulator), joilla säädetään kaasujen paineet oikeaksi leikkauspaksuudesta riippuen. Venttiilit (Valve), joilla säädetään kaasujenvirtausta polttimessa. Lisäksi tarvitaan leikkauspää (Cutting Attachment head), jonka tarkoituksena on ohjata lämmityshappi, polttokaasu ja leikkaushappi suuttimelle (Cutting Tip). Leikkaushappiventtii-

lillä (Cutting Oxygen Lever) päästetään leikkaushappi kuumennettuun kohtaan, jolloin saadaan puhkaistua levy.

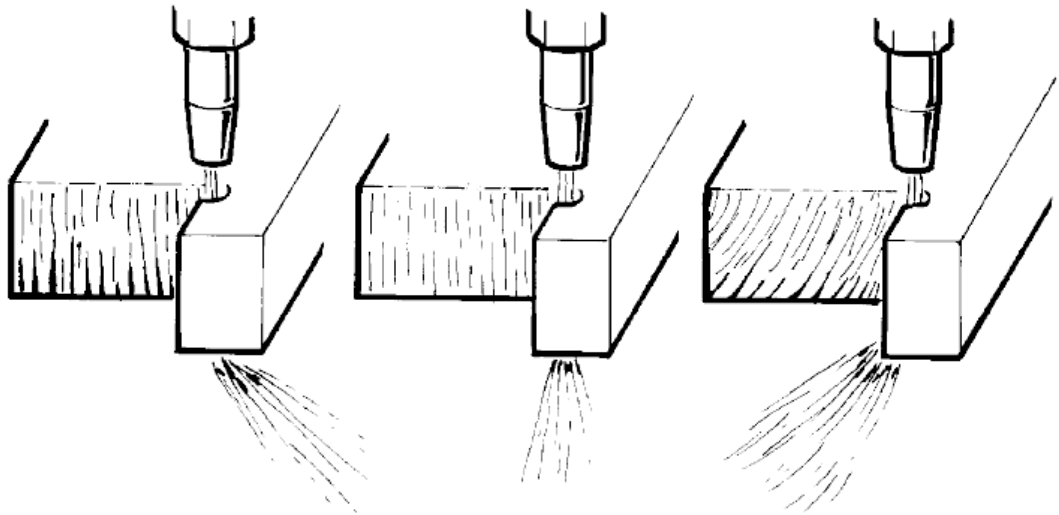


Kuvio 1 Polttoleikkaus varusteet. (Galvery & Marlow 2001, 34.)

## 2.1 Leikkausvirheet ja leikkauspinnanlaatu

Leikkauspinnanlaatuun vaikuttavat tekijät voidaan karkeasti jakaa kolmeen ryhmään: polttoleikkaajan virheet, huonokuntoiset laitteet ja väärin säädetyt paineet. Polttoleikkaajaan virheistä yleisimpiä virheitä on leikkausnopeus ja leikkauskorkeus. Huonokuntoisten laitteiden takia tapahtuvat laatuvirheet johtuvat yleensä laitteiden vähäisestä huollosta (Hirvonen ym. 1976, 79). Väärin säädetyt paineet vaikeuttavat läpileikkausta. (Lepola & Makkonen 2001, 308.)

Liian nopeasta leikkausnopeudesta aiheutuu ns. jättämä, jolloin leikattavan materiaalin palaminen yläosassa on edellä verrattuna alaosaan. Tästä johtuu myös leikkauksen jälkeen tulevien uurteiden taipuminen taaksepäin, jota on havainnollistettu kuvion 2 oikeanpuoleisessa kuvassa. (Mattila & Lakso 1997, 3.) Liian hidas leikkausnopeus aiheuttaa kuonan tarttumista ja syviä uria leikkauksen alaosaan. Myös kappaleen yläreunan sulaminen on yksi merkki liian hitaasta leikkausnopeudesta. Leikatessa hitaan leikkausnopeuden huomaa siitä, että levyn alareunassa oleva suihku taittuu eteenpäin. Tätä on havainnollistettu kuviossa 2 vasemmanpuoleisessa kuvassa. Sopivan leikkausnopeuden tunnistaa tasaisesta pinnasta ja suorassa olevista leikkausurteista. Kuviossa 2 keskimmaisesta kuvasta näet esimerkiksi oikeasta leikkausnopeudesta. (Lepola & Makkonen 2001, 308.)



Kuvio 2 Leikkaussuihku. (Lepola & Makkonen 2001, 308.)

Leikkaaja voi helposti pitää suutinta liian kaukana leikattavasta levystä, jolloin leikkausura levenee ja sulattaa kappaleen yläreunan särmät. Tämä johtuu levyn pinnan laajasta lämpenemisestä. Yläreunan sulamista aiheuttaa myös, kun suutin on liian lähellä levyä. Tämän aiheuttaa lämmitysliekin voimakas kuumennus. (Männikkö ym. 1990, 27-28.)

Leikkauslaitteiden kunnosta on pidettävä hyvää huolta. Vuotavat venttiilit ja kaasuputket aiheuttavat räjähdysvaaran. Painemittareiden on oltava kunnossa, koska tämä helpottaa paineiden säätöä eri ainepaksuuksille. Eniten virheitä leikattuun pintaan aiheuttaa likaiset suuttimet. Suuttimet tukkeutuvat helposti aloitusreikiä tehdessä, koska sulametalli roiskahtaa reiästä, jolloin se saattaa tukkia suuttimen. Niiden käyttöikä riippuukin suoraan siitä, kuinka usein tehdään aloitusreikiä. (Mattiila & Lakso 1997, 2.)

Leikkausnopeus ja kaasujen paineet kulkevat käsi kädessä, sillä mitä nopeampaa halutaan leikata, sitä suuremmat kaasujen paineet täytyy olla. Tämän takia paineet täytyy aina säätää leikkausnopeuden mukaan. Kaasujen paineiden arvot ja leikkausnopeuden määrittää suutinvalmistaja.

Liian voimakas leikkaushapen paine sulattaa kappaleen yläsärmää, koska suuri paine saa leikkaussuihkun levenemään. Pienellä leikkaushapen paineella on samanlainen vaikutus kuin liian suurella leikkausnopeudella. Tällöin läpi leikkautu-

mista ei ehdi kunnolla tapahtumaan ja se aiheuttaa uurteiden taipumisen pois päin leikkaussuunnasta. (Männikkö ym. 1990, 28.)

Yläsärmän sulamista aiheuttaa myös liian suuri kuumennusliekki. Tämä johtuu siitä, että leikkauskaasun ja lämmityshapen paineet on säädetty suureksi suhteessa leikkausnopeuteen, joka johtaa kappaleen liialliseen lämpenemiseen. Liian pienellä kuumennusliekillä leikkaaminen aiheuttaa katkonaisen leikkausjäljen ja pahimmillaan se voi aiheuttaa leikkauksen keskeytymisen. (Männikkö ym. 1990, 28.)

Leikkauspinnanlaadun määrittämiseen on monta erilaista suuretta ja niiden käyttö riippuu leikattavien kappaleiden käyttötarkoituksesta. Standardissa SFS-EN ISO 9013 on ohjeet termisen leikkauksen pinnanlaadun mittaamisesta ja määrittämisestä. Standardia on käsitelty tarkemmin osiossa 4, jossa selviää käytettävät suureet.

## **2.2 Polttoleikkaukone**

Koneellisella polttoleikkauksella saadaan tasalaatuisempaa leikkausjälkeä kuin käsivaraisella polttoleikkauksella. Tämä johtuu siitä, että koneet ovat numeerisesti ohjattuja, joten arvot pystytään säätämään aina samalla lailla jokaiselle materiaalille ja paksuudelle. Kuljetusnopeus ja suuttimen etäisyys levystä pystytään pitämään vakiona. Näin saadaan polttoleikkaajan tekemät leikkausvirheet karsittua pois ja saadaan parempi leikkauspinnanlaatu. (Lepola & Makkonen 2001, 310-311.)

Koneellisella polttoleikkauksella on monia etuja verrattuna käsivaraiseen polttoleikkaukseen. Leikkausjälki paranee ja leikkausnopeus lisääntyy tasaisen kuljetusnopeuden ja tarkasti ohjelmoidun leikkausradan ansiosta. Asennusajat vähenevät, koska koneelle määrätään levyn nollapiste, jolloin se tietää missä kohtaa levy on leikkauspöydällä. Tämän jälkeen ohjelmoidun leikkausradan avulla polttoleikkaukone pystyy leikkaamaan halutun muotoiset kappaleet levystä. Kaasunkulutus ja jälkityöstö vähentyvät, koska kaasunpaineet on optimoitu oikean suuruisiksi suhteessa leikkausnopeuteen. Lisäksi saadaan paremmin hyödynnettyä leikattava

levy leikkausradan ohjelmointiin tarkoitettujen ohjelmistojen avulla. (Männikkö ym. 1990, 41.)

Kuviossa 3 on työssä käytetty numeerisesti ohjattu Thermcut polttoleikkauskone, jolla pystytään polttoleikkaamaan 200 millimetriin asti. Suurin levyn leveys on 2500 millimetriä ja pituus 13000 millimetriä. Polttimia on viisi kappaletta, joka nopeuttaa leikkaamista huomattavasti, koska silloin saadaan useampi kappale irti samanaikaisesti. Tämä tuo haasteita leikkaamiseen, koska jokaisessa polttimessa pitää olla yhtä suuret kaasujen paineet, sekä aloituskohdat pitää saada lämpenemään samanaikaisesti.



Kuvio 3 Thermcut polttoleikkauskone.

### 2.3 Leikkauskaasut

Leikkaukseen käytettävän hapen puhtausaste tulisi olla vähintään 99,5 %. Hapessa olevat epäpuhtaudet hidastavat leikkausnopeutta, koska metalli palaa vain puhtaassa hapessa. Hapen puhtausasteen tipahtaessa 1 %:n, se hidastaa leikkausnopeutta n.20 %. Leikkausrailon alaosassa vaikutus on suurin, koska silloin leikkauksuihkuun on sekoittunut ilmasta ja leikattavasta teräksestä epäpuhtauksia.



Tämä näkyy jättämän kasvamisena leikkausrailon alaosassa. (Mattila & Lakso 1997, 5.)

Opinnäytetyön kokeissa käytetään polttokaasuna propaania. Propaanin etuja on sen halpa kilohinta ja suuri energiasisältö kun tarvitaan suuria lämpömääriä. Lisäksi propaania on hyvin saatavilla ja sitä toimitetaan myös säiliöihin. (Korkiakoski 2009, 18-20.)

### 3 TAGUCHI-MENETELMÄ

Tässä osiossa käydään läpi Taguchi-menetelmän teoriaa. Aluksi tarkastellaan Taguchi-filosofiaa eli miten Taguchi on ajatellut laadun sekä miten se aiheuttaa hävikkiä tuotteeseen ja tuotantoon. Tämän jälkeen perehdytään Taguchi-menetelmän kolmeen päävaiheeseen: systeemi-, parametri- ja toleranssisuunnitteluun.

Taguchi-menetelmä on optimointimenetelmä, joka on kehitetty tuote- ja prosessisuunnitteluun. Menetelmässä on hyödynnetty tilastotekniikkaa ja insinööritiedettä, joiden avulla saadaan aikaan tuloksia mahdollisimman pienellä määrällä kokeita. Puhutaan monimuuttujakokeista, joissa muutetaan useampaa muuttujaa kerralla ja näin saadaan kokeiden määrä huomattavasti vähäisemmäksi. Menetelmän on kehittänyt tohtori Genichi Taguchi. (Karjalainen 1999, 3-12.)

#### 3.1 Taguchi-filosofia

Taguchi-filosofiassa ajatellaan niin, että tuote aiheuttaa asiakkaalle hävikkiä kun sen ominaisuudet vaihtelevat. Asiakkaalle aiheutuva hävikki minimoidaan hyvällä suunnittelulla ja prosessiteknisin keinoin. Huono laatu johtuu 85 prosenttisesti tuotanto prosesseista ja 15 prosenttisesti työntekijöistä. Koko menetelmä ja tekniikat voidaan jakaa kolmeen ideaan: (Ranjit K 2010, 10-11.)

- Laatu suunnitellaan tuotantoon eikä sitä tarkastella enää tuotannossa
- Paras laatu saavutetaan kun minimoidaan ominaisuuksien vaihtelut. Tuotanto suunnitellaan niin, että se on immuuni hallitsemattomille ympäristötekijöille.
- Laatukustannukset eli hävikki mitataan toimintojen vaihteluna normaali tasosta ja hävikki mitataan koko tuotannosta.

Taguchin mielestä paras tapa parantaa laatua on suunnitella ja rakentaa se tuotannon sisälle. Laadun parantaminen alkaa tuotteen tai tuotannon työvaiheiden suunnittelusta ja kestää läpi koko valmistuksen. Tuotannon pitää olla niin vakaa,

että se on immuuni hallitsemattomille menetelmille ja ympäristötekijöille. (Ranjit K 2010, 10-11.)

Toisella idealla tarkoitetaan menetelmiä, joilla kehitetään laatua tuotannossa. Taguchin mielestä laatu on suunniteltujen parametrien vaihtelua tavoitearvosta. Mitä pienempi vaihtelu on, sitä parempaa laatua saadaan. (Ranjit K 2010, 11.)

Taguchin kolmannessa ideassa mitataan laatukustannuksia suunniteltujen parametrien vaihtelusta koko tuotannon ajalta. Laatukustannukset koostuvat hylätyistä kappaleista, viallisten tuotteiden korjailuista, tarkistuksista, palautetuista tuotteista, takuuseen vaihdetuista osista ja takuu palvelusta. Näiden kustannusten takia parametrit pitää olla hallinnassa. (Ranjit K 2010, 11.)

### **3.2 Systemisuunnittelu**

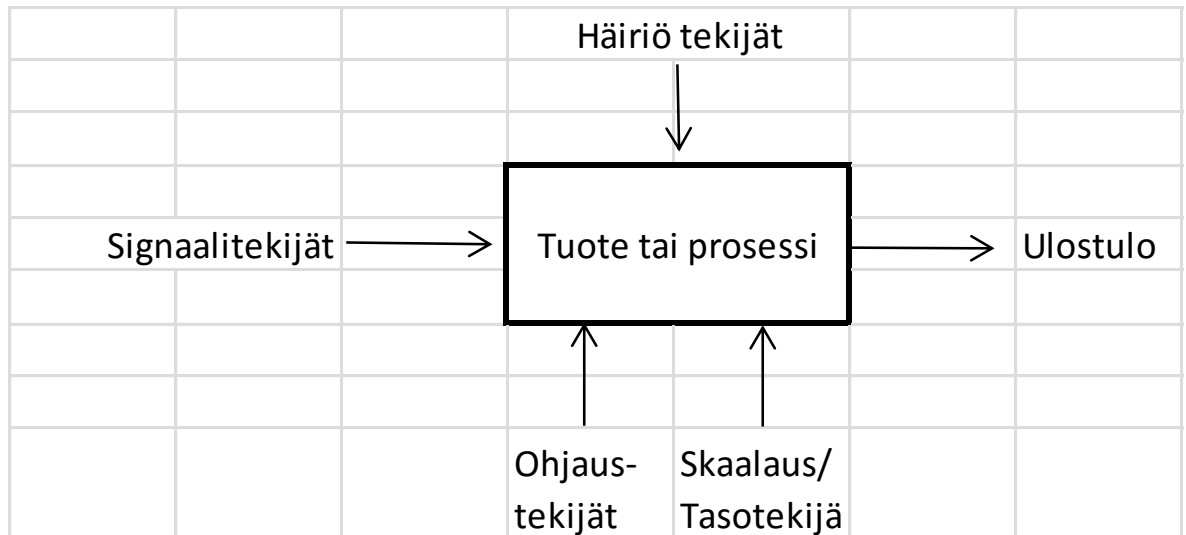
Systemisuunnittelulla tarkoitetaan tuotteen suunnittelua joka lähtee asiakkaiden tarpeista. Sillä selvitetään, minkälainen asiakkaan haluama tuote on ja kaikki erilaiset tuotekonseptit. Systemisuunnitteluun kuuluvat tieto viimeisimmistä teknologioista ja innovaatioista. Quality Function Deployment -menetelmää käytetään apuna suunnittelijan valintojen ohjaamisessa ja asiakkaan tarpeiden huomioon ottamisessa. Tämä tuotekehitysmenetelmä kuuluu Taguchi-menetelmään, vaikka Taguchi sitä ei ole kehittänytkään. (Karjalainen 1999, 42-44.)

Quality Function Deployment (QFD) on menetelmä ja matemaattinen työkalu. Menetelmällä tunnistetaan ja määritetään asiakkaan vaatimukset. QFD auttaa suunnittelijoita laittamaan tärkeysjärjestykseen toimenpiteitä, joilla parannetaan prosessia tai tuotetta niin, että ne vastaavat asiakkaan odotuksia. (Wang 2005, 51.)

### **3.3 Parametrisuunnittelu**

Parametrisuunnittelun tavoitteena on saavuttaa maksimaalinen suoritusarvo, minimoida häiriötekijät ja kustannukset niille ominaisarvoille, jotka ovat suunnittelijan valittavissa ja ohjattavissa, esimerkiksi asetuservat ja materiaalit. Etsimällä keskinäisvaikutuksia ohjaustekijöiden ja häiriötekijöiden väliltä, saadaan tuotteet kes-

täviksi häiriöitä vastaan ja pienennetään ominaisuuksien vaihtelua. Keskinäisvaikutus tekijää ei välttämättä löydy, mutta riittää kun löydetään parempi kombinaatio ohjaustekijöistä ja niiden asetus arvoista. Paremmalla kombinaatiolla saadaan häiriötekijöiden vaikutusta ja hävikin määrää pienemmäksi. Kuviossa 4 on esitelty optimointimalli tuotteelle tai prosessille. (Karjalainen 1999, 45.)



Kuvio 4 Tuotteen tai prosessin optimointi malli. (Karjalainen 1999, 49).

Ohjaustekijät ovat suunnittelijan valitsemissa parametriarvoja tuotteelle. Ohjaustekijöille voi olla useita arvoja, joita kutsutaan tasoiksi. Ohjaustekijöistä etsitään myös ne tekijät, joilla maksimoidaan ja säädetään tuotteen suoritusarvot. Näitä tekijöitä kutsutaan signaalitekijöiksi. Tasojen määrittämiseen vaikuttaa millaisia laatuominaisuuksia tuotteelle tai prosessille halutaan. Näiden tasojen määrittäminen on suunnittelijan vastuulla. Laatuominaisuudet jaetaan viiteen erilaiseen tyyppiin: (Karjalainen 1999, 45-48.)

- Ominaisarvo on paras. Tällä tarkoitetaan, että tähdätään johonkin tavoitearvoon mahdollisimman pienellä poikkeamalla.
- Pienempi on parempi. Tämä saavutetaan kun esimerkiksi tuote kuluu mahdollisimman vähän tai prosessi kuluttaa mahdollisimman vähän sähköä.
- Suurempi on parempi, silloin kun esimerkiksi tuotteelle saavutetaan mahdollisimman suuri lujuus tai prosessista saadaan mahdollisimman nopea.

- Attribuutti, jolla saadaan esimerkiksi hieno ulkonäkö tuotteelle tai prosessi on mahdollisimman yksinkertainen.
- Dynaaminen tarkoittaa, kun tehdään jotakin niin se vaikuttaa suoraan ulostuloon. Esimerkiksi painamalla auton kaasua saadaan nopeus muuttumaan.

Häiriötekijöitä ei voi ohjata, mutta ne vaikuttavat ulostuloon. Häiriötekijöiden määrä, sekä taso vaihtelevat tuotteiden ja olosuhteiden välillä. Nämä ovat niitä tekijöitä, jotka aiheuttavat tuotteelle tai prosessille vaihtelua eli hävikkiä. Häiriötekijöitä on kolmea erilaista tyyppiä, joihin pystytään vaikuttamaan eri tuotekehitysvaiheissa. (Karjalainen 1999, 48-50.)

- Ulkoisilla häiriöillä tarkoitetaan häiriöitä, jotka tulevat tuotteen tai prosessin ulkopuolelta. Häiriöitä ovat esimerkiksi ympäristöolosuhteiden vaihtelut tai inhimilliset virheet.
- Sisäiset häiriöt ovat tuotteen vanhenemista. Tuotteen myynti hetkellä kaikkien ominaisuudet ovat tavoitearvossa, mutta esimerkiksi vuoden kuluttua arvot ovat saattaneet muuttua. Prosessissa sisäiset häiriöt voivat olla esimerkiksi koneiden kulumista, jolloin kappaleiden mitat vaihtelevat.
- Tuotteen häiriöt johtuvat osien tai materiaalin materiaalivaihteluista. Samanlaisia osia tai materiaalia ei voida valmistaa, koska sisäiset häiriöt vaikuttavat prosessiin.

### 3.3.1 Ortogonaalimatriisi

Ortogonaalimatriiseja käytetään teollisuudessa, koska niillä saadaan luotettavia ja toistettavia tuloksia. Ortogonaalimatriisien edut tulevat parhaiten ilmi silloin, kun on suuri määrä tekijöitä, keskinäisvaikutuksia ja tasoja. Esimerkiksi, jos testataan 13 tekijän vaikutus kolmessa tasossa, tarvitaan kaikkien tekijöiden testaamiseen 1 594 322 koetta. Ortogonaalimatriisin avulla voidaan muuttaa useampaa tekijää jokaiseen kokeeseen, jolloin selvittää vain 27 kokeella. (Karjalainen 1999, 54-55.)

Taguchi-menetelmässä ortogonaalimatriisit voidaan jakaa sisä- ja ulkomatriiseihin. Sisämatriiseihin sijoitetaan ohjaustekijät, jotka eroteltiin häiriötekijöistä parametri-suunnittelun alussa. Ulkomatriiseihin sijoitetaan häiriötekijät. Kuviossa 5 on esitetty esimerkki koejärjestelystä, jossa A, B, C ovat ohjaustekijöitä ja K, L, M ovat häiriötekijöitä. Molempia tekijöitä on testattu kahdessa tasossa. Tällä koejärjestelyllä saadaan 16 eri tulosta. Ulkomatriisin ei välttämättä tarvitse olla ortogonaalinen matriisi, koska Taguchi-menetelmällä ei ohjata häiriöiden syitä. Tärkeintä on saada aikaan vaihtelua kokeiden aikana. Yksinkertaisin ulkomatriisi on, kun koetta toistetaan vähintään kaksi kertaa, jolloin saadaan vaihtelua tuloksiin. Mitä useamman kerran kokeita toistetaan, sitä luotettavammaksi tulokset tulevat. (Karjalainen 1999, 66-68.)

					M	1	2	2	1
					L	1	2	1	2
					K	1	1	2	2
	Nro	A	B	C					
	1	1	1	1		Y1	Y2	Y3	Y4
	2	1	2	2		Y5	Y6	Y7	Y8
	3	2	1	2		Y9	Y10	Y11	Y12
	4	2	2	1		Y13	Y14	Y15	Y16

Kuvio 5 Esimerkki koejärjestelystä. (Karjalainen 1999, 69.)

### 3.3.2 Signaali-kohinasuhde

Käsite signaali-kohinasuhde tulee elektroniikan ja radiotekniikan alalta. Taguchi laajensi käsitteen tarkoittamaan myös muita tekniikan ja palvelun aloja. Signaali-kohinasuhteella (S/N-suhde) mitataan tavoitearvon ja hajonnan suhdetta logaritmisena. Taguchin hävikkifunktio on suoraan sidoksissa S/N-suhteeseen. Mitä suuremmaksi suhde saadaan, sitä pienempi hävikki on. S/N-suhteita on kolmea erilaista tyyppiä, joista jokaiselle on annettu omat laskentakaavansa. (Karjalainen 1999, 63-69.)

- Suurempi on parempi.  $S/N = -10 \log (1/n \sum_i (1/Y_i^2))$ , jossa n on koetoistojen määrä ja  $y_1, y_2$  jne. ovat yhden kokeen tuloksia.

- Pienempi on parempi.  $S/N = -10\log(1/n \sum_i(Y_i^2))$
- Tavoitearvo on paras.  $S/N = 10\log(Y_{av}^2/s^2 - 1/n)$ , jossa  $Y_{av}$  on koetulosten keskiarvo,  $s$  on standardipoikkeama ja  $n$  on koetoistojen määrä.

Lauseke, jota käytetään, riippuu ominaisuudesta mitä tutkitaan ja mihin sillä pyritään. Ohjaustekijöille lasketaan S/N-vastetaulukko, kun S/N-suhteet on laskettu. Taulukossa 1 on vastetaulukko kuvion 5 koejärjestelylle. Vastetaulukkoon lasketaan arvot  $y_1$  ja  $y_2$ , jokaiselle ohjaustekijälle. Tämän jälkeen tarkastellaan, jokaisen ohjaustekijän tuloksien erotusta. Mikäli erotuksien tulos on suuri, niin silloin niillä ohjaustekijöiden tasoilla on suuri vaikutus S/N-suhteeseen. (Karjalainen 1999, 69-70.)

Taulukko 1 Vastetaulukko. (Karjalainen 1999, 70.)

	Tekijät		
Taso	A	B	C
1	$y_1$	$y_1$	$y_1$
2	$y_2$	$y_2$	$y_2$

### 3.4 Toleranssisuunnittelu

Toleranssisuunnittelua käytetään pienentämään vaihtelua, jos parametrisuunnittelulla ei pystytä sitä riittävästä tekemään. Toleranssisuunnittelussa lähinnä tiukennetaan niiden tuotteiden tai prosessien toleransseja, jotka eniten vaikuttavat tuotteen ominaisuuksien vaihteluun. (Karjalainen 1999, 41.)

Toleranssisuunnittelussa määritetään sallituiden vaihteluiden rajat tuotteelle tai prosessin parametreille. Taguchi ajattelussa ajatellaan yhteisölle aiheutuvaa hävikkiä. Jokaiselle tuotteen ominaisuudelle määritetään hävikkifunktio, jossa otetaan huomioon asiakkaan tai käyttäjän kustannukset, sekä tuotteen fyysiset ominaisuudet. Toleranssi on piste, jossa asiakkaan sekä tuottajan hävikkifunktio on yhtä suuri. Esimerkiksi tuotteelle määritetään optimiarvot leikkausjälkeen, joille sallitaan vaihtelua  $\pm\Delta$  verran. Kun päästään hyvin lähelle optimiarvoa, silloin ei synny hävikkiä eli kustannuksia. Vaihtelun lisääntyessä tuotteeseen sen jälkikäsitely lisääntyy, jolloin syntyy hävikkiä. (Karjalainen 1999, 75-76.)

## **4 STANDARDIN SFS EN 1090-2 +A1 SOVELTAMINEN POLTTOLEIKKAUKSESSA**

Tässä luvussa tarkastellaan standardin käyttöä polttoleikkauksessa. Kuitenkaan tarkoituksena ei ole avata standardia kovin paljon, sillä standardia hyödynnetään vain Taguchi-menetelmän toleranssirajojen ja koekappaleen määrittelyyn, sekä kriittisimpien arvojen mittaamiseen. Kriittisiä arvoja ovat kovuuden, nimellismittojen, profiilinsyvyyden ja kohtisuoruuden arvot. Lopuksi tarkastellaan tässä työssä käytettäviä mittalaitteita.

Yrityksessä käytetään SFS-EN 1090-2 + A1 -standardia, joka asettaa vaatimukset polttoleikkauksen geometrisille toleransseille, kovuuden ylärajalle ja vapaiden reunojen tasaisuudelle. Näistä vaatimuksista on valittu yritykselle sopivat toleranssi-alueet, jotka määrittelevät mihin alueelle milläkin leikkausteknologialla on päästävä. Standardin mukaan leikatun pinnanlaadun tulee täyttää seuraavan standardin EN ISO 9013:n mukaiset vaatimukset. (SFS-EN 1090-2 + A1. 2012, 32.)

### **4.1 Koekappale**

Standardin mukaan suorat leikkaukset on mitattava vähintään 200 mm pituudelta. Kulman ja kaaren sisältävät näytteet on tarkastettava ja leikkausjäljen on vastattava suoria leikkauksia. Koekappaleena käytettiin yrityksessä aiemmin käytettyä koekappaletta, josta pystytään mittaamaan kaikki kriittiset arvot. (SFS-EN 1090-2 + A1. 2012,32.)

### **4.2 Kovuuden arvo**

Käytettävän standardin mukaan vapaiden reunojen kovuus pitää tarkistaa, mikäli niin erityisesti vaaditaan. Standardi määrittelee kovuudelle maksimi arvot, jonka yli paikallinen karkeneminen ei saa mennä. Kokeissa käytettiin S355 terästä, joten taulukosta 2 näkee vickers-kovuuden arvon 380. (SFS-EN 1090-2 + A1. 2012,33.)



Taulukko 2 Kovuuden suurimmat sallitut arvot (HV 10). (SFS-EN 1090-2 + A1. 2012,33)

Tuotestandardi	Teräslajit	Kovuusarvot
EN 10025-2...5	S235...S460	380
EN 10210-1, EN 10219-1		
EN 10149-2 ja EN 10149-3	S260...S700	450
EN 10025-6	S460...S690	
HUOM. Nämä arvit ovat standardin EN ISO 15614-1 mukaisia arvoja standardissa ISO/TR 20172 esitetyille teräslajeille.		

Standardin mukaan menetelmäkokeet tulee tehdä sellaisille tuotteille, jotka ovat herkempiä paikalliselle karkenemiselle. Näistä pitää valmistaa neljä koekappaletta ja niille pitää tehdä neljä kovuuskoetta sellaisissa kohdissa, jotka ovat todennäköisesti karjonneet. Kokeet suoritetaan standardin EN ISO 6507 mukaisesti. (SFS-EN 1090-2 + A1. 2012,33.)

### 4.3 Nimellimitat

Nimellimitat mitataan puhdistetuista leikkauspinoista. Kohdat, joista mittaukset suoritetaan, määrittää kappaleen piirustus. Mittaukset pitää suorittaa sellaisesta kohdasta, jossa suoran leikkauksen mitta on vähintään 200 mm (SFS-EN 1090-2 + A1. 2012,32). Taulukosta 3 näkee nimellimittojen sallitut eromitat. Eromittoihin vaikuttaa kappaleen koko ja aineenpaksuus. Mitä paksumpi ja suurempi kappale on, niin sitä isommat eromitat sallitaan. (SFS-EN ISO 9013. 2003, 36.)

Taulukko 3 Nimellimittojen sallitut eromitat toleranssiluokalle 2. (SFS-EN ISO 9013. 2003, 36.)

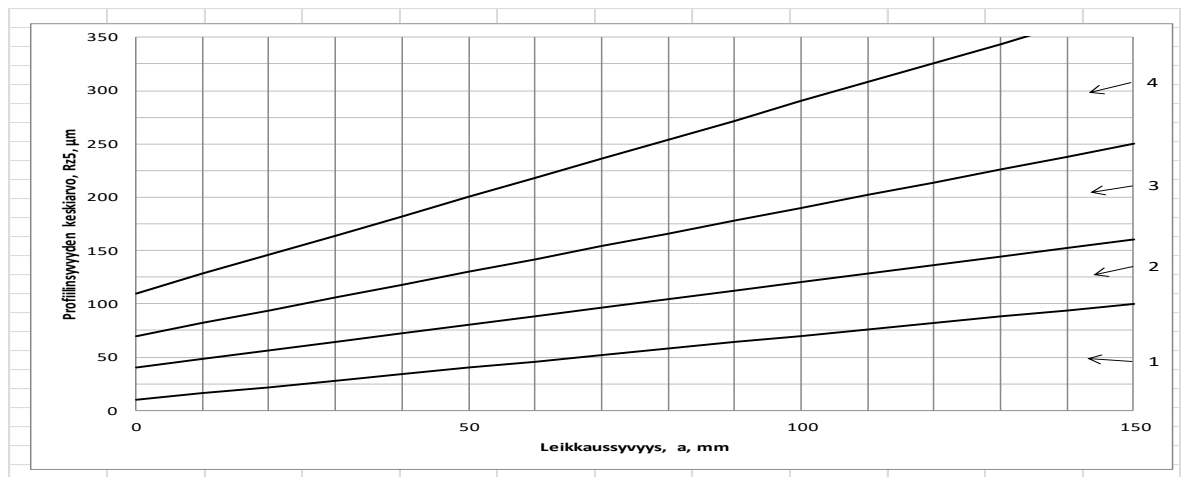
	Mitat mm							
Työkappaleen aineenpaksuus	Nimellimitat							
	> 0	≥ 3	≥ 10	≥ 35	≥ 125	≥ 315	≥ 1000	≥ 2000
	< 3	< 10	< 35	< 125	< 315	< 1000	< 2000	< 4000
	Sallitut eromitat							
< 0 ≤ 1	± 0,1	± 0,3	± 0,4	± 0,5	± 0,7	± 0,8	± 0,9	± 0,9
> 1 ≤ 3,15	± 0,2	± 0,4	± 0,5	± 0,7	± 0,8	± 0,9	± 1,0	± 1,1
> 3,15 ≤ 6,3	± 0,5	± 0,7	± 0,8	± 0,9	± 1,1	± 1,2	± 1,3	± 1,3
> 6,3 ≤ 10	-	± 1,0	± 1,1	± 1,3	± 1,4	± 1,5	± 1,6	± 1,7
> 10 ≤ 50	-	± 1,8	± 1,8	± 1,8	± 1,9	± 2,3	± 3,0	± 4,2
> 50 ≤ 100	-	-	± 2,5	± 2,5	± 2,6	± 3,0	± 3,7	± 4,9
> 100 ≤ 150	-	-	± 3,2	± 3,3	± 3,4	± 3,7	± 4,4	± 5,7
> 150 ≤ 200	-	-	± 4,0	± 4,0	± 4,1	± 4,5	± 5,2	± 6,4
> 200 ≤ 250	-	-	-	-	-	± 5,2	± 5,9	± 7,2
> 250 ≤ 300	-	-	-	-	-	± 6,0	± 6,7	± 7,9

#### 4.4 Profiilinsyvyys

Standardissa SFS-EN ISO 1090-2 todetaan, että profiilinsyvyyden mittaus suoritetaan standardin ISO 4288 mukaan siinä leikkaussyvyyden kohdassa, jossa pinnan karheus on suurimmillaan. Tyypillisesti mittaus kohta on 2/3 leikkauksen yläreunasta. Mittauspisteitä pitää olla yksi leikattua metriä kohden. Ennen profiilinsyvyyden mittaamista pitää kuitenkin polttoleikkauksessa syntyvä rautaoksidikalvo kerros poistaa. Profiilinsyvyyden toleranssirajojen laskemiseen on standardissa annettu kaavat, jotka on esitetty Taulukossa 4. Näillä kaavoilla pystytään laskemaan kunkin toleranssialueen maksimi arvo kullekin levyn paksuudelle. Kaavoissa  $a$  tarkoittaa levyn paksuutta. Kuviossa 6 on esitetty kuvaaja, josta selviää standardin määrittelemät rajat kullekin alueelle. (SFS-EN ISO 9013. 2003, 24-28.)

Taulukko 4 Profiilinsyvyyden laskenta. (SFS-EN ISO 9013. 2003, 28.)

Alue	Profiilinsyvyyden keskiarvo, Rz5 $\mu\text{m}$
1	$10 + (0,6a \text{ mm})$
2	$40 + (0,8a \text{ mm})$
3	$70 + (1,2a \text{ mm})$
4	$110 + (1,8a \text{ mm})$

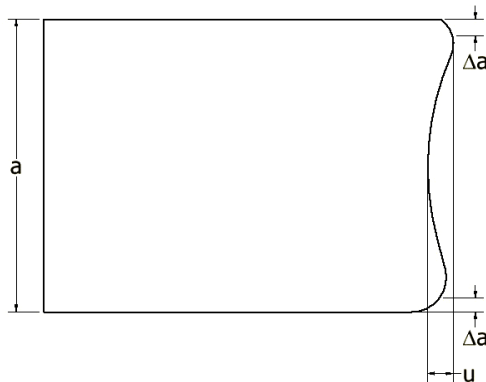


Kuvio 6 Profiilinsyvyyden keskiarvo Rz5. (SFS-EN ISO 9013. 2003, 32.)

#### 4.5 Kohtisuoruus

Kohtisuoruus mitataan kuusi kertaa 20 mm:n välein, jokaista leikattua metriä kohti. Mittauksen suoritetaan rajatulla leikkauspinnan alueella, jolloin estetään yläreunan

mahdollisesta sulamisesta syntyvä mittausrvirhe. Kuviossa 7 on esitetty alueet ( $\Delta a$ ), jotka vähennetään leikkauspinnan ylä- ja alareunasta. Näille alueille on annettu arvot taulukossa 5. Kohtisuoruusarvo  $u$  määritellään niin, että leikkauspinnan korkeimmasta kohdasta vähennetään matalin kohta. (SFS-EN ISO 9013. 2003, 22-24.)



Kuvio 7 Kohtisuoruuden määrittäminen. (SFS-EN ISO 9013. 2003, 24.)

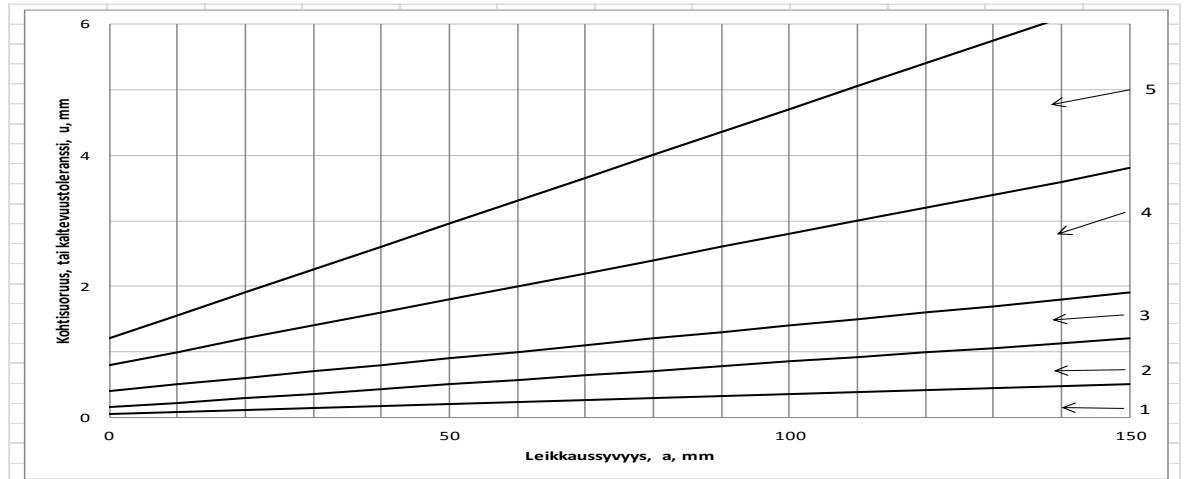
Taulukko 5 Mitat  $\Delta a$ . (SFS-EN ISO 9013. 2003, 24.)

Leikkaussyvyys, a, mm	$\Delta a$ , mm
$\leq 3$	0,1a
$> 3 \leq 6$	0,3
$> 6 \leq 10$	0,6
$> 10 \leq 20$	1
$> 20 \leq 40$	1,5
$> 40 \leq 100$	2
$> 100 \leq 150$	3
$> 150 \leq 200$	5
$> 200 \leq 250$	8
$> 250 \leq 300$	10

Kohtisuoruuden eri toleranssialueille on annettu kaavat taulukossa 6, joista pystytään laskemaan kunkin alueen maksimi arvot. Maksimiarvo kasvaa lineaarisesti levyn paksuuden kasvaessa. Kuviossa 8 on esitetty kuvaaja, josta näkee kunkin paksuuden toleranssialueen.

Taulukko 6 Kohtisuoruus- tai kaltevuustoleranssi, u. (SFS-EN ISO 9013. 2003, 28.)

Alue	Kohtisuoruus- tai kaltevuustoleranssi, u mm
1	$0,05 + 0,003a$
2	$0,15 + 0,007a$
3	$0,4 + 0,01a$
4	$0,8 + 0,02a$
5	$1,2 + 0,035a$



Kuvio 8 Kohtisuoruus- tai kaltevuustoleranssi, u. (SFS-EN ISO 9013. 2003, 30.)

#### 4.6 Mittausvälineet

Standardi määrittelee mittausvälineet tietyille mitattaville suureille. Taulukossa 7 ja 8 on määritelty tarkkuusmittaus- ja yleismittauslaitteet kohtisuoruudelle ja pinnan- karheuden mittaamiselle. Mittalaitteita valittaessa on pidettävä huoli, etteivät tun- nussuureiden virherajat ylitä 20 % mitattavista arvoista (SFS-EN ISO 9013. 2003, 22). Nämä virherajat on huomioitu, kun valittiin mittavälineitä kokeiden mittaami- seen. Mittalaitteita käsitellään myöhemmin.

Taulukko 7 Tarkkuusmittauslaitteet. (SFS-EN ISO 9013. 2003, 22.)

Tunnus	Virheraja	Tarkkuusmittalaitteet Esimerkkejä
u	0,02 mm	Mittakellolla varustettu ohjauslaite leikkauksuran syvyyden ja nimelliskulman suunnassa Tuntokärjen kulma korkeintaan 90 ° Tuntokärjen säde korkeintaa 0,1 mm
Rz5	0,002 mm	Tarkkuusmittauslaite, esim sähköinen tuntoelinlaite jatkuvaan tunnistamiseen leikkauksen syvyysuunnassa
n	0,05 mm	Mikroskooppi, jossa on hiusristikot ja sopivalla säädöllä varustettu ristiluisti
r	0,05 mm	Mittauskellolla varustettu erityismittauslaite profiilin tunnistamista varten leikkauksen yläreunalla
Suoruus	0,2 mm	Teräslanka, jonka halkaisija on enintään 0,5 mm, rakotulkki

Taulukko 8 Yleismittauslaitteet. (SFS-EN ISO 9013. 2003, 22.)

Tunnus	Virheraja	Yleismittauslaitteet Esimerkkejä
u	0,1 mm	Suorakulma (tarkkuus1 tai 2) viisto leikkaukselle, viistekulmalle tai asetuskulmalle. Suorakulma on asetettu nimelliselle viistekulmalle tai asetuskulmalle. Sen lisäksi tuntokärjellä varustettu syvyysmittari, mittauslanka tai rakotulkki
Rz5	-	-
n	0,2 mm	Suorakulma viisto leikkaukselle, viistekulmalle tai asetuskulmalle. Sen lisäksi noonasteikolla varustettu työntömitta, noonasteikolla varustettu viivoitin tai kulmamittain, jossa on muuntotaulukko jättämän kulmasta jättämän pituuteen
r	0,1 mm	Sädetulkki
Suoruus	0,2 mm	Teräslanka, jonka halkaisija on enintään 0,5 mm, rakotulkki

#### 4.6.1 Kovuuden arvo

Kovuuden mittaamiseen käytettiin yrityksestä löytyvää kovuusmittaria Hartip 2000. Mittari on kannettava ja sille ei tarvitse erikseen määrittää mistä suunnasta isku tehdään. Tarkkuus on  $\pm 0,3$  % mitatusta arvosta ja se pysyy aina samana riippumatta iskuvasaran kulmasta. Nämä ominaisuudet tekevät mittaamisesta nopeaa ja luotettavaa. Kuviossa 9 on kuva kovuusmittarista, jolla testit tehtiin. Mittariin kuuluu kovuusmittari ja iskuvasara. (TeknoNDT. 2015.)



Kuvio 9 Kovuusmittari. (TeknoNDT. 2015.)

#### 4.6.2 Nimellismitat

Nimellismittojen mittaamiseen käytettiin työntömittaa, koska sillä on nopea ja helppo mitata pituuksia. Työntömitalla pystyy mittaamaan 0,05mm tarkkuudelle. Tämä mittatarkkuus on riittävä, sillä nimellismitoille annetut toleranssit ovat luokkaa 0,1 mm. Työssä käytettävät työntömitat on tarkastettu hyväksytystä mittapalasta, jolloin varmistetaan saatujen mittaustuloksien paikkansapitävyydestä.

#### 4.6.3 Profiilinsyvyys

Yritykseltä löytyy myös mittari profiilinsyvyyden mittaamiseen. INNOVATEST pinnanankarheusmittari TR-110 pystyy mittaamaan Ra ja Rz arvoja. Mittausalueet ovat Ra 0,05-15,0 mm ja Rz 0,1-50  $\mu\text{m}$ . Mittarin tarkkuus on ISO luokan 3 mukainen  $\pm 15\%$ . Työssä mitattiin Rz arvoja, jotka pitää olla edellä mainitun mittausalueen sisällä, joten mittari soveltuu hyvin tähän tarkoitukseen. Kuviossa 10 on kuva mittarista (Linna Trade.)



Kuvio 10 Pinnankarheusmittari. (Linna Trade.)

#### 4.6.4 Kohtisuoruus

Kohtisuoruuden mittaamiseen käytettiin suorakulmaa ja rakotulkkia. Työssä käytettävässä rakotulkissa on metalliliuskoja 0,03 - 0,20 mm:n välillä 0,01 mm:n välein ja 0,25 - 0,5 mm:n välillä 0,05 mm:n välein. Näillä metalliliuskoilla päästään hyvin lähelle oikeaa mittaustulosta, koska mittaustulokset ovat välillä 0-0,5 mm. Mittakellolla mitattaessa saataisiin tarkempia tuloksia, mutta sillä mittaaminen vie paljon kauemman aikaa ja se ei vaikuta lopputulokseen merkittävästi, joten sen käyttäminen koekappaleiden mittaamiseen ei ole järkevää.

## 5 TAGUCHI-MENETELMÄN SOVELTAMINEN POLTTOLEIKKAUSKONEELLA

Tässä osiossa esitellään miten Taguchi-menetelmää sovelletaan polttoleikkauksessa. Aluksi käydään lävitse Taguchi-menetelmän kolme päävaihetta: systeemi-, parametri- ja toleranssisuunnittelu. Lopuksi esitellään kokeisiin käytettävää mittapöytäkirjaa.

Polttoleikkauksen arvoja optimoidessa on otettava huomioon hyvin paljon eri muuttujia. Leikattavan levyn lämpötila, materiaali, paksuus, pinnan epäpuhtaudet ja leikattavan kappaleen lämpövääntymä vaikuttavat kaikki omalta osaltaan leikkauksparametreihin, sekä leikkauksjälkeen.

Kaksi suurinta muuttujaa saatiin karsittua (lämpötila ja pinnan epäpuhtaudet), kun kokeisiin käytettiin S355 terästä, jolloin leikattavan levyn esilämmitystä ei tarvitse tehdä. Hiekkapuhaltamalla levy saadaan pinnan epäpuhtaudet pois. Lämpövääntymä saadaan karsittua suurimmaksi osaksi pois sijoitteluteknisillä asioilla, joihin ei perehdytä sen tarkemmin. Levyn materiaali ja paksuus määriteltiin työn rajauksessa, jossa päätettiin materiaaliksi S355K2 ja paksuuksiksi 25mm, 40mm, 50mm ja 100mm.

Kokeita suunnitellessa on otettava huomioon yrityksessä käytettävät laatustandardit. Laatustandardit määrittelevät toleranssirajat nimellismitoille, pinnankovuudelle, profiilinsyvyydelle ja kohtisuoruudelle. Leikattavien kappaleiden pitää täyttää nämä standardien määrittelemät arvot. Standardissa määritellään myös vaatimukset koekappaleelle. Näin lopputulokseksi saatiin sellaiset arvot, joilla päästään standardin asettamiin rajoihin.

Kokeiden tuloksia analysoidessa pitää koekappaleisiin tehtävät mittaukset tehdä huolellisesti, koska näistä mittaustuloksista muodostetaan S/N-suhteet jokaiselle mitattavalle ominaisuudelle. S/N-suhteista lasketaan optimiarvot kappaleille. Mitattaessa koekappaleita, edellisessä kappaleessa neljä esitetyillä mittavälineillä, päästään hyviin mittaustuloksiin. Mittaustuloksien ei tarvitse olla kovin tarkkoja kunhan mittauksiin ei synny virhettä mittaajan toimesta eli kaikki kappaleet on mitattu samalla tavalla.



Polttoleikkauksessa käytettävien parametrien ei välttämättä tarvitse olla absoluuttisia, koska polttoleikkaukoneen leikkausparametrit säädetään sen pohjalta millaiset arvot siellä on ollut ennen opinnäytetyötä. Tulokset olisivat samanlaiset, oli kyseessä absoluuttiset arvot tai koneen mittareiden pohjalta saadut arvot, koska koneen säädöt tehdään kuitenkin polttoleikkaukoneessa olevien mittareiden mukaan. Näin saadaan säädettyä polttoleikkaukone Taguchi-menetelmä antamiin optimiarvoihin.

Menetelmää käytettäessä täytyykin tuntee sovellettava aihe-alue hyvin. On tiedettävä leikkaukseen vaikuttavat tekijät ja niiden keskinäisvaikutukset. Aiheeseen perehtymiseen kannattaakin käyttää hyvin aikaa, sekä käyttää hyväksi leikkaajien ja muiden työntekijöiden ammattitaitoa.

## **5.1 Systemisuunnittelu**

Taguchi-menetelmää hyödyntääkseen on ensiksi määriteltävä, mitä tuotekehitysvaihetta aletaan parantaa. Polttoleikkauksparametreja optimoidessa keskitytäänkin tuotannon suunnitteluun, jolloin pyritään tehostamaan tuotantoa ylimääräisen hävikin vähentämiseksi (Taguchi-filosofia). Näin saadaan säästöä koneiden kulutuksissa leikkauskaasuissa, sekä hyödynnetään koneen kapasiteettia mahdollisimman paljon.

## **5.2 Parametrisuunnittelu**

Parametrisuunnittelu lähtee liikkeelle siitä, että pohditaan mitkä arvot vaikuttavat mihinkin ja mitä kokeilla on tarkoitus saada aikaiseksi. Työn tarkoituksena on optimoida polttoleikkauksarvot siten, että polttoleikkauksenopeus olisi mahdollisimman suuri ja kaasujen paineet olisivat mahdollisimman pienet.

Parametrisuunnittelun tärkein vaihe on ohjaustekijöiden määrittely ja niiden keskinäissuhteiden löytäminen. Kun nämä on määritelty, täytyy löytää sellainen matriisi, jossa on riittävästä tasoja parametreille. Tässä tapauksessa kolme tasoa on

hyvä määrä, koska tiedetään mitä arvoa halutaan lähestyä. Näin saadaan laskennallisesti parempia tuloksia.

### 5.2.1 Ohjaustekijät ja niiden tasot

Ohjaustekijöitä eli parametreja ovat: leikkausnopeus, leikkaushapen, lämmitys hapen ja propaanin paine. Näiden parametrien tasojen määrytyksestä puhuttiin leikkaajien ja sijoittelijoiden kanssa. Ensiksi katsottiin arvot, joilla tällä hetkellä leikataan. Ne vaihtelivat leikkaajien kesken hyvin paljon. Jokaisella heistä oli omat kokemukset, millä saa riittävän hyvää jälkeä, joten sen mukaan määriteltiin parametreille tasot. (Ferrum Steel Oy työntekijät 2015.)

Tavoitteena oli nostaa leikkausnopeutta, joten sen takia määriteltiin alimmaksi tasoksi tämän hetkinen leikkausnopeus. Suurimman nopeuden kohdalla päädyttiin arvoon, joka on noin 80 mm/min korkeampi kuin alin taso. Keskimmäisen tason arvo saatiin laskemalla suurimman ja pienimmän arvon keskiarvo.

Leikkaushapen tasot määriteltiin niin, että leikkaajien käyttämä painearvo laitettiin keskitasoksi. Alin taso määriteltiin vähentämällä keskitasosta yksi baari ja ylin taso määriteltiin lisäämällä yksi baari. Näin päästiin leikkaajien käyttämille painetasoille ja mahdollistetaan suuremman leikkausnopeuden käyttö.

Lämmityshappea ja propaanin painetta leikkaajat eivät juuri säädä. Siispä näiden arvojen optimoinnilla pyritään saamaan vain säästöä. Lämmityshapen keskitasoksi määriteltiin leikkaajien käyttämä painearvo ja muut tasot määriteltiin tästä arvosta  $\pm 0,5$  baaria. Propaanin paineen keskitasoksi määritettiin leikkaajien käyttämä painearvo. Muut tasot määriteltiin leikkaajien painearvosta  $\pm 0,3$  baaria. (Ferrum Steel Oy työntekijät 2015.)

Polttoleikkauskoneessa olevat painemittarit näyttävät paineen 0,1 baarin tarkkuudella. Vaikka painemittareiden lukemissa olisi heittoa absoluuttisiin lukemiin, se ei vaikuta lopputuloksiin, koska tällä hetkellä konetta säädetään näiden mittareiden mukaan. Eri painetasot on määritelty leikkaajien käyttämistä painearvoista ja kun tuloksia analysoidaan, antaa Taguchi-menetelmä laskennalliset optimiarvot para-

metreille. Näin ollen mittareiden kalibrointia ei ole pakollista suorittaa kokeita varten.

### 5.2.2 Matriisin valinta

Matriisi täytyy valita sen mukaan kuinka monta ohjaustekijää ja niiden tasoa on käytössä. Valintaan vaikuttaa myös leikkaukseen vaikuttavat häiriötekijät. Polttoleikkauksessa häiriötekijöinä voi olla esimerkiksi levyn lämpötila ja levyn pinnan epäpuhtaudet. Häiriötekijät poistettiin, kun käytettiin vain puhallettua levyä ja levyn lämpötilaa ei oteta huomioon. Levyn puhalluksella saadaan levyn pinnasta epäpuhtaudet pois. Levyn lämpötilaa ei huomioida, koska se ei vaikuta S355 teräksen polttoleikkaukseen merkittävästi. Sisämatriisiksi valittiin Taulukko 9 mukainen matriisi L9 ( $3^4$ ), koska siinä on riittävästi ohjaustekijöitä ja tasoja. (Ferrum Steel Oy työntekijät 2015.)

Taulukko 9 Sisämatriisi. (Karjalainen 1999, 91.)

Koe/tekijä	a	b	c	d
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Ulkomatriiseja on monenlaisia, joihin pystyy sijoittamaan häiriötekijöitä. Ulkomatriisiksi käy myös se, että toistetaan koetta vähintään kaksi kertaa, jolloin saadaan keskiarvollisia tuloksia. Tässä työssä valittiin koemääräksi kolme, koska näin saadaan keskiarvo mittaustuloksista ja pystytään paremmin analysoimaan niitä. Kuitenkaan koekappaleiden määrä ei nouse suureksi ja kappaleiden polttoleikkaus voidaan suorittaa tuotannon ohella. Taulukkoa 10 on muokattu lähteestä niin, että se sopii työssä käytettävään kolmeen koemäärään.

Taulukko 10 Sisä- ja ulkomatriisi. (Karjalainen 1999, 68.)

Koe/tekijä	a	b	c	d	Tulokset		
1	1	1	1	1	y11	y12	y13
2	1	2	2	2	y21	y22	y23
3	1	3	3	3	y31	y32	y33
4	2	1	2	3	y41	y42	y43
5	2	2	3	1	y51	y52	y53
6	2	3	1	2	y61	y62	y63
7	3	1	3	2	y71	y72	y73
8	3	2	1	3	y81	y82	y83
9	3	3	2	1	y91	y92	y93

### 5.2.3 Ohjaustekijöiden sijoitus matriisiin

Tekijöitä sijoittaessa matriisiin täytyy tuntea ohjaustekijöiden keskinäisvaikutukset. Taulukossa 10 on tähän työhön käytettävä matriisi, johon sijoitettiin a sarakkeeseen leikkausnopeus ja b sarakkeeseen leikkaushappi. Näin testataan jokainen vaihtoehto näiden tekijöiden välillä. Lämmityshappi sijoitettiin sarakkeeseen c ja leikkauskaasu sarakkeeseen d, koska näillä ei ole niin suurta vaikutusta itse leikkausprosessiin. Tekijöiden c ja d tehtävä on ylläpitää lämpötila polttoleikkaus kohdassa niin, että leikkaushapen muodostama palamisreaktio pystyy tapahtumaan. Numerot 1, 2 ja 3 tarkoittavat tasoja, jotka määriteltiin ohjaustekijöille.

### 5.3 Toleranssisuunnittelu

Kokeiden toleranssit valittiin standardin SFS EN 1090-2 mukaan, joka määrittää pinnankovuudelle maksimiarvon. Standardissa määritetään, että leikatun pinnanlaadun tulee täyttää standardin EN ISO 9013:n mukaiset vaatimukset. Yrityksessä on päätetty standardin mukaan toleranssialueet, johon pitää leikatessa päästä. Näitä alueita käytettiin toleranssialueen määrittämiseen. Toleranssialueita käsiteltiin laajemmin luvussa 4.

Jäysteen määrällä ja kuinka kappale irtoaa leikattavasta levystä, on suuri merkitys lopputuloksiin. Kappaleeseen ei saa jäädä suuria määriä jäystettä, koska se teettää lisätyötä jäysteen poistossa. Kappaleen täytyy myös irrota hyvin levystä, jolloin polttoleikkaajalla ei mene kovin kauan aikaa purkaa polttoleikkattua levyä.



## 6 TULOKSET

Tässä luvussa esitellään saadut tulokset valituille levynpaksuuksille. Laskenta optimiarvoille tapahtuu samalla tavalla jokaisessa levynpaksuudessa, joten luvussa 6.1 on kerrottu tarkasti kuinka S/N-suhteet lasketaan, kuinka vastetaulukot muodostetaan sekä miten vastetaulukoista valitaan optimiarvot. Luvuissa 6.2, 6.3 ja 6.4 on esitelty tulokset muille levynpaksuuksille, mutta näissä ei käsitellä taulukoiden muodostamista. Kaikkia tuloksia ei voida esittää, koska ne ovat yrityssalaisuuksia. Tästä syystä tulokset ovat puutteelliset.

### 6.1 Mittaustuloksen levynpaksuudelle 25 mm

Yrityksessä on määritetty kohtisuoruudelle standardin SFS-EN ISO 9013 mukaan toleranssialue kolmonen. Tämän alueen maksimiarvo lasketaan Taulukon 6 kaavan mukaan, josta saadaan tulokseksi 0,65 mm. Kohtisuoruutta mitattaessa huomattiin, että kaikkien koekappaleiden tulokset ovat alle maksimiarvon.

Nimellimitoille käytetään standardin SFS-EN ISO 9013 toleranssiluokkaa kaksi. Taulukosta 3 nähdään, että nimellimitoille suurin sallittu vaihtelu on  $\pm 1,9$  mm. Tuloksista huomattiin, että kaikki koekappaleet ovat standardin määrittelemissä rajoissa. Kunkin kokeen mittaustulokset ovat keskenään lähellä toisiaan, joten mittaustulokset ovat hyväksyttäviä. Syy miksi kappaleet eivät ole mitatusta kohdasta tavoitearvossa on, että jokaiseen kulmaan tulee pyöristystä vaikka sitä ei olisi geometriassa.

Pinnakarheudelle on yrityksessä määritetty standardin SFS-EN ISO 9013 mukaan toleranssialue kaksi. Alueen kaksi maksimiarvo on 60  $\mu\text{m}$ , joka lasketaan Taulukon 4 kaavasta. Tuloksista huomattiin, että kaikki mitatut arvot menevät reilusti alle määritetyn maksimiarvon. Kokeessa kaksi oli suurin ero tuloksen yksi ja kolme välillä. Tämä selittyy sillä, että mitatussa kohdassa on ollut uurre, jonka takia pinnankarheus nousee korkeammaksi. Muissa kokeissa tulokset ovat keskenään pysyneet samalla tasolla.

Standardi SFS-EN 1090-2 + A1 määrittelee S355 teräksen leikkauspinnalle vickers-kovuuden maksimiarvoksi 380. Tuloksista huomattiin, että kaikki mitatut arvot alittivat maksimiarvon. Pääsääntöisesti jokaisen kokeen koekappaleiden pinnankovuus on pysynyt lähellä toisiaan. Eroja selittää mistä kohtaa levyä on koekappaleet leikattu. Mikäli kappaleet leikataan läheltä reunaa tai toisiaan syntyy paljon lämpöä, koska lämpö ei pääse johtumaan levyyn ja tämä aiheuttaa karkeamista. Kokeen kolme koekappale kolme on leikattu keskeltä levyä, jolloin lämpö pääsee johtumaan ympärillä olevaan levyyn.

### 6.1.1 Sn-suhteen laskenta

Kohtisuoruuden, pinnankarheuden ja pinnakovuuden S/N-suhteet lasketaan kaavalla  $S/N = -10 \log (1/n \sum(Y_i^2))$ , koska mitä pienemmän arvon mittaustulokset saavat sitä parempi on leikkausjälki. Kaavassa n tarkoittaa koetoistojen määrää ja  $Y_i$  koetulosta. Nimellismitoille käytetään kaavaa  $S/N = 10 \log (Y_{av}^2/s^2 - 1/n)$ , koska näillä tuloksilla pyritään lähentymään tiettyä tavoitearvoa. Kaavassa  $Y_{av}$  tarkoittaa mittaustulosten keskiarvoa ja s keskihajontaa.

S/N-suhteiden laskemisen jälkeen tehdään vastetaulukot jokaiselle mittaussuurelle. Vastetaulukoihin lasketaan S/N-suhteiden keskiarvo jokaiselle tasolle ja ohjaustekijälle. Vastetaulukoiden tarkoituksena on verrata mittaustuloksista laskettuja S/N-suhteita. Mitä suurempi on ohjaustekijöiden tasojen erotus, sitä suurempi vaikutus sillä tekijällä on mitattavaan ominaisuuteen. Vastetaulukoihin on laskettu maksimi- ja minimi-arvon erotus, joista nähdään mitkä tekijät vaikuttavat eniten mitattavaan ominaisuuteen. Niistä näemme myös kuinka paljon käytetyt leikkausarvot vaikuttavat kuhunkin ominaisuuteen. Käytetyt leikkausarvot vaikuttivat eniten nimellismittoihin, koska näissä vastetaulukoissa maksimi- ja minimi-arvon erotus on suuri. Käytetyt leikkausarvot eivät vaikuttaneet paljon pinnakarheuteen ja pinnakovuuteen, koska näissä taulukoissa maksimi- ja minimi-arvon erotus oli pieni. Mitä pienempi erotus on, sitä vakaampi on polttoleikkausprosessi. Toisin sanoen käytetyt leikkausarvot eivät vaikuttaneet merkittävästi mitattuun ominaisuuteen, jos maksimi- ja minimi-arvon erotus on pieni.

Kohtisuoruuden mittaustulokset olivat kaikki hyvin pieniä, jonka takia kaikille kokeille tulee sama S/N-arvo. Vastetaulukkoa ei voida muodostaa, koska mittaustuloksissa ei ole vaihtelua eri kokeiden välillä. Optimiarvoja laskettaessa ei pystytä toteamaan mikä leikkausparametri antoi parhaimman mittaustuloksen. Tästä johtuen kohtisuoruutta ei huomioida tälle levyn paksuudelle.

Nimellismittoihin eniten vaikuttivat leikkausnopeus lämmityshappi ja leikkauskaasu. Liian suuri leikkausnopeus aiheuttaa kulmiin pyöristystä, koska palamista ei kerkeä kunnolla tapahtumaan. Toisaalta taas myös liian hidaskas leikkausnopeus aiheuttaa kulmien pyöristymistä, koska silloin ne kerkeävät sulamaan. Lämmityshappi ja leikkauskaasu selittyvät sillä, että liian kuumalla liekillä leikattaessa sulattaa liekki kappaletta, josta johtuu nimellismittojen mittapoikkeamat. Leikkaushappi ei vaikuta nimellismittoihin niin paljon, koska leikkaushapen tarkoituksena on siirtää sula leikkausrailosta pois.

Pinnankarheuden mittaustuloksiin käytetyt leikkausarvot eivät vaikuta merkittävästi, koska maksimi- ja minimiarvon erotus on pieni. Polttoleikkausprosessi on vakaa tämän ominaisuuden kohdalla. Lämmityshappi ja leikkauskaasu vaikuttavat eniten pinnankarheuteen, koska kuuma liekki aiheuttaa leikkausjälkeen uurteita.

Pinnankovuuden S/N-suhteiden erotuksista huomataan, että käytetyt leikkausarvot eivät vaikuta mittaustuloksiin merkittävästi. Polttoleikkausprosessi on vakaa tämän mitattavan ominaisuuden kohdalla. Eniten vaikuttivat kuitenkin leikkausnopeus ja leikkauskaasu. Nämä selittyvät sillä, että liian hitaalla leikkausnopeudella tai liian suurella leikkaushapen paineella leikattaessa kappale lämpenee, jolloin pinta karkenee.

### 6.1.2 Optimiarvot

Optimiarvojen parhaat kombinaatiot valitaan vastetaulukoista. Kohtisuoruuden, pinnankarheuden ja pinnankovuuden vastetaulukoista valitaan jokaisen ohjaustekijän sarakkeesta pienin S/N-arvo. Pienin arvo valitaan, koska mittaustuloksissa pyritään pääsemään mahdollisimman pieneen arvoon. Nimellismittojen vastetaulukosta valitaan jokaisen ohjaustekijän suurin S/N-arvo, koska mittaustuloksilla



pyritään lähestymään määritettyä arvoa. Näin saadaan paras kombinaatio jokaiselle mitattavalle ominaisuudelle.

Laskennalliset optimiarvot nostivat leikkausnopeutta noin 3 %. Leikkausnopeuden noustessa täytyy leikkaushapen paineenkin nousta, joten laskennallisten optimiarvojen tulos on mennyt oikeaan suuntaan. Käytännössä lämmityshapen ja leikkauskaasun paine pysyivät samalla tasolla kuin mitä ne olivat ennen opinnäytetyötä. Taguchi-menetelmä antaa kuitenkin vain laskennalliset optimiarvot, kun vertaillaan mitattavia ominaisuuksia. Tästä johtuen polttoleikkauskoneen kaasujen paineita joudutaan säätämään niin, että polttoleikkausprosessi saadaan tapahtumaan hyvin nopeammalla leikkausnopeudella.

### 6.1.3 Konfirmaatiokokeet

Saaduilla optimiarvoilla testattiin tulosten paikkansa pitävyys. Laskennalliset optimiarvot eivät välttämättä anna parasta mahdollista tulosta kun yritetään nostaa polttoleikkausnopeutta, koska koekappaleen irtoamiseen ja jäysteen määrään ei pystytä määrittämään lukuarvoa. Tämän takia saatuihin arvoihin pitää tehdä hienosäätöä, että polttoleikkausprosessi saadaan tapahtumaan kunnolla. Polttoleikkausnopeuden optimiarvo on noin 3 % korkeampi kuin ennen opinnäytetyötä ollut polttoleikkausnopeus. Konfirmaatiokokeet päätettiin tehdä suuremmalla polttoleikkausnopeudella, koska laskennalla saatu polttoleikkausnopeus nousi vähän.

Ensimmäiseksi testattiin leikkausnopeudella, jolla saataisiin nostettua leikkausnopeutta noin 10 %. Muut leikkausparametrit päätettiin pitää saaduissa optimiarvoissa. Ensimmäisessä koekappaleessa esiintyi uurteisuutta, jota aiheuttaa liian pieni leikkaushapen paine. Tästä syystä toista koekappaletta polttoleikattaessa päätettiin nostaa leikkaushapen painetta 0,5 baaria, jolloin uurteisuus väheni. Kolmatta koekappaletta polttoleikatessa kokeiltiin polttoleikkausnopeutta, jolla saataisiin nostettua leikkausnopeutta noin 15 %. Koekappaleiden leikkauspinta oli silmämääräisesti samanlainen kuin koekappaleessa kaksi.

Käytetyillä leikkausarvoilla päästiin toleranssien määrittämiin rajoihin. Kohtisuoruuden arvot ovat hyvin pienet, joten rakotulkilla ja suorakulmalla mitattaessa ei saa-

da vaihtelua kohtisuoruuden mittaustuloksiin. Käytännössä leikkausjälki oli suora jokaisessa koekappaleessa. Ensimmäisestä kokeesta saatiin parhaimmat mittaustulokset pinnankarheudelle ja pinnankovuudelle, mutta uurteisuutta oli enemmän kuin kokeissa kaksi ja kolme. Toisessa kokeessa leikkaushapen noston myötä saatiin nimellismittoja paremmaksi, mutta pinnakarheuden ja pinnankovuuden mittaustulokset huononivat. Kolmannessa kokeessa nostettiin polttoleikkausnopeutta, joka ei merkittävästi vaikuttanut mittaustuloksiin verrattuna kokeeseen kaksi. Tehyjen konfirmaatiokokeiden perusteella pystyttiin nostamaan polttoleikkausnopeutta noin 15 % huonontamatta leikkauspinnanlaatua.

## 6.2 Mittaustulokset levynpaksuudelle 40 mm

Kohtisuoruuden toleranssi alueeksi on määritetty alue kolme. Taulukon 6 kaavasta saadaan laskettua kohtisuoruudelle maksimiarvoksi 0,8 mm. Kaikki mittaustulokset alittivat määritetyn maksimiarvon.

Mittaustuloksista huomataan, että kaikki kokeiden arvot pysyivät toleranssirajan  $\pm 1,9$  mm sisällä. Kunkin kokeen mittaustulokset ovat keskenään lähellä toisiaan. Kokeissa kolme, kuusi sekä kahdeksan on pienimmän ja suurimman mittaustuloksen ero noin 1 mm. Näissä kokeissa suurimman arvon on saanut sellainen koekappale, jossa polttoleikkauksen aloituskohta on ollut mitattavassa kulmassa. Aloituskohtaan jää aina pieni nyppy, koska lähdöt on ohjelmoitu tällä tavalla. Nypyt hiotaan pois jäysteenpoistossa. Mittaustulokset ovat kuitenkin toleranssirajan sisäpuolella ja ne eivät merkittävästi vaikuta keskiarvoon, joten tulokset ovat hyväksyttäviä.

Pinnankarheuden toleranssialueena on kaksi, jonka maksimiarvoksi saadaan 72  $\mu\text{m}$  Taulukon 4 kaavasta. Mittaustulokset alittivat määritetyn maksimiarvon. Kaikissa koekappaleissa esiintyi uurteisuutta, jonka takia mittaustuloksiin on tullut vaihtelua. Uurteisuus johtuu liian pienestä leikkaushapen paineesta, jolloin polttoleikkauksen palamisreaktio ei ehdi tapahtumaan kunnolla.

Pinnankovuuden maksimiarvo on 380. Mittaustulokset alittivat maksimiarvon, mutta arvoissa esiintyy vaihtelua. Vaihtelu johtuu kappaleiden sijoittelusta levyille. Mitä

lähempää kappaleita leikataan levyn reunaa tai toisiaan sitä kuumemmaksi kappaleet lämpenevät. Polttoleikkausarvojen täytyy olla sellaiset, että kaikki mittaustulokset alittavat pinnankovuuden maksimiarvon riippumatta kappaleen sijoittelusta levyille.

### 6.2.1 S/N-suhteen laskenta

Kokeiden leikkausjälki ei ollut kovin hyvää verrattuna ennen opinnäytetyötä leikattavaan leikkausjälkeen, vaikka mittaustulokset olivatkin toleranssien sisäpuolella. Tämä johtuu kokeissa käytetyistä leikkaushapen paineista. Tasoja määritettäessä oli tarkoituksena määrittää keskimmäiseksi tasoksi leikkaajien käyttämä sen hetkinen leikkaushapen paine. Virhe tapahtui kun keskimmäiseksi tasoksi määritettiin yhden baarin vähemmän kuin leikkaajien käyttämä leikkaushapen paine.

Kaikki mittaustulokset olivat määritettyjen toleranssirajojen sisäpuolella, mutta rajoittavina tekijöinä oli kappaleen irtoaminen levystä ja jäysteen määrä. Kokeissa yksi, kaksi, neljä, viisi, seitsemän sekä kahdeksan kappaleet jäivät levyyn kiinni ja jäystettä oli koekappaleen alareunassa. Sulaa oli tarttunut myös leikkauspintaan. Nämä lisäävät työtä kappaleen irrottamiseksi levystä ja jäysteen poistossa. Jäysteen määrä ja kappaleen jääminen levyyn kiinni johtui kyseisissä kokeissa liian alhaisesta leikkaushapen paineesta. Tästä johtuen edellä mainittuja kokeita ei voida ottaa huomioon vastetaulukoita muodostaessa.

Vastetaulukoista pystyttäisiin muodostamaan optimiarvot, jotka olisivat parhaat mahdolliset kokeissa käytetyille polttoleikkausparametreille. Näitä tuloksia ei voida hyväksyä, koska leikkausjälki oli huonontunut verrattuna ennen opinnäytetyötä leikattavaan leikkausjälkeen. Leikkaushapen jokaisen tason olisi pitänyt olla baarin verran suuremmat, jolloin kokeet olisivat onnistuneet paremmin. Virhe huomattiin vasta koekappaleiden leikkauksen jälkeen, joten uusia koekappaleita ei lähdetty leikkaamaan. Edellä mainituista syistä levynpaksuudelle 40 mm ei pystytä muodostamaan parhaita mahdollisia optimiarvoja.

### 6.3 Mittaustulokset levynpaksuudelle 50 mm

Kohtisuoruuden toleranssialue kolme määrittää kohtisuoruuden maksimiarvoksi 0,9 mm, joka saadaan laskettua Taulukon 6 kaavasta. Mittaustuloksista huomataan, että kunkin kokeen mittaustulokset pysyvät lähellä toisiaan, joten mittaukset ovat onnistuneet hyvin. Kaikkien kokeiden mittaustulokset alittivat määritetyn maksimiarvon.

Nimellismittojen toleranssiluokka kaksi määrittää suurimmaksi sallituksi vaihteluksi  $\pm 1,9$  mm, joka nähdään Taulukosta 3. Mittaustuloksissa ei esiinny suuria vaihteluja. Polttoleikkauksen aloituskohdat ovat olleet samalla tavalla jokaisessa kappaleessa, jolloin aloitusnyppy ei vaikuta nimellismittojen mittaustuloksiin. Jokainen mittaustulos on pysynyt määritetyn toleranssialueen sisällä, joten kokeet ovat onnistuneet hyvin nimellismittojen osalta.

Pinnankarheudelle toleranssialue kaksi määrittää maksimiarvoksi 80  $\mu\text{m}$ , joka voidaan laskea Taulukon 4 kaavasta. Mittaustuloksissa esiintyy jonkin verran vaihtelua, joka selittyy leikkauspintaan tulleista uurteista. Pääsääntöisesti kunkin kokeen tulokset ovat lähellä toisiaan, joten mittaustulokset luotettavia.

Pinnankovuuden maksimiarvo on 380, jonka kaikki mittaustulokset alittavat. Mittaustuloksissa esiintyy vaihtelua, joka selittyy koekappaleiden sijoittelusta levyille. Tärkeintä on, että jokainen koekappale alittaa määritetyn maksimiarvon riippumatta polttoleikkausparametreista.

#### 6.3.1 S/N-suhteen laskenta

Kaikille koekappaleille lasketaan S/N-suhteet, joista pystytään muodostamaan vastetaulukot jokaiselle mitattavalle ominaisuudelle. Kaikki mittaustulokset olivat määritettyjen toleranssialueiden sisällä, joten rajoittavaksi tekijäksi osoittautui koekappaleen irtoaminen ja jäysteen määrä.

Vastetaulukoiden keskiarvoja laskettaessa ei oteta huomioon kokeiden yksi, neljä ja seitsemän S/N-suhteita, koska koekappaleet jäivät levyyn lujaan kiinni ja jäysteen määrä oli huomattava. Tämä pitää huomioida vastetaulukoita muodostaessa.

Kohtisuoruuteen eniten vaikuttivat leikkausnopeus, leikkaushappi ja leikkauskaasu. Kohtisuoruuteen ei vaikuttanut lämmityshappi. Nämä pitää paikkansa, koska liian suurella kuljetusnopeudella suhteessa muihin leikkausarvoihin tulee aaltoilevaa ja koveraa leikkauspintaa. Liian hidas kuljetusnopeus aiheuttaa reunan sulaamista. Myös liian suuri leikkaushapen paine suhteessa muihin leikkausarvoihin aiheuttaa kovertumaa leikkauspintaan kun taas liian pieni lisää kuonan määrää, jolloin leikattava pala ei irtoa helposti. Liian suuri leikkauskaasun paine aiheuttaa aaltomaisuutta leikkauspintaan ja liian pienellä paineella polttoleikkaus voi keskeytyä, koska lämpö ei riitä ylläpitämään polttoleikkausprosessia.

Lämmityshappi ja leikkauskaasu vaikuttavat mittaustuloksiin eniten. Liian suuret paineet lämmityshapella ja leikkauskaasulla aiheuttavat kuumen liekin, joka sulattaa palaa. Tämän takia ne vaikuttavat eniten nimellismittoihin. Leikkausnopeudella ja leikkaushapen paineella ei ole niin suurta vaikutusta nimellismittoihin. Leikkausnopeus ja leikkaushapen paine vaikuttivat, millainen jälki kappaleiden teräviin kulmiin tulee. Liian suuri leikkausnopeus suhteessa leikkaushapen paineeseen jättää kulmien alareunaan ulokkeen, koska liekki kulkee jäljessä. Liian suuri leikkaushapen paine suhteessa leikkausnopeuteen aiheuttaa leikkausrailon alareunan levenemistä, koska liekki taittuu leikkaussuuntaan päin.

Käytetyt leikkausarvot eivät vaikuttaneet pinnankarheuden mittaustuloksiin merkittävästi, jolloin polttoleikkausprosessi on vakaa tämän ominaisuuden kohdalla. Eniten pinnankarheuteen vaikuttivat leikkausnopeus ja leikkauskaasun paine, koska liian nopealla leikkausnopeudella polttoleikkauksen palamisreaktio ei ehdi tapahtumaan kunnolla ja se aiheuttaa uurteita leikkauspintaan. Korkea leikkauskaasun paine aiheuttaa kuumen liekin, jonka takia leikkauspintaan tulee uurteita. Leikkaus- ja lämmityshapen paine eivät vaikuta niin paljon pinnankarheuteen. Liian pieni tai liian suuri leikkaushapen paine aiheuttaa leikkauspintaan uurteita, mutta ei niin paljon kuin leikkausnopeus ja leikkauskaasu.

Pinnankovuuden S/N-suhteista huomataan, että käytetyt leikkausarvot eivät vaikuta merkittävästi pinnankovuuden mittaustuloksiin, jolloin polttoleikkausprosessi on vakaa tämän mitattavan ominaisuuden kohdalla. Pinnankovuuteen vaikuttaa eniten lämmityshappi ja leikkauskaasu. Näillä tekijöillä säädetään lämmitysliekin ylläpitämään palamisreaktiota. Liian kuumalla liekillä polttoleikkattaessa leikkauspinta-

taan välittyä paljon lämpöä, joka aiheuttaa pinnan karkenemista. Leikkausnopeus ja leikkaushappi eivät vaikuta merkittävästi pinnakovuuden mittaustuloksiin. Hidas leikkausnopeus aiheuttaa pinnan karkenemista, koska liekki kuumentaa leikkauspintaan. Tämä ei kuitenkaan vaikuta niin merkittävästi kuin lämmityshapen ja leikkauskaasun paine.

### 6.3.2 Optimiarvot

Laskennalliset optimiarvot nostivat leikkausnopeutta noin 9 %. Leikkaushapen paine on myös noussut, joten suunta on oikea, koska leikkausnopeuskin on noussut. Lämmityshapen ja leikkauskaasun paine pysyivät samalla tasolla kuin mitä ne olivat ennen opinnäytetyötä. Laskennalliset optimiarvot ovat tulleet vertaillessa eri mitattavia ominaisuuksia, joten polttoleikkaukoneen kaasujen paineita joudutaan säätämään niin, että polttoleikkausprosessi saadaan tapahtumaan hyvin nopeammalla leikkausnopeudella.

### 6.3.3 Konfirmaatiokokeet

Leikkausnopeuden optimiarvo on noin 9 % korkeampi kuin ennen opinnäytetyötä ollut leikkausnopeus. Konfirmaatiokokeisiin päätettiin kokeilla nostaa leikkausnopeutta noin 14 %. Muut saadut polttoleikkausparametrit päätettiin pitää Taguchi-menetelmän optimiarvoissa.

Ensimmäisen koekappaleen kohdalla huomattiin, että leikkaushappi ei pystynyt siirtämään sulaa kunnolla pois leikkaurailosta ja kappaleen alareunaan kiinnittyi kuonaa, sekä kappale jäi kiinni levyyn. Tämän takia toisen koekappaleen kohdalla nostettiin leikkaushapen painetta 0,5 baaria, jolloin sula siirtyi leikkaurailosta kunnolla pois eikä kappaleen alareunaan jäänyt niin paljon kuonaa kiinni.

Käytetyillä leikkausparametreilla päästiin toleranssien määäämiin rajoihin. Leikattaessa pienemmällä leikkaushapen paineella, päästiin parempiin tuloksiin nimelismitoissa ja pinnankovuudessa, mutta kappaleeseen jäi paljon kuonaa kiinni. Näin ollen leikkausnopeuden nostosta ei ole hyötyä kun aikaa kuluu enemmän

jäysteen poistoon ja kappaleiden irrottamiseen levystä. Leikkaushapen paineen noston myötä kohtisuoruuden, pinnankarheuden arvot paranivat ja kappaleisiin ei jäänyt kuonaa kiinni.

Konfirmaatiokokeiden perusteella leikkausnopeutta saatiin nostettua noin 14 % polttoleikkauksineen siten, että koekappaleen pinnanlaatu ei huonontunut verrattuna ennen opinnäytetyötä leikattavaan pinnanlaatuun. Leikkausnopeuden nosto ei vaikuttanut merkittävästi myöskään kappaleen irtoamiseen tai jäysteen määrään, jolloin kappaleen jälkikäsittelyyn ei kulu ylimääräistä aikaa.

#### **6.4 Mittaustulokset levynpaksuudelle 100 mm**

Kohtisuoruudelle määritetyn toleranssialueen kolme mukaan saadaan kohtisuoruuden maksimiarvoksi 1,4 mm. Mittaustuloksista huomattiin, että kaikki arvot menevät reilusti alle määritetyn maksimiarvon. Mittaustuloksissa ei ole suuria vaihteluita, joten mittaukset ovat onnistuneet hyvin.

Nimellimitoille määritetyn toleranssiluokan kaksi mukaan saadaan Taulukosta 3 suurimmaksi sallituksi vaihteluksi  $\pm 2,6$  mm. Pääsääntöisesti kunkin kokeen mittaustulokset olivat pysyneet keskenään samalla tasolla. Mittaustuloksiin aiheuttaa vaihtelua polttoleikkauksen aloituskohdat. Aloitusnypy muuttaa nimellismittaa, jos se on toisessa mitattavista kulmista. Tämä ei kuitenkaan aiheuta merkittävää mittamuutosta kappaleeseen, koska se hiotaan jäysteen poistossa pois. Näin ollen mittaustulokset ovat hyväksyttäviä.

Pinnankarheudelle maksimiarvoksi saadaan 120  $\mu\text{m}$  Taulukon 4 kaavasta. Pääsääntöisesti mittaustulokset ovat pysyneet samalla tasolla kunkin kokeen osalta. Mittaustuloksiin vaihtelua aiheuttaa leikkauspintaan syntyneet uurteet. Nämä eivät kuitenkaan vaikuta lopputulokseen merkittävästi, joten mittaustulokset ovat luotettavia.

Mittaustuloksista huomataan, että ne alittavat pinnankovuudelle määritetyn maksimiarvon 380. Mittaustuloksissa on vaihtelua, joka johtuu koekappaleiden sijoittelusta. Vaihtelu ei kuitenkaan vaikuta lopputulokseen merkittävästi.

#### 6.4.1 S/N-suhteen laskenta

Saadut mittaustulokset olivat toleranssien määäämissä rajoissa, joten rajoittavaksi tekijäksi osoittautui kappaleen irtoaminen ja jäysteen määrä. Vastetaulukoihin ei huomioida kokeiden yksi, neljä ja seitsemän kokeita, koska koekappaleet jäivät lujaan kiinni levyyn. Tämä pitää ottaa huomioon vastetaulukoita muodostaessa.

Kohtisuoruuden vastetaulukosta huomataan, että kohtisuoruuteen eniten vaikuttavat leikkausnopeus ja -kaasu. Liian suuri leikkausnopeus ja liian suuri leikkauskaasun paine aiheuttaa koveruutta ja aaltomaisuutta leikkauksjälkeen. Kohtisuoruuteen ei vaikuta niin paljon eli leikkaus- ja lämmityshappi. Liian suuri leikkaushapen paine aiheuttaa kovertumaa leikkauspintaan, mutta ei niin voimakkaasti kuin leikkausnopeus ja -kaasu.

Nimellismittojen vastetaulukosta huomataan, että nimellismittoihin eniten vaikuttavat lämmityshappi ja leikkauskaasu. Liian kuumalla liekillä leikattaessa kappaleen yläsärmä sulaa ja samalla kuuma liekki sulattaa leikattavan kappaleen kulmia. Tästä aiheutuu mittapoikkeamaa koekappaleisiin. Nimellismittoihin ei vaikuta niin paljon leikkausnopeus ja -kaasu. Nämä tekijät vaikuttavat enemmän leikkauspinnanlaatuun kuin nimellismittoihin.

Käytetyt leikkausparametrit eivät vaikuta pinnankarheuteen merkittävästä, koska maksimi- ja miniarvon erotus on pieni. Pinnankarheuteen vaikuttaa eniten leikkausnopeus ja lämmityshappi. Liian suurella leikkausnopeudelle leikattaessa polttoleikkauksen palamisreaktio ei ehdi tapahtumaan kunnolla, joka aiheuttaa uurteisuutta koekappaleen leikkauspintaan. Leikkausnopeus ja -kaasu eivät vaikuta pinnankarheuteen merkittävästi. Liian suuri leikkauskaasu aiheuttaa kuumaa liekkiä, joka aiheuttaa uurteita leikkauspintaan. Tehdyissä kokeissa tämä ei vaikuttanut niin paljon kuin leikkausnopeus.

Pinnankovuuteen eniten vaikuttavat lämmityshappi ja leikkauskaasu. Liian suuret lämmityshapen ja leikkauskaasun paineet muodostavat kuumaa liekkiä, joka kuumentaa koekappaletta. Tästä aiheutuu pinnankarkeutumista. Liian pienet paineet näillä tekijöillä taas huonontavat polttoleikkauksen palamisreaktiota, josta aiheutuu leikkauspintaan kovertumia leikkauspintaan. Vähemmän pinnankovuuteen vaikut-



tavat leikkausnopeus ja leikkaushappi. Liian hidaskas leikkausnopeus lämmittää koekappaleita, joka aiheuttaa pinnankarkenemistä, mutta ei niin merkittävästi kuin lämmityshapen ja leikkauskaasun paine.

#### **6.4.2 Optimiarvot**

Optimiarvot nostivat leikkausnopeutta noin 22 %. Leikkaushapen paine on myös noussut, joka mahdollistaa polttoleikkaamisen suuremmalla leikkausnopeudella. Lämmityshapen ja leikkaushapen paineet ovat pysyneet suurin piirtein samalla tasolla kuin mitä ne olivat enne opinnäytetyötä. Konfirmaatio kokeisiin joudutaan tekemään kaasujen paineisiin säätöjä, että saadaan polttoleikkausprosessi tapahtumaan hyvin suuremmalla leikkausnopeudella. Säätöjä joudutaan tekemään, koska Taguchi-menetelmä antaa optimiarvot kun vertaillaan eri mitattavia ominaisuuksia. Tästä johtuen optimiarvot eivät välttämättä ole täysin oikealla tasolla.

#### **6.4.3 Konfirmaatiokokeet**

Taguchi-menetelmällä laskettu optimiarvo on noin 22 % korkeampi kuin ennen opinnäytetyötä ollut leikkausnopeus. Ensimmäinen koekappale leikattiin Taguchi-menetelmän antamilla leikkausarvoilla. Tässä kokeessa koekappale ei lähtenyt helposti irti levystä, koska kuonaa jäi koekappaleen alareunaan kiinni. Toiseen koekappaleeseen nostettiin leikkaushapen painetta 0,5 baaria, jolloin koekappale lähti helposti irti levystä, mutta koekappaleen alareunaan suli kuona kiinni. Kolmanteen koekappaleeseen testattiin, jääkö kuonaa vähemmän kiinni koekappaleen alareunaan, kun lasketaan polttoleikkausnopeutta. Kuona lähti helposti irti, mutta polttoleikkauspöydän tallat olivat huonokuntoisia, joten koekappale ei lähtenyt irti levystä. Tästä syystä päätettiin tehdä vielä kaksi varmistuskoeita. Neljänteen kokeeseen nostettiin polttoleikkausnopeus takaisin kokeen kaksi tasolle ja nostettiin leikkaushapen painetta vielä 0,5 baaria. Tällöin koekappale lähti helposti irti ja kuonaa ei jäänyt niin paljon alareunaan kuin ensimmäisessä ja toisessa kokeessa. Viidennessä kokeessa nostettiin nopeutta noin 29 % alkuperäisestä. Täs-

sä kokeessa koekappale lähti helposti irti ja kuonaa oli yhtä paljon kuin kokeessa neljä.

Käytetyillä polttoleikkausarvoilla päästiin standardien määräämiin rajoihin. Kokeiden yksi ja kaksi tuloksia ei voida huomioida, koska kappaleeseen oli sulanut kuonaa lujaan kiinni. Nimellismitoissa olevat mittaustulosten heitot selittyvät polttoleikkauksen aloituskohdalla ja aloitustavalla. Aloituskohdan ollessa mitattavassa nurkassa, tulee nurkkaan aloitusnyppy ja sen aiheuttamaan mittaheittoon vaikuttaa ohjelmointi vaiheessa tehty lähtö. Pinnankovuuden arvo laski mitä enemmän oli leikkaushapen painetta ja leikkausnopeutta. Kohtisuoruus ja pinnakarheuden arvot pysyivät keskenään samalla tasolla jokaisessa kokeessa.

Tehtyjen konfirmaatiokokeiden perusteella polttoleikkausnopeus nousi noin 29 %. Leikkausnopeuden nosto ei vaikuttanut pinnanlaatuun. Leikkausnopeuden nosto ei myöskään vaikuttanut kuonan määrään ja koekappaleet lähtivät helposti irti levystä.

## **6.5 Taguchi menetelmän soveltuminen polttoleikkaukseen**

Taguchi-menetelmä antaa optimiarvot kokeissa käytetyistä parametreista, joten parametrien määrittelyvaiheessa pitää tietää millä alueella optimiarvot sijaitsevat. Ohjaustekijöiden tasoja määritettäessä tasojen ero ei saa nousta liian suureksi, koska optimiarvojen keskiarvoja laskettaessa saadut tulokset eivät välttämättä ole oikeat, vaan suuntaa-antavat. Toisin sanoen, mitä pienempi tasojen ero on, sitä tarkemmat tulokset Taguchi-menetelmä antaa. Tässä pitää vain huomioida kuinka tarkasti polttoleikkaukset pystytään säätämään. Esimerkiksi tämän työn polttoleikkauksen kaasujen paineita säädettäessä säätötarkkuus on luokkaa 0,1 baaria, joten tässä työssä käytetyt kaasujen paineet ovat olleet hyvällä tasolla.

Onko saadut optimiarvot kuitenkin vain sattumalta oikeansuuntaiset vai ovatko ne parhaat mahdolliset? Konfirmaatiokokeiden perusteella saadut laskennalliset optimiarvot eivät olleet parhaat mahdolliset, koska polttoleikkausnopeutta oli mahdollista nostaa suuremmaksi kuin mitä laskennalliset optimiarvot olivat. Tämä johtuu siitä, että pinnankarheuden, pinnankovuuden ja kohtisuoruuden S/N-suhteiden

laskennassa käytettiin kaavaa, pienempi on parempi. Tällöin optimiarvoilla pyritään saamaan mittaustuloksista mahdollisimman pieni arvo. Parhaimman mahdollisen tuloksen olisi saanut silloin kun edellä mainituille mitattaville ominaisuuksille olisi määritetty tavoitearvo. Tämä selittyy sillä, että Taguchi-menetelmässä mitataan prosessin tai tuotteen vaihtelua eli hävikkiä. Hävikkiä syntyy silloin kun mitattavien ominaisuuksien arvot heittelevät tavoitearvosta. Ennen S/N-suhteiden laskentaa olisi pitänyt määritellä leikkauspinnanlaadulle halutut tavoitearvot, jolloin tulokset olisivat olleet paremmat.

Taguchi-menetelmä on parhaimmillaan silloin kun ohjaustekijöitä ja lopputulokseen vaikuttavia häiriötekijöitä on paljon, jolloin kokeiden määrä saadaan pidettyä pienempänä verrattuna perinteiseen menetelmään. Perinteisessä menetelmässä muutetaan yhtä ohjaustekijää kerralla, jolloin kokeita tulee paljon. Perinteisellä menetelmällä olisi varmasti päästy samaan lopputulokseen, mutta se olisi vaatinut paljon aikaa testata eri variaatioita polttoleikkauskoneella. Kokeet täytyi tehdä tuotannon ohella, joten koekappaleiden polttoleikkaamiseen ei saa kuluttaa paljon aikaa. Taguchi-menetelmä onkin parempi kuin perinteinen menetelmä, koska kokeet suunniteltiin etukäteen ja mittaukset koekappaleisiin tehtiin kun kaikki koekappaleet oli leikattu.

Taguchi-menetelmää käytettäessä aikaa kuluu paljon kokeiden suunnitteluun, koekappaleiden mittaamiseen sekä optimiarvojen laskentaan. Tuotannon ohella kokeita tehdessä pitää olla etukäteen selvillä mitä tehdään, jolloin saadaan minimoitua koekappaleiden polttoleikkaamiseen käytetty aika. Polttoleikkauksessa leikkausjälkeen vaikuttavat kaikki polttoleikkausparametrit. Olisikin todella hankalaa yrittää perinteisellä menetelmällä analysoida pinnankovuuden, pinnankarheuden, kohtisuoruuden ja nimellismittojen mittaustuloksia siten, että kaikki mitattavat ominaisuudet olisivat parhaat mahdolliset. Tämä olisi vienyt paljon kauemman aikaa kuin mitä siinä meni Taguchi-menetelmällä. Näistä syistä Taguchi-menetelmä soveltuu polttoleikkaukseen hyvin.

## 7 YHTEENVETO JA POHDINTA

Tämän työn tarkoituksena oli tutustua Taguchi-menetelmään ja kuinka sitä sovelletaan polttoleikkaukseen. Aluksi tutustuttiin polttoleikkauksen teoriaan, jossa pääpainona oli selvittää mistä syntyy leikkausvirheet ja mitkä tekijät vaikuttavat leikkauspinnanlaatuun. Tämän jälkeen selvitettiin mikä on Taguchi-menetelmä ja kuinka sitä pystytään soveltamaan polttoleikkaukskoneella. Taguchi-menetelmän tärkein vaihe on parametrisuunnittelu, jossa määritetään ohjaustekijöille tasot sekä valitaan ohjaustekijöiden tasojen mukaan oikea matriisi.

Ensimmäisen tavoitteena oli nostaa polttoleikkauksen nopeutta niin, että säätöjen jälkeen leikatut kappaleet ovat standardien määrittelemissä rajoissa. Tähän tavoitteeseen päästiinkin jokaisessa testattavassa levynpaksuudessa, paitsi levynpaksuudessa 40 mm. Levynpaksuuden 40 mm optimiarvoja ei pystytty laskemaan, koska leikkaushapen paineet olivat ohjaustekijöiden tasoja määritettäessä yhden baarin liian alhaiset. Tämä aiheutti leikkauksen jälkeen paljon leikkausvirheitä, sekä koekappaleet jäivät liian lujaan levyyn kiinni. Toisena tavoitteena oli optimoida leikkauskaasut ja etsiä niistä mahdollisia säästöjä. Leikkauskaasujen paineita ei pystytty alentamaan, koska leikkauksen nopeuden noustessa täytyy leikkauskaasujen paineetkin nousta oikeassa suhteessa. Leikkauskaasuista saatavat säästöt tulevatkin kun leikkauksaika on lyhyempi suuremmasta leikkauksen nopeudesta johtuen. Kolmantena tavoitteena oli tehdä polttoleikkaajille leikkausparametritaulukko, jota he hyödyntävät polttoleikatessa. Leikkausparametritaulukosta saatiin selkeä ja helposti luettava, josta selviää myös eri levynpaksuuksille käytettävät suuttimet. Näin on helpompi kouluttaa uusia työntekijöitä polttoleikkaukskoneelle, kun on selkeä taulukko, josta näkee käytettävät suuttimet ja leikkausparametrit.

Polttoleikkauksesta tärkeintä on tietää mistä johtuvat leikkausvirheet ja mitkä tekijät vaikuttavat leikkauspinnanlaatuun. Yleisimmät leikkausvirheet syntyvät likaisista tai huonokuntoisista leikkaussuuttimista, sekä väärästä leikkauskorkeudesta. Polttoleikkauksen nopeutta nostamalla on tärkeintä löytää leikkauksen nopeudelle ja leikkaushapen paineelle sellaiset arvot, että polttoleikkauksen prosessi saadaan tapahtumaan kunnolla. Lämmityshapen ja leikkauskaasun paineilla säädetään liekki niin,

että lämpöä siirtyy riittävästi leikkausrailoon. Polttoleikkausliekki ei saa olla liian kuuma ettei kappaleen yläsärmä sula.

Taguchi-menetelmässä pystytään käsittelemään suuri määrä muuttujia pienellä määrällä kokeita. Tällöin puhutaan monimuuttujakokeista, joissa muutetaan useampaa muuttujaa kerralla, jolloin kokeiden määrä saadaan pieneksi. Taguchi-menetelmässä pitää määrittää tuotteelle tai prosessille tavoitearvo, jota tavoitellaan. Hävikkiä aiheutuu vaihtelusta kun ei päästä tavoitearvoon. Taguchi-filosofia on ajattelutapa, jossa asiakkaalle aiheutuu hävikkiä tuotteen tai prosessin muutoksista. Prosessi ja tuotteet pitää suunnitella niin, että ne ovat immuuneja hallitsemattomille muutoksille.

Taguchi-menetelmän soveltaminen alkaa systeemis suunnittelulla, jossa määritetään mitä tuotekehitys vaihetta aletaan parantaa. Polttoleikkauksessa keskitytään tuotannonsuunnitteluun. Tämän jälkeen siirrytään Taguchi-menetelmän tärkeimpään vaiheeseen eli parametrisuunnittelu. Ensimmäiseksi täytyy selvittää mitkä ovat polttoleikkauksen ohjaustekijät ja häiriötekijät. Ohjaustekijöitä ovat leikkaushapen, lämmityshapen ja leikkauskaasun paine, sekä leikkausnopeus. Nämä valittiin ohjaustekijöiksi, koska niillä säädetään polttoleikkaukskone ja ne vaikuttavat polttoleikkaukskoneen leikkausjälkeen. Ohjaustekijöille määritettiin kolme tasoa yhdessä polttoleikkaajien kanssa. Häiriötekijöitä ei ollut, koska levyn lämpötila ei vaikuta merkittävästi leikattaessa S355 terästä. Leikattavat levyt myös hiekkapuhallettiin ennen leikkausta, jolloin saadaan levynpinnan epäpuhtaudet pois. Ohjaustekijöiden ja häiriötekijöiden määritysten jälkeen valittiin oikea matriisi, joka valittiin ohjaustekijöiden ja niille määritettyjen tasojen perusteella. Matriisiksi valikoitui L9-matriisi, koska siinä on neljälle ohjaustekijälle kolme eri tasoa, jolloin kokeiden määräksi tulee yhdeksän.

Taguchi-menetelmän viimeinen vaihe on toleranssisuunnittelu, jossa määritetään kokeille toleranssit. Kokeiden toleranssit valittiin standardien SFS EN 1090-2 ja EN ISO 9013 mukaan, koska yrityksessä polttoleikkauksen laatu perustuu näihin standardeihin. Näitä standardeja hyödyntäessä toleranssisuunnittelussa saadaan sellaiset polttoleikkausparametrit, joilla pinnanlaatu täyttää laatujärjestelmän vaatimukset.

Mittaustuloksia analysoidessa huomattiin, että kaikki koekappaleet menivät standardien määrittelemiін rajoihin. Mittaustuloksiin ei tullut merkittäviä eroavaisuuksia, kun verrataan kustakin levynpaksuudesta polttoleikattuja koekappaleita keskenään. Optimiarvoja laskettaessa rajoittavaksi tekijäksi osoittautuikin koekappaleiden irtoaminen levystä ja jäysteen määrä. Kappaleiden jäädessä levyyn kiinni tulee siitä lisää työtä polttoleikkaajalle ja levyn purkaminen hidastuu. Jäysteen määrän lisääntyessä kappaleiden jälkikäsitelyaika pitenee, jolloin polttoleikkauksen nostosta ei ole hyötyä. Nämä tekijät huomioitiin optimiarvoja laskettaessa.

Optimiarvojen laskennan jälkeen tehtiin konfirmaatiokokeet, joilla tarkastettiin tulosten paikkansa pitävyys. Konfirmaatiokokeiden jälkeen tehtiin koekappaleille standardien määrittelemät mittaukset, joista huomattiin, että kaikki konfirmaatiokokeiden mittaustulokset olivat standardien määrittelemissä rajoissa. Taguchi-menetyllä saadut optimiarvot ovat laskennallisia, joten optimiarvoja jouduttiin hienosäätämään niin, että saadaan polttoleikkausprosessi tapahtumaan kunnolla.

Levynpaksuuden 25 mm leikkausnopeutta saatiin nostettua noin 15 % huonontamatta ennen opinnäytetyötä polttoleikattua pinnanlaatua. Levynpaksuudelle 40 mm ei pystytty laskemaan optimaalisia arvoja, koska parametrisuunnitteluvaiheessa leikkaushapen paineiksi määritettiin yhden baarin liian pienet arvot. Tästä syystä leikkausjälki oli huonoa ja kappaleet jäivät lujaan kiinni levyyn. Levynpaksuuden 50 mm polttoleikkausnopeutta pystyttiin nostamaan noin 14 % huonontamatta leikkauspinnan laatua. Levynpaksuuden 100 mm leikkausnopeutta pystyttiin nostamaan 29 % huonontamatta leikkauspinnanlaatua. Eri paksuuksien polttoleikkausnopeutta saatiin nostettua prosentteissa eri määrä, koska ohuemmissa polttoleikkausnopeus on suurempi, jolloin prosenttiosuus pienenee.

Taguchi-menetyllä eniten aikaa kuluu parametrisuunnitteluvaiheeseen, koekappaleiden mittaamiseen ja mittaustulosten analysointiin. Näin pystytään tekemään tarvittavat kokeet tuotannon ohella, eikä aikaa kulu paljon polttoleikkaamiseen ja oikeiden arvojen hakemiseen. Taguchi-menetyllä soveltuu hyvin polttoleikkauksen polttoleikkausparametrien optimointiin, koska muuttujia on paljon ja leikkausvirheisiin vaikuttaa moni tekijä yhtä aikaa.

## LÄHTEET

- Cimbala John M. 2014. Taguchi Orthogonal Arrays. [www-dokumentti]. Penn State University. [viitattu 28.10.2015]. Saatavissa: [https://www.mne.psu.edu/me345/Lectures/Taguchi\\_orthogonal\\_arrays.pdf](https://www.mne.psu.edu/me345/Lectures/Taguchi_orthogonal_arrays.pdf)
- Ferrum Steel Oy työntekijät. 2015. Ferrum Steel Oy. Haastattelu 15.10.2015
- Ferrum Steel Oy. Ei päiväystä. [www-dokumentti]. [Viitattu 13.11.2015]. Saatavissa: <http://www.ferrumsteel.fi/>
- Galvetry, W. & Marlow, F. 2000. Welding essentials questions and answers. New York: Industrial Press inc.
- Karjalainen, Eero. 1999. Tuotteen ja Prosessin optimointi koesuunnittelulla taguchi-menetelmä. 2. P. Metalliteollisuuden keskusliitto, Helsinki
- Hirvonen, E. Koiranen, E. Lammassaari, A. Pousi, L. 1976. Metallialan perusoppi 4. Keuruu: Kustannusosakeyhtiö Otavan painolaitokset.
- Korkiakoski, E. 2009. Savonlinnan aikuisopiston poltto- ja plasmaleikkauslaitteiston kehittäminen. [Opinnäytetyö]. Mikkeli: Mikkelin ammattikorkeakoulu. [Viitattu 30.11.2015]. Saatavana: <http://theseus.fi/handle/10024/7423>
- Lepola, P. & Makkonen, M. 2001. Hitsaus ja teräsrakenteet. 3. P. Porvoo: WS Bookwell Oy.
- Linna Trade. Linna trade industrial metalworking tools. [www-dokumentti]. [Viitattu 27.11.2015]. Saatavissa: <http://www.linnatrade.fi/mittarit/innovatest-pinnankarheusmittari-tr-110.html>
- Mattila, T. & Lakso, T. 1997. Termisten leikkausmenetelmien ja vesisuihkuleikkauksen nykytila ja sovelluspotentiaali teollisuudessa. Lappeenranta: LTKK monistuspalvelu.
- Männikkö, J. Hyssy, E. Karjalainen, V. Muhonen, O. Rinkari, M. Salminen, K. 1990. Polttoleikkaus. Helsinki: Valtion painatuskeskus
- Ranjit K, Roy. 2010. Primer on the Taguchi Method. 2. P. [www-dokumentti]. Society of Manufacturing Engineers (SME). Saatavissa: [https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpPTME0001/viewerType:toc/root\\_slug:primer-on-the](https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpPTME0001/viewerType:toc/root_slug:primer-on-the)

Sandvik Coromat. Pintojen mittaus. [www-dokumentti]. [Viitattu 27.11.2015]. Saatavissa: [http://www.sandvik.coromant.com/fi-fi/knowledge/materials/measuring\\_surfaces?Country=fi](http://www.sandvik.coromant.com/fi-fi/knowledge/materials/measuring_surfaces?Country=fi)

SFS-EN 1090-2 + A1. 2012. Teräs- ja alumiinirakenteiden toteutus. Osa2: Teräs-rakenteita koskevat tekniset vaatimukset. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

SFS-EN ISO 9013. 2003. Terminen leikkaus. Termisesti leikattujen pintojen luokittelu. Geometrisesti tuotemäärittelyt ja laatutoleranssit. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

TeknoNDT. 2015. NDT-Tukku.[www-dokumentti]. [Viitattu 27.11.2015]. Saatavissa: [http://www.ndt-tukku.com/product\\_details.php?p=331](http://www.ndt-tukku.com/product_details.php?p=331)

Wang, John X. 2005. Engineering Robust Design with six sigma. Upper Saddle River; Prentice Hall.