



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM141585

STUDI NUMERIK DISTRIBUSI TEMPERATUR DAN OPTIMASI PARAMETER PROSES PADA FRICTION STIR WELDING PLAT ALUMINIUM ALLOY

MUHAMMAD IQBAAL
NRP. 02111645000038

Dosen Pembimbing
Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T.

Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - TM141585

**STUDI NUMERIK DISTRIBUSI TEMPERATUR
DAN OPTIMASI PARAMETER PROSES PADA
FRICTION STIR WELDING PLAT ALUMINIUM
ALLOY**

MUHAMMAD IQBAAL
NRP. 02111645000038

Dosen Pembimbing
Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T.

Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT – TM141585

***NUMERICAL STUDY ON HEAT
DISTRIBUTION AND OPTIMIZATION OF
PARAMETER PROCESS ON FRICTION
STIR WELDING ON ALUMINIUM ALLOY
PLATES***

**MUHAMMAD IQBAAL
NRP. 02111645000038**

**Advisor Lecturer:
Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T.**

**Department of Mechanical Engineering
Faculty Of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2018**

STUDI NUMERIK DISTRIBUSI TEMPERATUR DAN OPTIMASI PARAMETER PROSES PADA FRICTION STIR WELDING PLAT ALUMINIUM ALLOY

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

MUHAMMAD IQBAAL

NRP. 021116 45 000038

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Ir. Julendra B. Ariatedja, MT (Pembimbing)
NIP. 196807061999031004
2. Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA (Penguji I)
NIP. 196508101991021001
3. Achmad Syaifudin, ST., M.Eng., PhD (Penguji II)
NIP. 197909262005011001
4. Latifah Nurahmi, ST., M.Sc., PhD (Penguji III)
NIP. 1986201712037

SURABAYA

JULI, 2018

STUDI NUMERIK DISTRIBUSI TEMPERATUR DAN OPTIMASI PARAMETER PROSES PADA FRICTION STIR WELDING PLAT ALUMINIUM ALLOY

Nama : Muhammad Iqbaal
NRP : 0211164500038
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Julendra B. Ariatedja, M.T.

ABSTRAK

Friction stir welding adalah proses pengelasan yang dapat menghasilkan sambungan yang berkualitas tinggi dengan biaya yang murah dikarenakan tidak menggunakan *filler* sebagai input panas. Proses ini mendapatkan input panas dari tekanan tool yang berputar sehingga panas dihasilkan akibat gesekan pada benda kerja. Pada *friction stir welding*, panas merupakan salah satu parameter penting yang menentukan kualitas dari sambungan yang dibuat. Semakin tinggi panas yang dihasilkan semakin sempurna pencairan logam yang terjadi sehingga mempengaruhi kerapatan hasil pengelasan. Temperatur maksimum yang timbul pada proses *FSW* berkisar antara 70 sampai 90% dari temperatur leleh material yang dilas.

Pada penelitian ini, studi pengaruh dan optimasi dari variasi parameter proses terhadap temperatur maksimum yang terjadi pada titik akhir dari daerah pengelasan *friction stir welding* telah dilakukan dengan menggunakan parameter proses berupa kecepatan putar (N), kecepatan las (V) dan tekanan tool (P). Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software* ANSYS *workbench* 18.1. Material yang digunakan yaitu *aluminium alloy* untuk plat dan *structural steel* untuk tool. Desain dan optimasi hasil dari simulasi menggunakan metode taguchi, dan untuk memprediksi tingkat pengaruh yang signifikan dalam menghasilkan temperatur maksimum menggunakan *software* minitab 18.

Dari hasil penelitian, diperoleh jika semakin tinggi nilai parameter proses kecepatan putar, kecepatan las dan tekanan tool maka temperatur yang dihasilkan akan semakin tinggi. Berdasarkan metode taguchi, tekanan merupakan parameter proses yang memiliki pengaruh yang paling signifikan terhadap temperatur maksimum yang dihasilkan. Nilai temperatur yang optimal didapat dengan mengatur nilai parameter proses $N = 30$ Rpm, $V = 420$ mm/s dan $P = 320$ Mpa.

Kata kunci: *Friction Stir Welding, ANSYS Workbench, Studi Numerik, Pengelasan, Distribusi Temperatur, Metode Taguchi*

NUMERICAL STUDY ON HEAT DISTRIBUTION AND OPTIMIZATION OF PROCESS PARAMETER ON FRICTION STIR WELDING ON ALUMINIUM ALLOY PLATES

Name : Muhammad Iqbaal
NRP : 0211164500038
Departemen : Teknik Mesin FTI-ITS
Advisor Lecturer : Ir. Julendra B. Ariatedja, M.T.

ABSTRACT

Friction stir welding is a welding process that can produce high quality connections at a low cost because it does not use filler as a heat input. This process gets the heat input from the rotating tool pressure so that heat is generated due to friction on the workpiece. In friction stir welding, heat is one of the important parameters that determine the quality of the welded material. The higher the heat, the more perfect the melting of the metal occurs, thus affecting the welding density. The maximum temperature generated in the FSW process ranges from 70 to 90% of the melting temperature of the welded material.

In this study, the influence and optimization based on the variation of process parameter to the maximum temperature that occurred at the end point of the friction stir welding area has been done using process parameters such as rotation speed (N), welding speed (V) and pressure tool (P). The simulation is done using ANSYS workbench 18.1 software. Materials used are aluminum alloy for plate and structural steel for tool. The design and optimization of the results of the simulation using the taguchi method, and to predict a significant level of influence in generating the maximum temperature using minitab 18 software.

From the research results, obtained if the higher the value of the process parameter rotation speed, welding speed and tool pressure then the resulting temperature will be higher. Based on

the taguchi method, pressure is the process parameter having the most significant effect on the maximum temperature produced. Optimum temperature values obtained by setting the value of process parameters $N = 30$ Rpm, $V = 420$ mm/s and $P = 320$ Mpa .

Keywords: *Friction Stir Welding, ANSYS Workbench, Numerical Study, Welding, Heat Distribution, Taguchi Method*

KATA PENGANTAR

Assalamu 'alaikum Wr. Wb

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia Nya sehingga dapat terselesaikannya tugas akhir ini dengan baik. Tidak lupa shalawat serta salam selalu tercurahkan kepada junjungan Nabi Muhammad SAW dan para keluarga serta sahabat dan umatnya hingga akhir zaman. Amiin.

Tugas Akhir ini ditulis sebagai salah satu prasyarat kelulusan sebagai mahasiswa S-1 Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Berkenaan dengan tugas akhir yang telah selesai ini, penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan bantuan dan kerjasamanya, khususnya kepada:

1. Ibu, Bapak dan saudara yang senantiasa memberikan dukungan dan doa.
2. Bapak Ir. Julendra Bambang Ariatedja, MT. selaku dosen pembimbing yang selalu memberikan arahan, nasehat, dan masukan dalam pengerjaan penelitian Tugas Akhir ini.
3. Bapak Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA, Bapak Achmad Syaifudin, ST, M.Eng, PhD dan Ibu Latifah Nurahmi, ST, Msc, PhD selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan masukan kepada penulis.
4. Bapak Dr.Eng. Unggul Wasiwitono, ST, M.Eng.Sc., selaku dosen wali yang telah memberikan arahan, motivasi, dan bantuan kepada penulis selama masa perkuliahan pada tahap Sarjana.
5. Seluruh dosen serta karyawan di Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS yang telah banyak sekali membantu penulis dalam hal akademis dan hal non akademis.
6. Seluruh teman-teman anggota Kabinet Komting ITS yang telah memberi motivasi dan dukungannya selama pengerjaan tugas akhir ini.

7. Seluruh teman-teman anggota laboratorium mekanika benda padat yang telah menjadi partner dan teman selama pengerjaan tugas akhir ini.
8. Seluruh teman-teman Lintas Jalur 2016 yang selalu menjadi kawan bagi penulis hingga kapanpun.
9. Semua pihak lainnya yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, berkat keterlibatannya lah penulis dapat mencapai pencapaian sejauh ini.

Penulis menyadari bahwa pada Tugas Akhir ini masih terdapat beberapa kekurangan yang disebabkan oleh keterbatasan kemampuan diri dari penulis. Oleh karena itu dengan segala rasa hormat dan rendah hati penulis mohon masukan dan kritiknya, baik untuk penelitian Tugas Akhir ini ataupun untuk diri penulis sendiri. Akhir kata, semoga penelitian ini menjadi sesuatu yang berguna bagi seluruh umat manusia dan masyarakat Indonesia khususnya. Amiin.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Terdahulu	5
2.1.1 Penelitian Terdahulu 1	5
2.1.2 Penelitian Terdahulu 2	6
2.2 <i>Friction Stir Welding</i>	7
2.2.1 Prinsip Kerja	8
2.2.2 Siklus Proses	10
2.2.3 <i>Heat Flux</i>	11
2.2.4 Parameter-Parameter Proses	14
2.2.5 Mikrostruktur	16
2.2.6 Kelebihan dan Kekurangan	17
2.2.7 Aplikasi	18
2.2.8 Distribusi Temperatur	20
2.3 <i>Finite Element Method</i>	21
2.3.1 <i>Transient Structural</i>	22
2.3.2 Prosedur Dasar	22
2.4 Metode Taguchi	24
2.4.1 Tabel Orthogonal	25

2.4.2 Analisis Rasio S/N	26
BAB III. METODOLOGI	27
3.1 Diagram Alir Proses Penelitian	27
3.2 Prosedur Penelitian.....	29
3.3 Penentuan Variabel Proses	32
3.4 Diagram Alir Simulasi	33
3.5 Prosedur Simulasi.....	34
3.6 Simulasi Jurnal Terdahulu.....	40
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	43
4.1 Spesifikasi Plat dan Tool.....	43
4.2 Pengaruh Variasi Kecepatan Putar Tool.....	44
4.2.1 Variasi Kecepatan Putar 10 Rpm	44
4.2.2 Variasi Kecepatan Putar 20 Rpm	45
4.2.3 Variasi Kecepatan Putar 30 Rpm	46
4.2.4 Perbandingan Trendline Ketiga Variasi Kecepatan Putar	47
4.3 Pengaruh Variasi Tekanan Tool	49
4.3.1 Variasi Tekanan Tool 280 Mpa.....	49
4.3.2 Variasi Tekanan Tool 300 Mpa.....	50
4.3.3 Variasi Tekanan Tool 320 Mpa.....	51
4.3.4 Perbandingan Trendline Ketiga Variasi Tekanan Tool	52
4.4 Pengaruh Variasi Kecepatan Pengelasan.....	54
4.4.1 Variasi Kecepatan Pengelasan 380 mm/s	54
4.4.2 Variasi Kecepatan Pengelasan 400 mm/s	55
4.4.3 Variasi Kecepatan Pengelasan 420 mm/s	56
4.4.4 Perbandingan Trendline Ketiga Variasi Kecepatan Pengelasan	57
4.5 Optimasi Parameter Proses dengan Metode Taguchi..	59
4.5.1 Parameter dan Level.....	59
4.5.2 Pemilihan <i>Array Orthogonal</i>	60
4.5.3 Pembahasan Hasil	61
4.5.4 Konfirmasi Parameter Proses yang Berpengaruh Signifikan	64

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN.....	67
5.1 Kesimpulan	67
5.2 Saran	68
DAFTAR PUSTAKA	69
BIODATA PENULIS.....	69

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Rancangan Tool.....	7
Gambar 2.2 Prinsip Kerja <i>FSW</i> Pada <i>Butt Joint</i>	9
Gambar 2.3 Pencekaman Material Benda Kerja	9
Gambar 2.4 Siklus Proses <i>FSW</i>	10
Gambar 2.5 Kondisi Batas dan <i>Flux</i> Panas.....	13
Gambar 2.6 Gerakan Probe	14
Gambar 2.7 Desain Pin Tools.....	16
Gambar 2.8 Mikrostruktur Hasil Pengelasan <i>FSW</i>	17
Gambar 2.9 Kapal Pesiar <i>The World</i>	18
Gambar 2.10 Aplikasi <i>FSW</i> dalam Industri Otomotif.....	19
Gambar 2.11 <i>Central Panel</i> dari Ford GT	20
Gambar 2.12 Distribusi Temperatur pada Pengelasan <i>FSW</i>	21
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	28
Gambar 3.2 Diagram Alir Simulasi	33
Gambar 3.3 Tipe Analisa.....	34
Gambar 3.4 Input Geometri pada ANSYS	34
Gambar 3.5 <i>Input Properties Material</i>	35
Gambar 3.6 <i>Input Commands</i>	35
Gambar 3.7 Penerapan Perkontakan.....	36
Gambar 3.8 Pembuatan Mesh.....	37
Gambar 3.9 Menentukan <i>Time Steps</i>	38
Gambar 3.10 Pemberian <i>Load</i>	38
Gambar 3.11 <i>Insert Joint-Velocity</i>	39
Gambar 3.12 <i>Insert Joint-Rotational Velocity</i>	39
Gambar 3.13 Eksekusi Hasil	40
Gambar 4.1 Dimensi Plat	43
Gambar 4.2 Dimensi Tool yang Disederhanakan	44
Gambar 4.3 Grafik Variasi Kecepatan Putar 10 Rpm.....	44
Gambar 4.4 Grafik Variasi Kecepatan Putar 20 Rpm.....	45
Gambar 4.5 Grafik Variasi Kecepatan Putar 30 Rpm.....	46

Gambar 4.6 Perbandingan Trendline Ketiga Variasi Kecepatan Putar	47
Gambar 4.7 Grafik Variasi Tekanan Tool 280 Mpa	49
Gambar 4.8 Grafik Variasi Tekanan Tool 300 Mpa	50
Gambar 4.9 Grafik Variasi Tekanan Tool 320 Mpa	51
Gambar 4.10 Perbandingan Trendline Ketiga Variasi Tekanan Tool	52
Gambar 4.11 Grafik Variasi Kecepatan Pengelasan 380 mm/s ..	54
Gambar 4.12 Grafik Variasi Kecepatan Pengelasan 400 mm/s ..	55
Gambar 4.13 Grafik Variasi Kecepatan Pengelasan 420 mm/s ..	56
Gambar 4.14 Perbandingan Trendline Ketiga Variasi Kecepatan Pengelasan	57
Gambar 4.15 Grafik <i>Main Effect</i> dari Ketiga Variasi Parameter Proses	62
Gambar 4.16 Hasil Eksperimen Simulasi Menggunakan Parameter Proses yang Optimum.....	63
Gambar 4.17 Konfirmasi Perbandingan Ketiga Variasi Tekanan Tool	64

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Contoh Tabel Orthogonal dengan 2 level	26
Tabel 3.1 Parameter <i>FSW</i>	41
Tabel 4.1 Distribusi Temperatur dan Persentase Titik Leleh Material dari Ketiga Variasi Kecepatan Putar	48
Tabel 4.2 Distribusi Temperatur dan Persentase Titik Leleh Material dari Ketiga Variasi Tekanan Tool	53
Tabel 4.3 Distribusi Temperatur dan Persentase Titik Leleh Material dari Ketiga Variasi Kecepatan Pengelasan .	58
Tabel 4.4 Tingkat Parameter <i>Friction Stir Welding</i> yang Digunakan	59
Tabel 4.5 Total Derajat Kebebasan Parameter dan Level	60
Tabel 4.6 Rancangan Percobaan	60
Tabel 4.7 Hasil Simulasi dan Rasio S/N berdasarkan Metode Taguchi	61
Tabel 4.8 <i>Main Effect</i> dari Ketiga Variasi Parameter Proses	62
Tabel 4.9 Perbandingan Nilai Gradien Garis dari Ketiga Parameter Proses	65

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan perkembangan teknologi yang sangat pesat, dunia industri tidak dapat dilepaskan dari peran penting pengelasan. Pengelasan adalah penyambungan setempat antara dua buah logam atau lebih dengan memanfaatkan energi panas. Penggunaan pengelasan sangat luas, mulai dari penyambungan pada konstruksi bangunan, perakitan otomotif dan penambangan. Proses pengelasan dibagi menjadi dua kelompok, yaitu *Liquid State Welding (LSW)* dan *Solid State Welding (SSW)*. *LSW* adalah proses pengelasan logam dengan cara mencairkan dua buah logam induk secara bersamaan, sedangkan *SSW* merupakan proses pengelasan logam yang dilakukan pada kondisi logam induk tidak mencapai titik leburnya pada saat tersambung. Salah satu metode *SSW* ini adalah pengelasan adukan gesek / *Friction stir welding (FSW)*.

Friction stir welding (FSW) adalah suatu proses pengelasan solid state welding yang ditemukan di *TWI (The Welding Institute)* oleh Wayne Thomas tahun 1991. *FSW* merupakan metode pengelasan yang input panasnya didapatkan antara gesekan *probe* dengan material yang dilas, pengelasan ini tidak menggunakan *filler material*. Mayoritas panas yang dihasilkan dari gesekan yang terjadi, yaitu sekitar 95% ditransfer ke benda kerja dan hanya 5% mengalir ke *tool*. Temperatur maksimum yang dihasilkan dari proses *FSW* berkisar antara 70 sampai 90% dari temperatur leleh material yang dilas dan lebih aman bagi lingkungan karena pada saat proses pengelasan tidak terbentuk percikan, uap maupun silauan busur panas yang dapat merusak mata.

Penggunaan *friction stir welding* sudah banyak diaplikasikan dalam dunia industri, biasanya diaplikasikan untuk menyambungkan material aluminium dan paduannya. Di negara maju telah mengaplikasikan pengelasan *FSW* ini pada industri

pembuatan kapal, kereta api, pesawat terbang, pesawat luar angkasa, bahkan di dunia otomotif pun sudah mengaplikasikan metode pengelasan ini.

Pada *Friction stir welding*, panas merupakan salah satu parameter penting yang timbul akibat gesekan antara tool dengan benda kerja dimana dapat menentukan kualitas dari hasil pengelasan. Selama proses pengelasan berlangsung, laju penyebaran panas sangatlah cepat sehingga untuk memperoleh data mengenai distribusi temperatur tidaklah mudah terutama pada sekitar bagian tool yang berputar. Oleh karena itu, untuk mendapatkan kualitas hasil pengelasan *fsw* yang baik, pada penelitian ini penulis menggunakan simulasi numerik menggunakan *software ANSYS workbench 18.1* untuk memodelkan proses pengelasan *fsw* sehingga distribusi temperatur sepanjang proses pengelasan dapat diperoleh.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan utama yang penting dikaji dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh parameter proses kecepatan putar tool terhadap distribusi temperatur pada *friction stir welding* ?
2. Bagaimana pengaruh parameter proses kecepatan pengelasan terhadap distribusi temperatur pada *friction stir welding* ?
3. Bagaimana pengaruh parameter proses tekanan tool terhadap distribusi temperatur pada *friction stir welding* ?
4. Bagaimana mendapatkan parameter proses yang memiliki pengaruh paling signifikan terhadap temperatur maksimum yang dihasilkan pada *friction stir welding* ?
5. Bagaimana mendapatkan nilai temperatur yang optimal dari eksperimen simulasi dengan metode taguchi ?

1.3 Batasan Masalah

Mengingat luasnya permasalahan pada pengelasan, maka harus dilakukan pembatasan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini, termasuk cara penelitian dan proses-proses

pengujian yang dilakukan, batasan masalah tersebut antara lain sebagai berikut:

1. Jenis Pengelasan yang digunakan adalah *friction stir welding (FSW)*
2. Metode analisa menggunakan *finite element*
3. Analisis dan simulasi menggunakan program *software ANSYS workbench 18.1*
4. Kedua permukaan material diasumsikan rata pada saat proses pengelasan
5. Proses simulasi pengelasan dilakukan dalam pemodelan bentuk yang sederhana
6. Proses pengelasan dilakukan pada temperatur kamar 27°C (300K)
7. Kontak kedua benda kerja pada saat proses pengelasan dianggap simetri

1.4 Tujuan

Dalam melakukan penelitian ini ada beberapa tujuan yang dapat dirumuskan dan yang ingin dicapai, yaitu:

1. Mengetahui pengaruh parameter proses kecepatan putar tool terhadap distribusi temperatur *friction stir welding*
2. Mengetahui pengaruh parameter proses kecepatan pengelasan terhadap distribusi temperatur *friction stir welding*
3. Mengetahui pengaruh parameter proses tekanan tool untuk pengelasan terhadap distribusi temperatur *friction stir welding*
4. Mengetahui parameter proses yang memiliki pengaruh signifikan terhadap temperatur maksimum yang dihasilkan pada *friction stir welding*
5. Mendapatkan nilai temperatur yang optimal dari eksperimen simulasi dengan metode taguchi

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini baik untuk penulis, masyarakat luas dan dunia pendidikan antara lain yaitu :

1. Sebagai referensi untuk penelitian selanjutnya terutama pengelasan *friction stir welding*
2. Memperluas wawasan terhadap ilmu pengetahuan pada bidang teknik pengelasan
3. Memberikan informasi teknik pengelasan aluminium yang lebih efektif dan efisien
4. Memahami prosedur dasar simulasi numerik *friction stir welding* menggunakan *software ANSYS Workbench 18.1*

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

2.1.1. Penelitian Terdahulu 1

Tunas Dewantara melakukan analisa sifat mekanik dan struktur makro pada *FSW* dengan menggunakan plat aluminium seri 5083. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui temperatur pada saat penyambungan aluminium dan pengaruh bahan aluminium tersebut terhadap pengujian mekanik diantaranya kekuatan tarik, kekerasan dan foto makro.

Berdasarkan hasil pengujian tarik yang telah dilakukan, didapat nilai kekuatan tarik rata-rata pada temperatur pengelasan 160°C adalah 56,37 MPa, temperatur pengelasan 180°C adalah 68,67 MPa, temperatur pengelasan 200°C adalah 81,95 MPa.

Dapat diketahui bahwa kekuatan tarik terbesar terdapat pada temperatur 200°C yaitu sebesar 81,95 MPa dan yang terendah pada temperatur 160°C yaitu sebesar 56,37 Mpa.

Hal ini disebabkan karena semakin tinggi panas yang dihasilkan semakin sempurna pencairan logam aluminiumnya, sehingga mempengaruhi kerapatan hasil pengelasan. Sedangkan pada temperatur 160°C nilai kekerasan lebih kecil dibanding dengan variasi lainnya, karena pada temperatur 160°C panas yang dihasilkan rendah, dan temperatur 200°C mempunyai nilai kekerasan yang paling besar, karena panas yang dihasilkan pencampuran logam saat pengelasan terjadi sempurna sehingga semua rongga daerah pengelasan terisi semua.

Dari hasil foto mikroskop USB dapat dilihat bahwa pada pengelasan 160°C terlihat bahwa foto makro hasil lasan lebih kasar. Hal ini disebabkan panas yang dibutuhkan kurang maksimal. Sedangkan pada pengelasan dengan temperatur

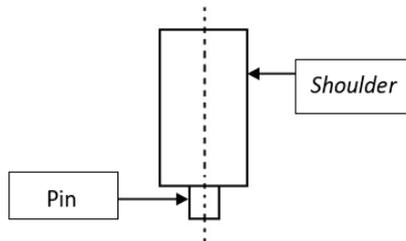
200°C terlihat struktur hasil lasan lebih halus dari pada variasi lainnya.

2.1.2. Penelitian Terdahulu 2

Jarot Wijayanto dan Aghda Anelis (2010), rancangan *tool* adalah faktor yang sangat mempengaruhi kualitas hasil lasan, karena rancangan *tool* yang tepat dapat meningkatkan kualitas las dan kecepatan las semaksimal mungkin. Temperatur maksimum yang dihasilkan dari gesekan *tool* dan material yang akan dilas sekitar 70 – 90% dari temperatur titik lebur material yang akan dilas tersebut. Material *tool* harus memiliki titik cair yang lebih tinggi dari material las, agar ketika proses pengelasan berlangsung material *tool* ikut tercampur dengan lasan. Material *tool* harus mempunyai kekuatan yang cukup pada temperatur ini karena jika tidak maka *tool* dapat terpuntir dan retak. Oleh sebab itu diharapkan material *tool* cukup kuat, keras dan liat, pada suhu pengelasan. Sebaiknya material yang digunakan juga mempunyai ketahanan oksida yang baik dan penghantar panas rendah untuk mengurangi kerugian panas dan kerusakan termal pada mesin.

Desain *tool* yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 terdiri dari *shoulder* dan *pin*. *Pin* berfungsi untuk menghasilkan panas dan menggerakkan material yang sedang dilas. *Shoulder* memiliki beberapa fungsi antara lain:

1. Sebagai pelindung dari kemungkinan masuknya suatu material berbeda.
2. *Shoulder* yang berdiameter lebih besar, berperan untuk mempertahankan dan menjaga agar material *plasticised* tidak keluar dari daerah las.
3. *Shoulder* memberi tekanan ke bawah yang memberi efek tempa pada lasan.
4. *Shoulder* juga menyediakan *input* panas tambahan, karena luas permukaan yang bergesekan dengan material las lebih besar maka panas yang dihasilkan juga lebih besar.



Gambar 2.1 Rancangan Tool

2.2 *Friction Stir Welding*

Pengelasan (*welding*) merupakan proses penyambungan dua buah bagian logam atau lebih dengan cara memanaskan, menekan ataupun gabungan dari keduanya sehingga tercipta sambungan pada kedua bagian logam tersebut dan menyatu menjadi satu bagian.

Definisi pengelasan menurut DIN (*Deutch Industrie Normen*) adalah suatu ikatan metalurgi pada sambungan logam paduan yang dilaksanakan dalam keadaan lumer atau cair. Dari definisi tersebut dapat dijabarkan lebih lanjut bahwa las adalah sambungan setempat dari beberapa batang logam dengan menggunakan energi panas.

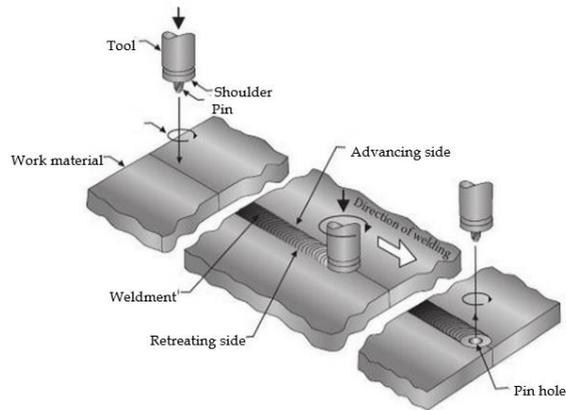
Friction stir welding (FSW) adalah suatu metode pengelasan yang ditemukan oleh *The Welding Institute (TWI)* di tahun 1991. *Friction stir welding (FSW)* adalah proses penyambungan material dengan kondisi solid atau dengan kata lain logam tidak meleleh saat dilakukan penyambungan. Metode ini digunakan agar karakteristik dari logam induk tidak banyak berubah. Panas yang digunakan untuk mencairkan logam kerja dihasilkan dari gesekan antara benda yang berputar (pin) dengan benda yang diam (benda kerja). Pengelasan dengan menggunakan metode *FSW* biasa digunakan untuk menyambungkan material yang sama (*similar metal*) ataupun material yang tidak sama (*dissimilar metal*) seperti baja dengan baja tahan karat, aluminium dengan kuningan dan

memungkinkan untuk mengelas kombinasi material lain yang tidak dapat di las dengan menggunakan metode pengelasan yang lain.

FSW telah berhasil digunakan untuk mengelas paduan cor dan tempa aluminium yang sama dan berbeda, baja, serta paduan titanium, tembaga dan magnesium, paduan logam yang berbeda dan komposit logam. Teknik ini bisa digunakan untuk memproduksi sambungan *butt*, *corner*, *lap*, T, *spot*, *fillet* dan juga untuk mengelas benda berongga, seperti tangki dan tabung/pipa, dan bagian dengan kontur 3 dimensi. Selain memproduksi sambungan, *FSW* juga cocok untuk perbaikan *joint* yang ada. *Friction stir welding* dapat dilakukan di semua posisi (horizontal, vertikal, *overhead* dan orbital), dan dapat menghasilkan atau memperbaiki peralatan.

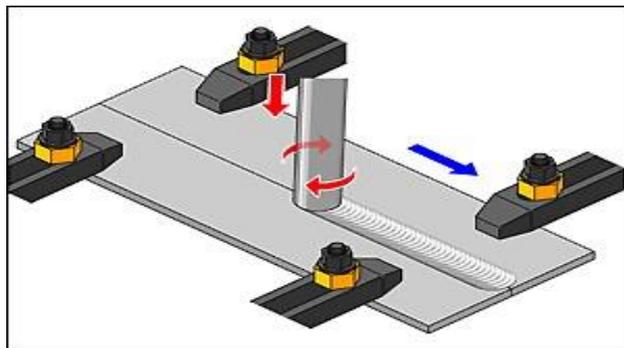
2.2.1. Prinsip Kerja

Gesekan dua benda yang terus-menerus akan menghasilkan panas, ini menjadi suatu prinsip dasar terciptanya suatu proses pengelasan gesek. Pada proses *friction stir welding* yang ditunjukkan pada Gambar 2.2, sebuah *tool* yang berputar dengan kecepatan konstan di tekankan pada material yang telah dicekam. Gesekan *tool* yang berbentuk silindris (*cylindrical-shoulder*) yang dilengkapi *pin/probe* dengan material, mengakibatkan pemanasan setempat yang mampu melunakan bagian tersebut. Gesekan antara kedua benda tersebut menimbulkan panas sampai $\pm 80\%$ dari titik cair material kerja dan selanjutnya pin ditarik searah daerah yang akan dilas [2]. Putaran dari pin bisa searah jarum jam atau berlawanan dengan arah jarum jam.



Gambar 2.2 Prinsip Kerja fsw Pada *Butt Joint*
(Sumber : *Principles and Thermo-Mechanical Model of FSW*)

Dua buah material yang akan disambungkan dengan menggunakan metode *friction stir welding* harus dicekam (*clamp*) terlebih dahulu dengan erat untuk menjaga agar kedua material tidak bergerak dan terpisah akibat dari gaya gesek *probe* pada saat proses pengelasan berlangsung seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3.

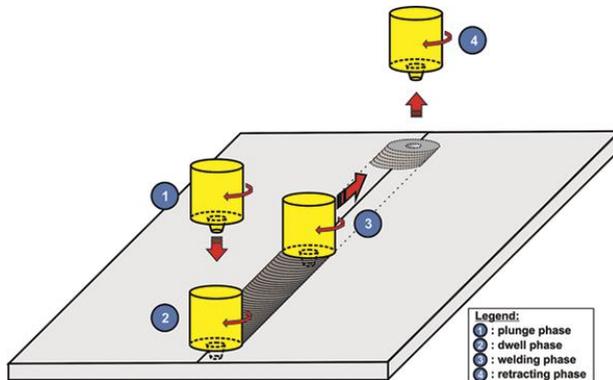


Gambar 2.3 Pencekaman Material Benda Kerja
(Sumber : www.m-osaka.com/FSW/en/FSW/about_FSW.html)

Pin yang digunakan pada pengelasan *friction stir welding* harus mempunyai titik lebur dan kekerasan yang lebih dibandingkan dengan material kerja dan ukuran dari *pin* harus sedikit lebih pendek dari pada tebal material yang akan dilas agar tidak bersentuhan dengan alas. *Shoulder* harus bersentuhan dengan material yang akan dilas untuk menekan dan menjaga material yang dalam kondisi lunak. Hal-hal tersebut sangat berpengaruh pada kualitas hasil pengelasan.

2.2.2. Siklus Proses

Untuk menggabungkan dua plat *butt joint* dengan menggunakan proses *FSW*, terdapat urutan gerakan yang dilakukan. Urutan ini biasanya dibagi menjadi empat fase yang berbeda. Setiap fase memainkan peran spesifik dalam proses pengelasan. Fase ini diilustrasikan pada Gambar 2.4 dan diidentifikasi sebagai berikut:



Gambar 2.4 Siklus Proses *FSW*

1. *Plunge Phase*

Merupakan fase awal dari siklus *friction stir welding* dimana *tool* berputar dengan kecepatan tinggi dan berada tepat diatas bagian material yang akan di las. Pada akhir *plunge phase*, pin telah sepenuhnya menembus (*penetrated*) benda kerja dan *shoulder* bersentuhan dengan permukaan.

2. *Dwell Phase*

Fase ini dimulai saat kedalaman terjun yang diinginkan telah tercapai. *Tool* disimpan dalam waktu yang cukup lama untuk mencapai suhu yang dibutuhkan dalam pengelasan sesuai dengan material yang digunakan. Efek gabungan dari kecepatan relatif antara *probe* berputar dan material dengan gaya aksial yang diterapkan menghasilkan panas karena gesekan pada antarmuka *tool* material.

3. *Welding Phase*

Setelah panas yang dibutuhkan tercapai, selanjutnya *tool* mulai bergerak secara melintang sepanjang bagian yang ingin di sambung seperti pada gambar 2.3. Akselerasinya bisa cepat jika *dwell phase* cukup panjang dan suhunya tinggi di zona pengelasan. Namun, percepatan yang terlalu cepat dapat menghasilkan tekanan mekanis yang tinggi untuk peralatan pengelasan, dimana mengurangi masa pakai alat pengelasan

4. *Retracting Phase*

Merupakan fase akhir pada *friction stir welding* dimana penyambungan yang dilakukan oleh *tool* yang berputar dengan gerak translasi sudah mencapai pada titik yang diinginkan dan *tool* tersebut ditarik/kembali ke atas permukaan sehingga menandakan proses pengelasan tersebut telah selesai.

2.2.3. *Heat Flux*

Heat flux atau *flux* panas adalah laju transfer energi panas melalui suatu permukaan, satuan tingkat panas diukur dalam joule per detik atau watt, sehingga heat flux merupakan tingkat panas persatuan luas dengan satuan watt/m^2 . Pengukuran heat flux sering dilakukan dengan mengukur perbedaan temperatur yang melalui suatu material yang diketahui nilai konduktivitas panasnya. konduktivitas termal k adalah propertis suatu material sebagai penghantar panas. Pemodelan panas pada *FSW* sangat penting untuk mengevaluasi temperatur maksimum. Model ini dapat memprediksi perubahan temperatur melalui keseluruhan proses. Temperatur dari benda kerja secara

langsung mempengaruhi sifat mekanik, tegangan sisa dan struktur mikro. Panas yang dihasilkan antara *stir welding* dan permukaan adalah Q_1 , dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$Q_1 = \frac{2}{3} \pi \mu p \omega (R_s^3 - R_p^3) \quad (2.4)$$

Dimana (μ) adalah koefisien gesekan, (p) adalah tekanan aksial yang diberikan oleh alat pada pelat. Hal ini bisa dihitung dengan cara membagi gaya normal ke area bahu. Pada persamaan 2.5, (ω) adalah kecepatan sudut alat. (R_s dan R_p) adalah jari-jari bahu dan pin. Panas yang dihasilkan dari permukaan *tool* pin adalah (Q_2) yang dihitung sebagai berikut:

$$Q_2 = \omega R_p F_v \quad (2.5)$$

Dimana persamaan 2.6, (F_v) adalah gaya gesek yang dialami oleh alat pin permukaan vertikal.

$$F_v = \mu F \quad (2.6)$$

Untuk mencari nilai (F) pada persamaan 2.6, maka bisa dilihat pada persamaan 2.7, dimana (F) adalah gaya gesek yang dihasilkan saat alat bergerak maju sepanjang sambungan dan untuk (σ_y) adalah tegangan hasil material pada 80% titik leleh material. (h_p) adalah tinggi *tool* pin dan (d_p) adalah diameter *tool* pin.

$$F = (h_p \times d_p)(\sigma_y) \quad (2.7)$$

Setelah mendapatkan hasil dari persamaan diatas, maka untuk mencari (Q_{total}) dapat dihitung menggunakan persamaan 2.8, seperti pada persamaan di bawah:

$$Q_{total} = Q_1 + Q_2$$

$$Q_{total} = \frac{2}{3} \pi \mu p \omega (R_s^3 - R_p^3) + \omega R_p F_v \quad (2.8)$$

Selanjutnya, untuk mencari distribusi flux panas di atas permukaan bahu diberikan pada persamaan 2.9, sebagai berikut:

$$q_{shoulder}(r) = \frac{3Q_r r}{2\pi R_s^3} \text{ untuk } r \leq r_0 \quad (2.9)$$

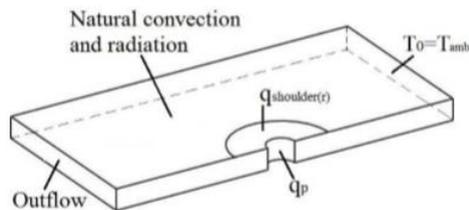
Dimana ($q_{shoulder}$) adalah panas yang dihasilkan oleh *tool pin* dibagian *shoulder*, (r_0) adalah jari-jari belakang *shoulder*. Untuk nilai (Q_r) didapat dari panas permukaan probe, pada saat probe berputar dan kontak dengan plat aluminium. Namun sangat sulit untuk merumuskan distribusi flux panas bergantung radius. Oleh karena itu untuk kesederhanaan distribusi panas seragam di seluruh permukaan bahu dipertimbangkan. Nilai rata-rata jari bahu (R_s) dan jari-jari pin (R_p) ditunjukkan pada persamaan 2.10.

$$r = \frac{R_s + R_p}{2} \quad (2.10)$$

Untuk distribusi *flux* panas di atas permukaan vertikal pin dan benda kerja, dapat dilihat pada persamaan 2.11, sebagai berikut:

$$q_p = \frac{Q_2}{(A)_{ps}} \quad (2.11)$$

Dimana (q_p) panas *tool pin* dihasilkan pada saat proses pengelasan. (A)_{ps} adalah bidang permukaan vertikal pin, sedangkan untuk nilai (Q_2) didapat dari persamaan 2.5. Penerapan kondisi batas dan flux panas dapat ditunjukkan pada Gambar 2.5.



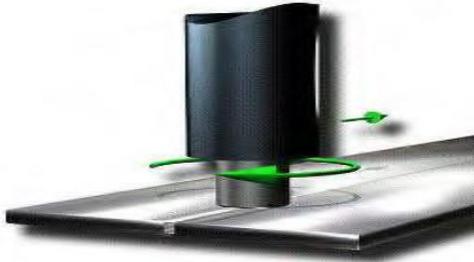
Gambar 2.5 Kondisi Batas dan *Flux* Panas

2.2.4. Parameter-Parameter Proses

Pada proses pengelasan dengan metode *friction stir welding* terdapat beberapa parameter penting yang sangat berpengaruh dengan hasil lasan, diantaranya :

a. Rotasi Pin dan Kecepatan Melintang

Kecepatan merupakan parameter yang mempunyai tingkat kepentingan yang cukup besar. Ada dua kecepatan *probe* yang harus diperhatikan dalam pengelasan ini yaitu seberapa cepat *probe* itu berputar dan seberapa cepat *probe* itu melintasi jalur pengelasan (*joint line*). Gambar 2.6 menunjukkan gerakan *probe* pada saat pengelasan.



Gambar 2.6 Gerakan Probe

Kedua parameter ini harus ditentukan secara cermat untuk memastikan proses pengelasan yang efisien dan hasil yang memuaskan. Jika material tidak cukup panas maka arus pelunakan tidak akan optimal sehingga memungkinkan akan terjadi cacat rongga atau cacat lain pada *stir zone*, dan kemungkinan *tool* akan rusak. Tetapi input panas yang terlalu tinggi akan merugikan sifat akhir lasan karena perubahan karakteristik logam dasar material.

$$V = 2\pi RN \quad (2.12)$$

Pada persamaan 2.12 dapat dilihat, N adalah kecepatan rotasi dari pin, dalam persamaan kecepatan, R adalah jarak

yang dihitung titik dari sumbu alat dan V adalah kecepatan pengelasan alat. Jelas bahwa kecepatan rotasi dan kecepatan pengelasan adalah faktor yang utama dalam menghasilkan panas dan juga masalah masukan panas. Hubungan antara kecepatan dan masukan panas sangat kompleks selama *FSW*. Masukan panas yang terlalu banyak atau terlalu rendah mempengaruhi kualitas pengelasan.

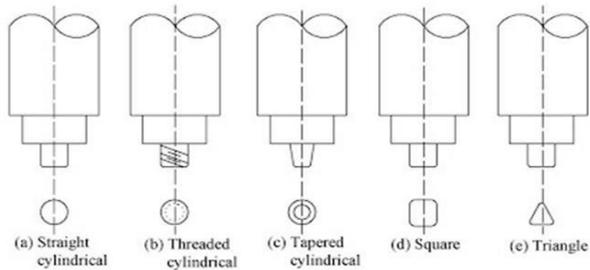
b. Kedalaman Ceburan dan Tekanan Pin

Kedalaman ceburan (*plunge depth*) didefinisikan sebagai kedalaman titik terendah *probe* di bawah permukaan material yang dilas. *Plunge depth* perlu diatur dengan baik untuk menjamin tekanan ke bawah tercapai. *Plunge depth* yang dangkal dapat mengakibatkan cacat dalam lasan, sebaliknya *plunge depth* yang berlebihan bisa mengakibatkan kerusakan *pin* karena bergesekan dengan alasnya.

Tekanan *shoulder* diharapkan untuk menjaga material lunak tidak keluar jalur dan memberi efek tempa (*forging*). Material panas ditekan dari atas oleh *shoulder* dan ditahan oleh alas dari bawah. Proses ini bertujuan untuk memadatkan material sehingga penguatan sambungan terjadi akibat efek tempa tersebut. Selain itu tekanan *shoulder* juga menghasilkan *input* panas tambahan karena permukaannya yang lebih besar bergesekan dengan material.

c. Desain Pin Tool

Bentuk pin pada tool yang selama ini dikembangkan untuk aplikasi *FSW* ada beberapa tipe seperti pada gambar 2.7. Bentuk pin memengaruhi aliran bahan plastis dan mempengaruhi sifat lasan.



Gambar 2.7 Desain Pin Tools

2.2.5. Mikrostruktur

Penampang mikro dari daerah logam las pada pada *friction stir welding* dapat dibagi beberapa bagian seperti pada Gambar 2.8, yaitu :

a. *Base metal/Parent Metal*

Bagian dari *base metal* yang tidak terkena pengaruh panas yang dihasilkan selama proses *FSW* berlangsung.

b. *Heat Affected Zone (HAZ)*

Daerah yang paling dekat dengan lokasi pengelasan. Material pada area ini sudah mengalami siklus thermal yang menyebabkan perubahan struktur mikro dan sifat mekanik dari *basemetal*.

c. *Thermo Mechanically Affected Zone (TMAZ)*

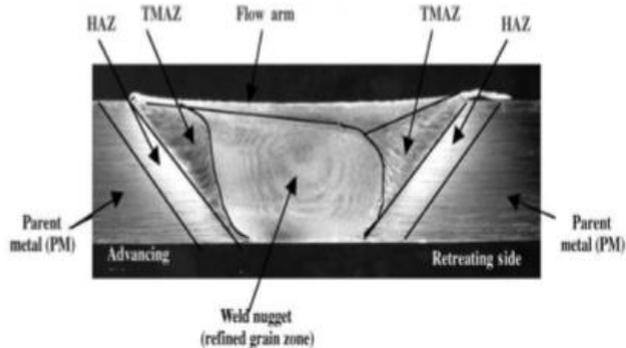
Daerah yang terdeformasi plastis oleh *tool*. Panas pada area ini dihasilkan oleh proses pengelasan yang membawa pengaruh terhadap sifat material. Pada material aluminium, panas tersebut memungkinkan untuk menghasilkan regangan plastis tanpa adanya proses rekristalisasi, dan biasanya ada batas yang jelas yang membedakan antara area rekristalisasi (*weld nugget*) dengan area *TMAZ* yang terdeformasi.

d. *Flow Arm Zone*

Area yang terseret adukan oleh *shoulder* yang menjadi batas pengelasan dari *friction stir welding*.

e. *Weld Nugget/Weld Metal*

Area yang secara utuh mengalami rekristalisasi atau terkadang area ini disebut juga dengan *stir zone*. Area ini merupakan area yang menghasilkan sambungan akibat gerakan *tool*.



Gambar 2.8 Mikrostruktur Hasil Pengelasan *FSW*

2.2.6. Kelebihan dan Kekurangan

Pengelasan dengan metode *FSW* sering diterapkan pada material aluminium. Kualitas lasnya memiliki permukaan yang rata dan halus. Proses ini menarik karena mempunyai beberapa keuntungan antara lain:

1. Tidak ada penurunan panas pada daerah lasan, sehingga hasil pengelasan merata (seragam) dari awal sampai akhir.
2. Teknik ini mampu menggabungkan material yang berbeda jenis.
3. Untuk produksi massal, cukup sekali *setting* hasil pengelasannya akan tetap sama walaupun proses ini dilakukan berulang-ulang.
4. Proses pengelasan ini tidak membutuhkan *filler materials*.
5. Tidak timbul asap, sinar pancaran busur las, tidak ada percikan yang berbahaya bagi mata operator.
6. Tidak dibutuhkan tenaga operator khusus.

Kekurangan pengelasan dengan metode *Friction stir welding* yaitu :

1. Dibutuhkan kekuatan yang sangat tinggi untuk proses *clamping* material las agar tidak bergerak ketika pengelasan sedang berlangsung.
2. Untuk aplikasi pengelasan pada material berbeda dan ketebalan material yang berbeda maka *probe* yang digunakan juga dengan ukuran yang berbeda.
3. Pada akhir pengelasan akan menghasilkan lubang bekas injakan *probe*.

2.2.7. Aplikasi

Sejak pertama kali dikembangkan pada tahun 1991 *Friction stir welding* sudah banyak diterapkan dan digunakan oleh berbagai perusahaan di dunia untuk memproduksi komponen dan panel aluminium. Perusahaan *Hydro Marine Aluminiums* memproduksi penyekat aluminium dan *deep – freeze panels* untuk dek dan penyekat antar kompartemen pada kapal laut, seperti pada kapal pesiar *The World* yang ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Kapal Pesiar *The World*
(Sumber : *Friction Stir Welding Provide Prefabricated Components and Panels, Stephan W Kalee, TWI Ltd*)

Di industri otomotif *FSW* digunakan untuk memproduksi komponen aluminium. Di Swedia panel aluminium untuk kursi belakang diproduksi dengan *FSW*, robot dengan *FSW* digunakan untuk memproduksi pintu belakang dan penutup mesin pada hampir semua mobil-mobil Jepang. Aplikasi terbaru yang menggunakan *FSW* adalah pembuatan panel dalam interior dan tangki bahan bakar Ford GT di Amerika seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.10 dan 2.11 dibawah ini:



(a)

(b)

(c)

Gambar 2.10 Aplikasi *Fsw* dalam Industri Otomotif

(a) Tangan robot yang dilengkapi dengan *FSW*;

(b) *Prototypes* penggunaan *FSW* pada panel;

(c) Pintu mobil yang dibuat dengan menggunakan *FSW*

(Sumber: *Friction stir welding Provide Prefabricated Components and Panels, Stephan W Kalee, TWI Ltd*)

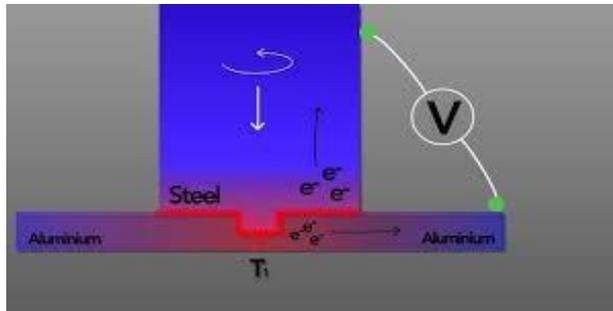


Gambar 2.11 *Central panel* dari Ford GT
(Sumber : *Friction Stir Welding Provide Prefabricated Components and Panels, Stephan W Kalee, TWI Ltd*)

2.2.8. Distribusi Temperatur

Dalam proses *FSW* akan menyebabkan deformasi plastis yang sangat intensif terutama di sekitar *tool* yang berputar dan daerah gesekan antara *tool* dan benda kerja. Distribusi temperatur akan sangat mempengaruhi mikrostruktur hasil lasan termasuk ukuran butir dan karakter batas butir sehingga pada akhirnya akan mempengaruhi kekuatan hasil mekanik lasan.

Tidak mudah untuk memperoleh data mengenai distribusi temperatur, terutama pada daerah pengadukan (*stirred zone*) karena sangat intensnya deformasi plastis di daerah tersebut seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12. Akibatnya distribusi temperatur pada daerah tersebut didapatkan dengan memperkirakan besarnya berdasarkan mikrostruktur yang terjadi atau melakukan pengukuran di dekat daerah tersebut dengan termokopel.



Gambar 2.12 Distribusi Temperatur pada Pengelasan *FSW*

2.3 *Finite Element Method*

FEM adalah singkatan dari *Finite Element Method*, dalam bahasa Indonesia disebut metode elemen hingga. Konsep paling dasar FEM adalah menyelesaikan suatu problem dengan cara membagi obyek analisa menjadi bagian-bagian kecil yang terhingga. Bagian-bagian kecil ini kemudian dianalisa dan hasilnya digabungkan kembali untuk mendapatkan penyelesaian untuk keseluruhan daerah. Kata “*finite* atau terhingga” digunakan untuk menekankan bahwa bagian-bagian kecil tersebut tidak tak terhingga, seperti yang lazim digunakan pada metode integral analitik.

Membagi bagian analisa menjadi bagian-bagian kecil disebut “*discretizing* atau diskritisasi”. Bagian-bagian kecil ini disebut elemen, yang terdiri dari titik-titik sudut (disebut *nodal*, atau *node*) dan daerah elemen yang terbentuk dari titik-titik tersebut. Membagi sebuah object menjadi bagian-bagian kecil secara fisika sebenarnya menuntun kita kepada pembuatan persamaan diferensial. Jadi secara lebih matematis, FEM didefinisikan sebagai teknik numerik untuk menyelesaikan problem yang dinyatakan dalam persamaan diferensial. Namun biasanya definisi FEM secara matematis memberikan kesan yang rumit yang sebenarnya tidak perlu. Oleh karena itu dalam penelitian ini, pendekatan matematis tidak terlalu ditekankan

2.3.1. *Transient Structural*

Analisa *transient structural* dilakukan untuk melihat bagaimana sebuah benda berperilaku apabila diberi gaya dinamis dan konstan dengan adanya pengaruh dari waktu. Dengan demikian kita dapat melihat simulasi regangan, tegangan dan deformasi yang terjadi pada benda tersebut.

2.3.2. *Prosedur Dasar*

Tahapan dasar dalam melakukan analisa menggunakan FEM ini yaitu *preprocessing*, *solution*, dan *general postprocessing*.

1. *Preprocessing*

Preprocessing adalah langkah awal dalam proses FEM. Pada *preprocessing* terdapat beberapa fungsi dimana kita harus mengatur secara detail fungsi-fungsi tersebut karena fungsi-fungsi tersebut akan menghasilkan perhitungan yang spesifik pada benda yang akan dianalisa. Fungsi-fungsi yang terdapat pada *preprocessing* adalah:

- *Modelling*: Proses untuk menggambar benda yang akan dianalisis, pada proses modeling benda dapat Digambar dalam bentuk 2D atau 3D. Untuk benda-benda dengan geometri rumit, benda dapat Digambar dengan menggunakan program CAD yang lain misalkan *Solidworks*.
- *Element Type*: Proses untuk memberikan atribut atau bentukan dari benda yang kita gambar untuk dianalisa, misalnya material yang kita gambar bebrbentuk *solid*, *beam*, *shell*, dll. Tiap-tiap atribut atau bentukan akan berpengaruh opada langkah-langkah berikutnya dan analisa yang akan dilakukan.
- *Material Properties*: Proses untuk memberikan property material pada benda yang akan dianalisa, misalnya densitas, modulus *bulk*, elastisitas, dll.
- *Meshing*: Proses membagi benda yang akan dianalisa menjadi luasan-luasan atau area kecil. *Meshing*

merupakan salah satu tahapan penting dalam proses FEM.

2. *Solution*

Langkah berikutnya dalam proses FEM adalah *solution*. Pada tahapan ini telah mendekati proses akhir, yaitu proses analisa dan perhitungan. Tetapi sebelum mencapai proses perhitungan dan analisa ada beberapa langkah yang dalam proses *solution* yang harus dilalui terlebih dahulu. Langkah-langkah tersebut adalah:

- *Constrains*: Proses menentukan gaya yang akan bekerja pada benda yang akan kita analisa. Pada *constrains* derajat kebebasan benda yang akan dianalisa akan ditentukan.
- *Initial Velocity*: Proses untuk menentukan kecepatan benda yang akan dianalisa.
- *Loading Option*: Proses untuk menentukan gaya yang bekerja pada benda yang akan dianalisa dan menentukan parameter yang mengikutinya.
- *Time Control*: Proses menentukan lamanya waktu yang akan dianalisa.
- *Solve*: Proses menghitung dan menganalisis benda

3. *General Postprocessing*

Setelah proses desain dan analisa selesai, langkah berikutnya adalah *general postprocessing*. Proses ini digunakan untuk melihat hasil analisa, animasi gerakan benda yang akan dianalisa dan melihat hasil perhitungan serta grafik.

Berikut Langkah-langkah dalam metode elemen hingga dalam menganalisa suatu struktur secara runtut:

- a. Menentukan tipe analisa (*static*, dinamik, modal, *buckling*, *contact*, atau *thermal*)
- b. Menentukan tipe elemen (2D atau 3D)
- c. Menentukan properties material (E, ν, ρ, α , dsb.)
- d. Menentukan nodal nodal pada struktur

- e. Membentuk elemen elemen dengan menyambungkan nodal nodal
- f. Menentukan *boundary condition* dan memberikan beban
- g. Melakukan eksekusi agar memperoleh hasil
- h. Menganalisa hasil yang diperoleh (*Displacement, Stress, Strain, Natural Frequency, Temperature, atau time history*)

2.4 Metode Taguchi

Metode Taguchi merupakan suatu metodologi baru dalam bidang Teknik yang bertujuan untuk memperbaiki kualitas produk dan proses dalam waktu yang bersamaan menekan biaya dan sumber daya seminimal mungkin. Metode Taguchi menjadikan produk atau proses bersifat kokoh (*robust*) terhadap faktor gangguan (*noise*). Metode Taguchi mempunyai beberapa keunggulan (Soejanto:2009):

1. Lebih efisien karena memungkinkan untuk melaksanakan penelitian yang melibatkan banyak faktor dan jumlah.
2. Eksperimen yang dilakukan memungkinkan diperolehnya suatu proses yang menghasilkan produk yang konsisten dan kokoh terhadap faktor yang tidak dapat dikontrol (faktor gangguan).
3. Menghasilkan kesimpulan mengenai respon faktor-faktor kontrol yang menghasilkan respon optimum.

Dengan demikian, metode Taguchi mempunyai studi eksperimen yang sangat kompleks, sehingga pemilihan rancangan percobaan harus dilakukan secara hati-hati dan sesuai dengan tujuan penelitian. Pada studi eksperimen yang dilakukan evaluasi terhadap dua parameter atau lebih secara serentak terhadap kemampuannya untuk mempengaruhi rata-rata hasil gabungan dari karakteristik produk atau proses tertentu. Dengan adanya penentuan parameter yang tepat, level parameter dibuat bervariasi didapatkan hasil dari kombinasi dari parameter yang diamati dan hasil proses tersebut dapat dianalisis. Hasil analisis ini akan digunakan untuk menentukan level-level parameter yang berpengaruh secara signifikan.

2.4.1. Tabel Orthogonal

Suatu tabel orthogonal yang elemen-elemennya disusun menurut baris dan kolom. Kolom merupakan faktor yang dapat diubah dalam eksperimen. Baris merupakan kombinasi level dari faktor dalam eksperimen. Tabel disebut orthogonal karena level-level dari faktor berimbang dan dapat dipisahkan dari pengaruh faktor lain dari eksperimen. Agar dapat menentukan matriks orthogonal yang sesuai dengan eksperimen, perlu dilakukan prosedur berikut:

1. Definisikan jumlah faktor dan levelnya

Dalam tahap ini dilakukan pengamatan terhadap parameter-parameter yang terdapat dalam suatu proses produksi atau suatu mesin produksi.

2. Tentukan Derajat Kebebasan

Sebuah konsep yang mendiskripsikan seberapa besar eksperimen yang mesti dilakukan dan seberapa banyak informasi yang didapatkan dari eksperimen tersebut. Dalam menentukan jumlah eksperimen yang akan diamati adalah sebagai berikut:

$$V_{OA} = (\text{Banyaknya eksperimen} - 1) \quad (2.3)$$

$$V_{fl} = (\text{Banyaknya level} - 1) \quad (2.4)$$

$$\Sigma V_{OA} = (\text{Banyaknya faktor}) \cdot (V_{fl}) \quad (2.5)$$

3. Memilih tabel Orthogonal

Dalam memilih tabel orthogonal yang cocok dan sesuai, diperlukan suatu persamaan dari matriks tersebut yang mempresentasikan jumlah faktor, jumlah level dan jumlah pengamatan yang akan dilakukan. Contoh table orthogonal standar dengan dua level mempunyai beberapa pilihan matriks seperti pada Tabel 2.1. Bentuk umum dari model tabel orthogonal adalah:

$$L_a(b^c) \quad (2.6)$$

Dimana;

L = rancangan bujursangkar latin

- a = banyak baris/eksperimen
 b = banyak Level
 c = banyak kolom/faktor

Tabel 2.1 Contoh Tabel Orthogonal dengan 2 Level

Matriks orthogonal 2 level					
$L_4(2^3)$	$L_8(2^7)$	$L_{12}(2^{11})$	$L_{16}(2^{15})$	$L_{32}(2^{31})$	$L_{64}(2^{63})$

2.4.2. Analisis Rasio S/N

Rasio S/N (*Signal-To-Noise*) digunakan untuk memilih faktor-faktor yang memiliki kontribusi pada pengurangan variasi suatu respon. Rasio S/N merupakan rancangan untuk transformasi pengulangan data ke dalam suatu nilai yang merupakan ukuran variasi yang timbul. Rasio S/N terdiri dari beberapa tipe karekteristik kualitas, yaitu:

1. Semakin kecil, semakin baik

Adalah karekteristik kualitas dengan batas nilai 0 dan non negatif. Nilai semakin mengecil (mendekati nol adalah yang diinginkan)

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^r Y_i^2 \right) \quad (2.7)$$

Dimana: n = jumlah pengulangan dari suatu material

2. Tertuju pada nilai Tertentu

Karakteristik kualitas dengan nilai atau target tidak nol dan terbatas atau dengan kata lain nilai yang mendekati nilai yang ditentukan adalah yang terbaik.

$$S/N = -10 \log V_e$$

$$S/N = -10 \log \left(\frac{V_m - V_e}{n V_e} \right) \quad (2.8)$$

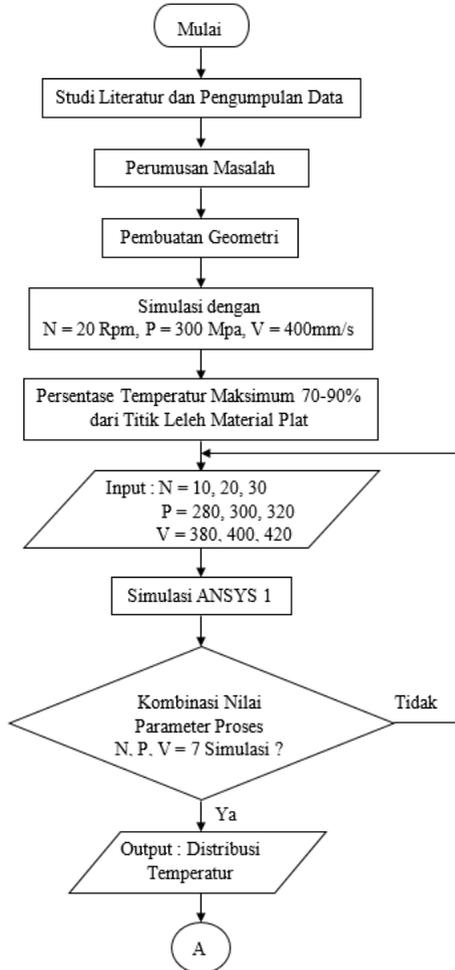
3. Semakin besar, semakin baik

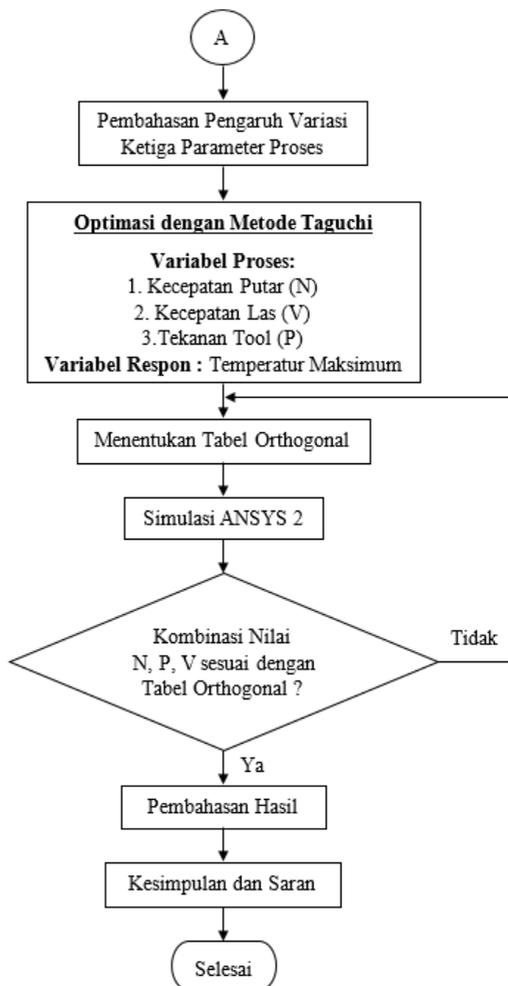
Karakteristik kualitas dengan rentang nilai tak terbatas dan non-negatif. Nilai semakin besar adalah semakin diinginkan.

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^r \frac{1}{Y_i^2} \right) \quad (2.9)$$

BAB III METODOLOGI

3.1 Diagram Alir Penelitian





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Prosedur Penelitian

Supaya tujuan penelitian ini dapat berjalan sesuai dengan sasaran maka diperlukan adanya langkah-langkah yang sistematis, konkret dalam pelaksanaannya, agar tulisan ilmiah ini mudah dipahami dan dimengerti oleh pihak lain. Berikut ini adalah rincian langkah-langkah penelitian tersebut :

1. Studi Literatur dan Pengumpulan Data

Studi literatur dilakukan untuk mendapatkan informasi secara lebih detail serta menunjang penelitian yang akan dilakukan. Informasi berupa dasar teori tentang *friction Stir Welding*, *finite element method*, maupun penelitian terdahulu yang dirangkum penulis berasal dari berbagai sumber. Dari studi literatur ini juga dapat menentukan ruang lingkup dari permasalahan yang akan diteliti. Ruang lingkup pada penelitian ini adalah pemfokusan penelitian distribusi temperatur pada *friction Stir Welding* dengan metode elemen hingga.

2. Perumusan Masalah

Merumuskan permasalahan yang diangkat sebagai tugas akhir ditentukan berdasarkan kerangka berpikir hasil dari studi literatur. Rumusan masalah pada tugas akhir ini difokuskan pada studi pengaruh distribusi temperatur dan optimasi parameter proses pengelasan *friction stir welding*.

3. Pembuatan Geometri

Pada tahap ini, geometri dari plat dan tool *friction stir welding* dibuat dalam model yang telah disederhanakan dengan menggunakan software SolidWork.

4. Penentuan Nilai Variabel

Setelah didapatkan suatu perumusan permasalahan yang akan diangkat, selanjutnya dilakukan penentuan nilai variabel proses yang menjadi variabel bebas seperti besarnya kecepatan putar, kecepatan las dan tekanan tool. Selanjutnya nilai dari variabel bebas tersebut digunakan sebagai input dalam proses

simulasi lalu akan didapat output berupa distribusi temperatur selama proses pengelasan berlangsung.

5. Simulasi ANSYS

Pada penelitian ini, dilakukan simulasi dengan pemodelan *finite element* menggunakan software ANSYS *Workbench* 18.1 untuk mengetahui besarnya distribusi temperatur pada proses *friction stir welding*. Selain itu hal-hal yang mampu dicakup oleh simulasi *fsw* antara lain untuk memodelkan panas yang timbul dan fenomena apa saja yang terjadi pada daerah pengelasan serta efek yang menyertai proses pengelasan. Penjabaran mengenai tahapan proses dari simulasi *friction stir welding* akan dibahas pada sub-bab selanjutnya.

6. Validasi Hasil Simulasi

Validasi merupakan suatu proses untuk memeriksa kesesuaian jalannya simulasi dengan cara melakukan pemeriksaan simulasi tersebut. Validasi digunakan untuk membuktikan bahwa simulasi yang di jalankan dalam penelitian ini sudah benar. Nilai distribusi temperatur yang didapatkan dari simulasi dapat dikatakan valid apabila persentase temperatur maksimal yang dihasilkan berada dalam kisaran 70-90% dari titik leleh material plat *aluminium alloy*. Hal itu sesuai dengan penelitian yang sudah dilakukan oleh beberapa jurnal bahwa temperatur yang terjadi selama pengelasan *fsw* memiliki persentase temperatur maksimal sekitar 70-90% dari titik leleh material yang digunakan. Apabila persentase temperatur maksimal yang dihasilkan tidak berada dalam kisaran tersebut maka dilakukan penentuan nilai variabel bebas kembali sampai mendapatkan hasil yang sesuai.

7. Studi Pengaruh Parameter Proses

Setelah mendapatkan nilai variabel bebas yang valid, penulis melakukan studi pengaruh parameter proses. Dalam studi ini, terdapat tiga parameter proses yang akan diteliti

pengaruhnya terhadap distribusi temperatur yang terjadi sepanjang proses pengelasan *friction stir welding*, diantaranya :

- Kecepatan Putar (N)
- Kecepatan Las (V)
- Tekanan Tool (P)

Ketiga parameter proses tersebut akan dianalisa hasil distribusi temperturnya dengan cara memvariasikan nilai masing-masing sehingga akan didapat pengaruh dari nilai parameter proses tersebut.

8. Optimasi Parameter Proses Menggunakan Metode Taguchi

Metode taguchi merupakan metode yang digunakan untuk mendapatkan nilai parameter proses yang optimal dari pengelasan *friction stir welding* serta dengan metode ini juga kita dapat mengetahui besarnya pengaruh dari masing-masing parameter proses yang digunakan.

9. Menentukan Tabel Orthogonal

Tabel orthogonal digunakan untuk menentukan kombinasi dari parameter proses yang telah ditentukan sebelumnya untuk mendapatkan kombinasi yang menghasilkan nilai optimum.

10. Pembahasan Hasil

Prosedur akhir dari optimasi parameter proses menggunakan metode taguchi yaitu dengan membuat pembahasan mengenai hasil yang didapat berupa temperatur maksimum dari sembilan simulasi percobaan dan grafik rasio S/N yang didapat menggunakan minitab.

11. Kesimpulan dan Saran

Tahap akhir dari penulisan tugas akhir yang dikerjakan penulis yaitu membuat kesimpulan dari keseluruhan analisa yang telah dilakukan. Kesimpulan yang dibuat harus bisa menjawab rumusan masalah yang terdapat pada bab pertama sehingga hasil dari penelitian ini dapat lebih mudah untuk dipahami.

3.3 Penentuan Variabel Proses

Pada Penelitian ini cara menentukan variabel proses berdasarkan teori yang berhubungan dengan distribusi temperatur pada pengelasan *friction stir welding*. Variabel-variabel tersebut antara lain :

1. Variabel Konstan

Variabel konstan merupakan variable proses yang tidak diteliti. Variabel ini dijaga agar tidak berubah selama proses simulasi sehingga tidak mempengaruhi hasil penelitian. Ada beberapa variabel konstan yang digunakan pada simulasi penelitian ini diantaranya :

- a. Dimensi Plat dan Tool
- b. Jarak Pengelasan = 800 mm
- c. Material Plat = *Aluminium Alloy*
- d. Material Tool = *Structural Steel*
- e. Koefisien Gesek = 0,25

2. Variabel Bebas

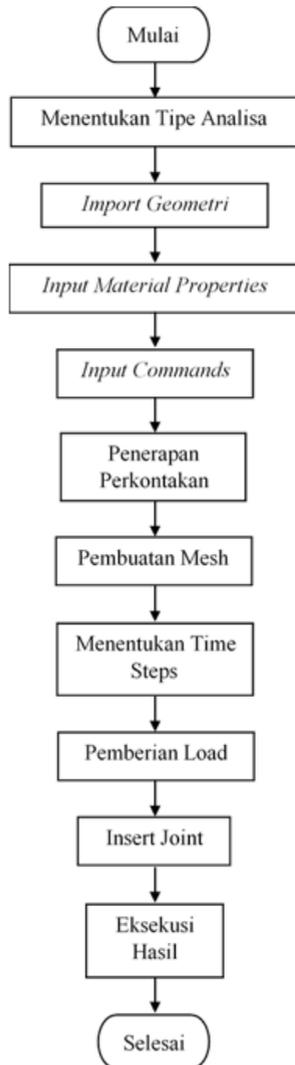
Variabel bebas merupakan variabel proses yang dapat dikendalikan dan besarnya dapat ditentukan. Pada penelitian ini yang menjadi variabel bebas adalah :

- a. Kecepatan Putar
- b. Kecepatan Las
- c. Tekanan Tool

3. Variabel Tak Bebas (Respon)

Variabel respon merupakan variabel yang besarnya tidak dapat ditentukan dan nilainya dipengaruhi oleh perlakuan yang diberikan, serta hasilnya diketahui setelah melaksanakan simulasi. Variabel respon pada penelitian ini yaitu distribusi temperatur selama proses pengelasan *friction stir welding* berlangsung.

3.4 Diagram Alir Simulasi



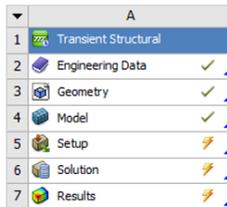
Gambar 3.2 Diagram Alir Simulasi

3.5 Prosedur Simulasi

Tahap-tahap yang dilaksanakan pada saat simulasi proses *finite element* menggunakan software Ansys Workbench 18.1 adalah sebagai berikut :

1. Menentukan Tipe Analisa

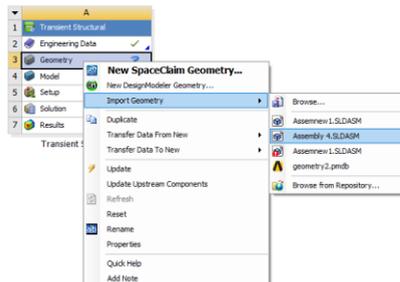
Model analisa dalam simulasi *friction stir welding* menggunakan *tipe transient structural* seperti pada Gambar 3.3. Pada analisa tipe *transient structural* kita akan mendapatkan temperatur yang terjadi selama proses pengelasan dimana temperatur tersebut didapat dari hasil konversi gesekan antara tool dengan plat yang menimbulkan panas.



Gambar 3.3 Tipe Analisa

2. Import Geometri

Geometri yang telah selesai dibuat dengan *SolidWork* kemudian di inputkan pada ANSYS dengan cara sesuai Gambar 3.4 berikut.



Gambar 3.4 Input Geometri pada ANSYS

3. *Input Material Properties*

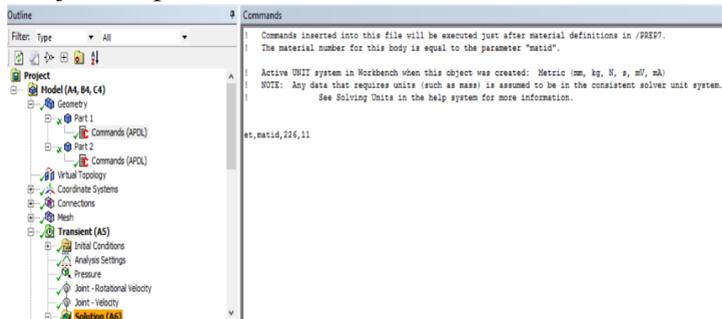
Untuk menentukan properties material yang digunakan pada simulasi ini, pada tab *engineering data* klik kanan dan pilih edit. Masukkan *mechanical properties* seperti pada Gambar 3.5.

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	7890	kg m ⁻³		
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's Mod...			
8	Young's Modulus	2E+05	MPa		
9	Poisson's Ratio	0,3			
10	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa		
11	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa		
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular			
16	Strain-Life Parameters				
24	Tensile Yield Strength	415	MPa		
25	Compressive Yield Strength	250	MPa		
26	Tensile Ultimate Strength	690	MPa		
27	Compressive Ultimate Strength	0	MPa		

Gambar 3.5 *Input Properties material*

4. *Input Commands*

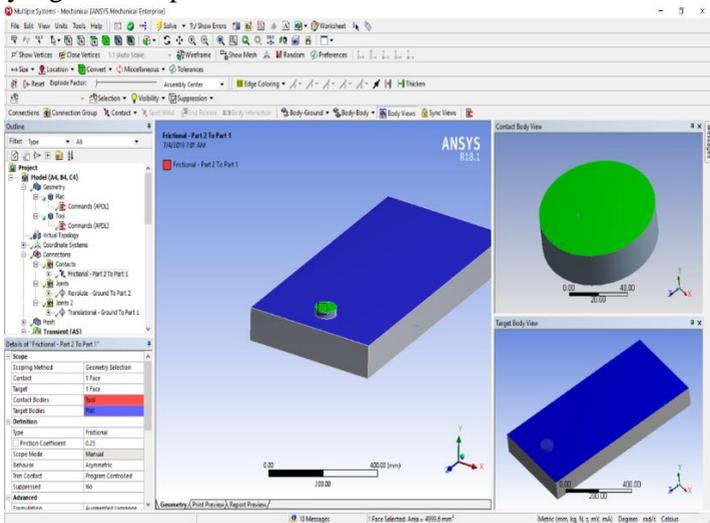
Setelah masuk dalam mode edit model, klik kanan pada part lalu masing-masing *part* masukkan commands “et,matid,226,11” seperti pada Gambar 3.6. Commands yang dimasukkan berfungsi untuk mengkonversikan gaya gesek menjadi temperatur.



Gambar 3.6 *Input Commands*

5. Penerapan Perkontakan

Dalam tahap ini penulis menentukan jenis perkontakan yang terjadi antara plat dan tool seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.7. Pada simulasi ini penulis menggunakan tipe kontak *friction* yang terjadi antara tool dan plat dengan koefisien gesek sebesar 0,25 sehingga terjadinya gesekan antara plat diam dan tool bergerak dapat diperhitungkan. Selain itu digunakan tipe *fixed support* pada permukaan bagian bawah plat sebagai tumpuan yang menyangga dan tidak ikut bergerak selama proses simulasi fsw berlangsung. Tumpuan ini adalah sebuah constraint yang kita buat dengan cara membatasi atau membebaskan *Degrees of Freedom* yang tersedia pada model tersebut.

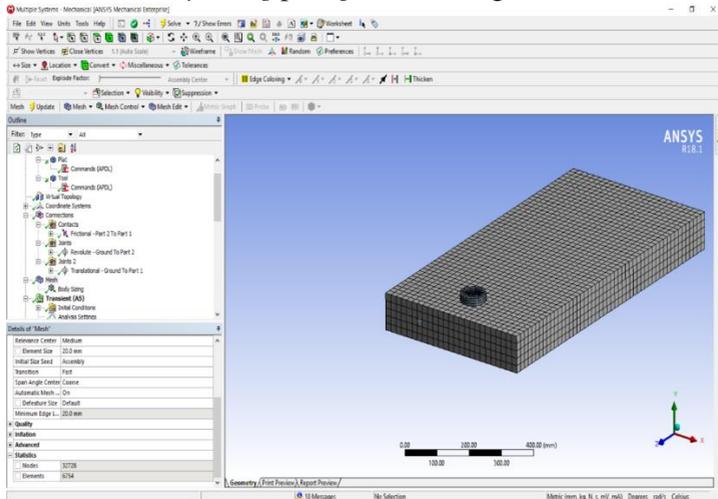


Gambar 3.7 Penerapan Perkontakan

6. Pembuatan Mesh

Meshing merupakan proses membagi benda yang akan dianalisa menjadi luasan-luasan atau area kecil. *Meshing* merupakan salah satu tahapan penting dalam proses FEM supaya dapat dianalisis pada ANSYS. Ukuran mesh yang

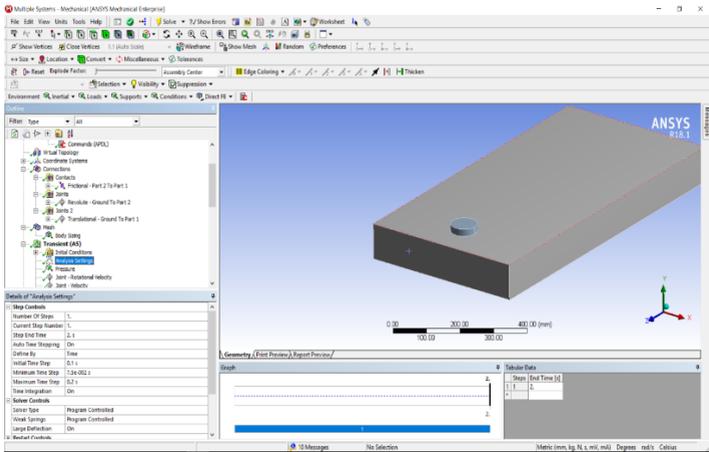
terdapat pada suatu objek akan mempengaruhi ketelitian dan daya komputasi analisis. Pada simulasi ini sesuai pada Gambar 3.8, penulis menggunakan *element sizing* berukuran 20 mm dan *body sizing* pada *part tool* dengan ukuran 7,5 mm.



Gambar 3.8 Pembuatan Mesh

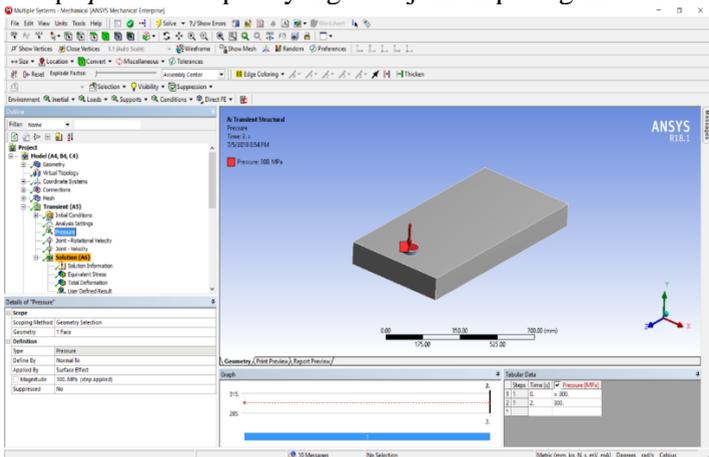
7. Menentukan Time Steps

Time steps pada ANSYS digunakan untuk menentukan waktu lamanya proses *friction stir welding* berlangsung. Selain itu, pada *feature* ini juga memiliki fungsi untuk mengatur waktu di setiap langkah pergerakan yang terjadi pada proses simulasi tersebut. Gambar 3.9 menunjukkan tampilan pada ANSYS Workbench dalam menentukan time steps.

Gambar 3.9 Menentukan *Time Steps*

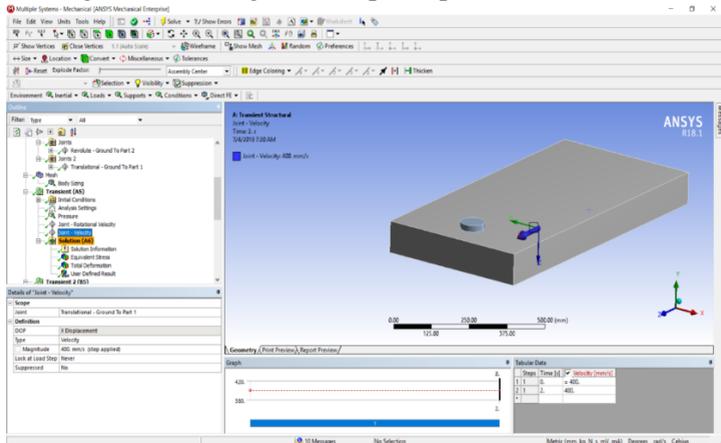
8. Pemberian *Load*

Proses untuk menentukan gaya yang bekerja pada benda yang akan dianalisa dan menentukan parameter yang mengikutinya. *Load* yang diberikan pada penelitian ini berupa *pressure* seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.10.

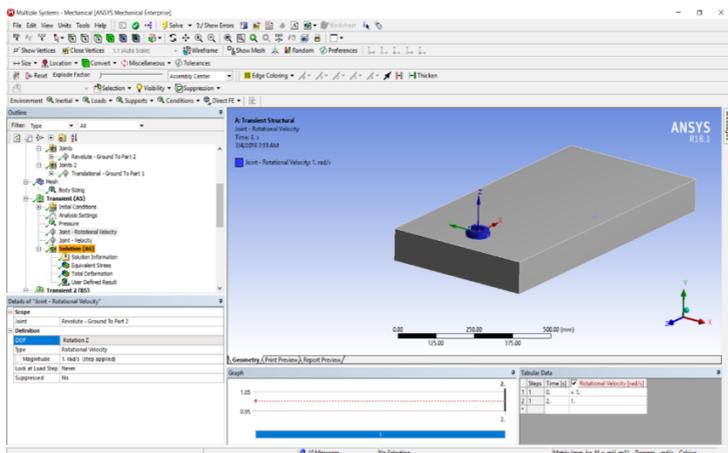
Gambar 3.10 Pemberian *Load*

9. *Insert Joint*

Dalam tahap ini terdapat dua joint yang penulis gunakan yaitu *joint-velocity* (Gambar 3.11) yang berfungsi untuk mengatur kecepatan pengelasan sesuai dengan jarak yang ditempuh dan *joint-rotational velocity* (Gambar 3.12) yang berfungsi untuk mengatur kecepatan putar tool.



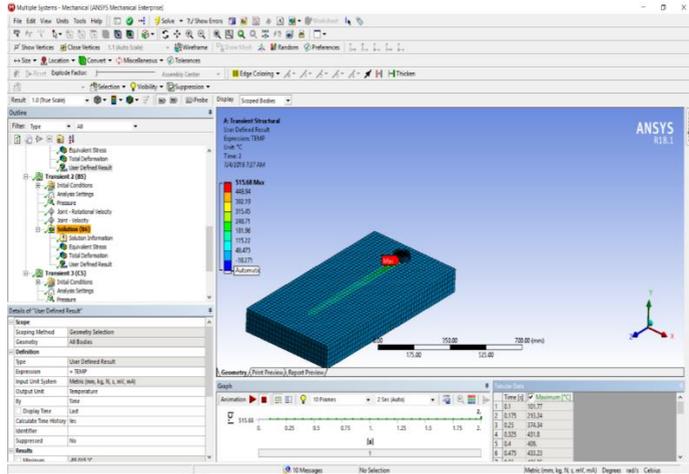
Gambar 3.11 *Insert Joint-Velocity*



Gambar 3.12 *Insert Joint-Rotational Velocity*

10. Eksekusi Hasil

Tahap terakhir dari simulasi yaitu eksekusi hasil. Hasil simulasi dilakukan untuk mengetahui hasil dari analisa yang telah dijalankan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.13. Akan didapat tabel data berupa distribusi temperatur maksimal pada kondisi tiap waktu pengelasan.



Gambar 3.13 Eksekusi Hasil

3.6 Simulasi Jurnal Terdahulu

Pada penelitian jurnal yang diterbitkan oleh P. Biswas dan N. R. Mandal dengan judul “*Effect of Tool Geometries on Thermal History of FSW of AA1100*” meneliti secara tiga dimensi dengan metode elemen hingga dan secara eksperimental. Analisa dilakukan dengan parameter *tool* dan proses yang berbeda. *Tool* yang digunakan terbuat dari SS310 dan material yang akan dilas adalah AA1100. Bentuk *tool* yang digunakan menggunakan bentuk silindris. Material AA1100 memiliki titik leleh yang bernilai 660°C.

Tabel 3.1 Parameter FSW

<i>Thickness of plates (mm)</i>	<i>Pin Diameter (mm)</i>	<i>Shoulder Diameter (mm)</i>	<i>Rotational Speed (rpm)</i>	<i>Tranverse Speed (mm/s)</i>	<i>Average Plunging Force (N)</i>
6	6	25	1400	112	5090

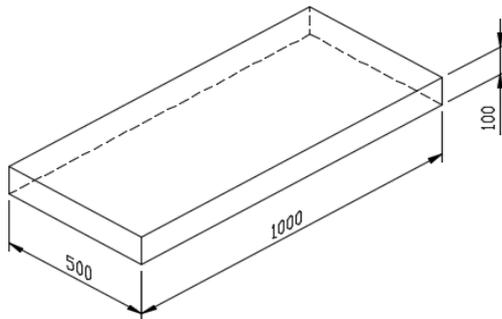
Proses pengelasan *friction stir welding* pada jurnal ini mengacu pada parameter sesuai tabel 1.3 dan untuk nilai temperatur maksimum yang didapat dari hasil simulasi yaitu sebesar 540⁰C dengan persentase 81,8% dari titik leleh material tersebut.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

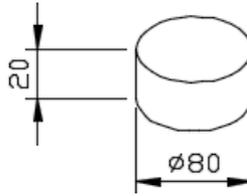
4.1 Spesifikasi Plat dan Tool

Pada simulasi *friction stir welding* dilakukan pemodelan sederhana untuk melihat seberapa besar pengaruh nilai variasi parameter terhadap distribusi temperatur. Distribusi temperatur dihasilkan pada sebuah material solid berbentuk plat tipis dengan menggunakan material *aluminium alloy*. Material ini memiliki titik leleh sebesar 660°C. Pendiskritan dilakukan dengan ukuran mesh 20 mm x 20 mm x 20 mm pada plat dengan geometri berukuran 1000 mm x 500 mm x 100 mm seperti pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Dimensi Plat

Material yang digunakan pada tool untuk proses *friction stir welding* yaitu *structural steel*. *Structural steel* merupakan salah satu baja perkakas pengerjaan panas yang paling sering digunakan. Baja ini memiliki kombinasi kekuatan, ketahanan aus, dan ketangguhan yang sangat baik serta titik cair yang tinggi. Ditinjau dari sifat *structural steel*, baja tipe ini cocok digunakan untuk tool *friction stir welding*. Bentuk dari tool pada simulasi *friction stir welding* itu sendiri disederhanakan seperti pada gambar 4.2 dimana memiliki ketebalan 20 mm dengan diameter 80 mm.

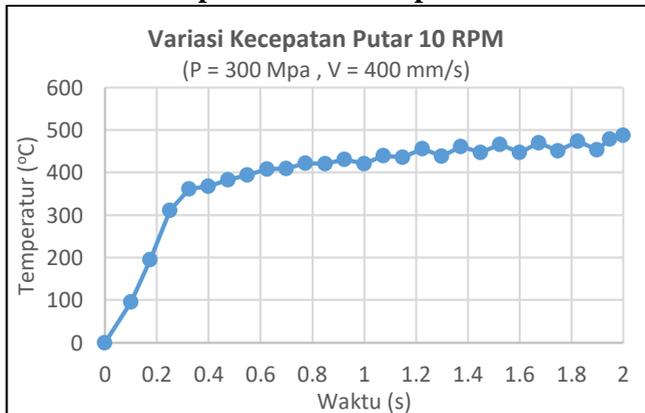


Gambar 4.2 Dimensi Tool yang Disederhanakan

4.2 Pengaruh Variasi Kecepatan Putar Tool

Dalam simulasi variasi parameter kecepatan putar, untuk mendapatkan grafik pengaruh variasi kecepatan putar tool terhadap distribusi temperatur dilakukan tiga kali simulasi dengan menggunakan nilai parameter kecepatan putar yang berbeda-beda yaitu sebesar 10 Rpm, 20 Rpm dan 30 Rpm. Untuk nilai parameter yang lain pada ketiga percobaan tersebut seperti tekanan dan kecepatan pengelasan diatur konstan dengan nilai masing-masing sebesar 300 Mpa dan 400 mm/s. Grafik hasil yang ditunjukkan berupa temperatur terhadap waktu, dimana waktu itu sendiri diatur selama 2s dalam menyelesaikan satu kali pengelasan yang memiliki jarak 800 mm.

4.2.1. Variasi Kecepatan Putar 10 Rpm

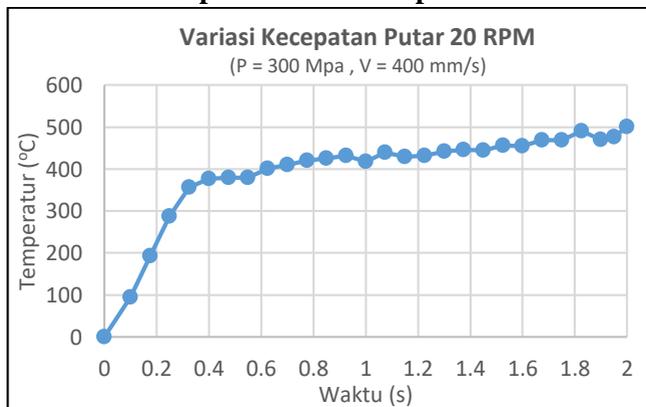


Gambar 4.3 Grafik Variasi Kecepatan Putar 10 Rpm

Pada Gambar 4.3 didapat bahwa pada simulasi variasi parameter pertama dengan nilai kecepatan putar sebesar 10 rpm untuk grafik pengaruh variasi kecepatan putar tool terhadap distribusi temperatur plat aluminium alloy memiliki trend yang cenderung naik. Temperatur maksimum didapat pada titik akhir dari pengelasan sebesar 487,74 °C.

Berdasarkan grafik diatas, pada waktu ke 0s sampai waktu ke 0,4s temperatur mengalami kenaikan yang signifikan dikarenakan pada waktu tersebut merupakan waktu dimana panas mulai timbul dari permukaan plat yang mulanya diam kemudian diberi gesekan oleh tool yang bertekanan, berputar dan bergerak melintang. Ketika tool bergerak mencapai waktu ke 0,4s pada temperatur 368,19°C, penyebaran panas yang timbul pada tool dan plat akibat gesekan sudah mulai merata, sehingga pada waktu ke 0,4s sampai waktu ke 2s terjadi kenaikan temperatur yang konstan.

4.2.2. Variasi Kecepatan Putar 20 Rpm



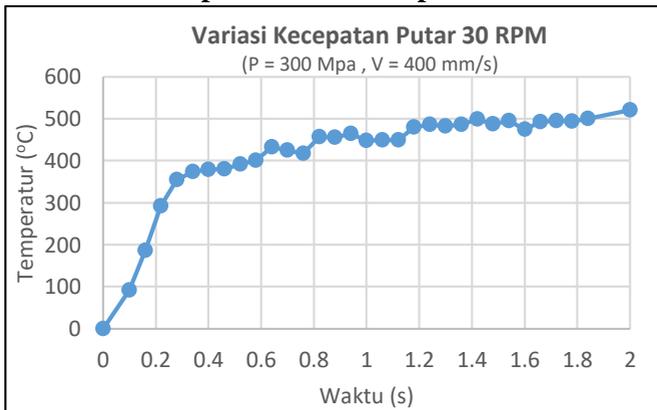
Gambar 4.4 Grafik Variasi Kecepatan Putar 20 Rpm

Pada Gambar 4.4 didapat bahwa pada simulasi variasi parameter kedua dengan nilai kecepatan putar sebesar 20 rpm untuk grafik pengaruh variasi kecepatan putar tool terhadap distribusi temperatur plat *aluminium alloy* memiliki trend yang

cenderung naik dengan temperatur maksimum yang didapat pada titik akhir dari pengelasan sebesar $500,94^{\circ}\text{C}$.

Berdasarkan grafik diatas, pada waktu ke 0s sampai waktu ke 0,4s temperatur mengalami kenaikan yang signifikan dikarenakan pada waktu tersebut merupakan waktu dimana panas mulai timbul dari permukaan plat yang mulanya diam kemudian diberi gesekan oleh tool yang berputar dan bergerak melintang. Ketika tool bergerak mencapai waktu ke 0,4s pada temperatur $377,18^{\circ}\text{C}$, penyebaran panas yang timbul pada tool dan plat akibat gesekan sudah mulai merata, sehingga pada waktu ke 0,4s sampai waktu ke 2s terjadi kenaikan temperatur yang konstan.

4.2.3. Variasi Kecepatan Putar 30 Rpm



Gambar 4.5 Grafik Variasi Kecepatan Putar 30 Rpm

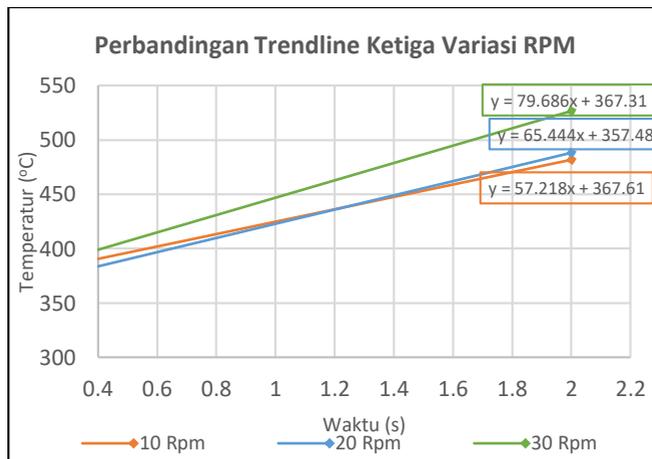
Pada Gambar 4.5 didapat bahwa pada simulasi variasi parameter ketiga dengan nilai kecepatan putar sebesar 30 rpm untuk grafik pengaruh variasi kecepatan putar tool terhadap distribusi temperatur plat alumunium alloy memiliki trend yang cenderung naik dengan temperatur maksimum yang didapat pada titik akhir dari pengelasan sebesar $520,3^{\circ}\text{C}$.

Berdasarkan grafik diatas, pada waktu ke 0s sampai waktu ke 0,4s temperatur mengalami kenaikan yang signifikan

dikarenakan pada waktu tersebut merupakan waktu dimana panas mulai timbul dari permukaan plat yang mulanya diam kemudian diberi gesekan oleh tool yang berputar dan bergerak melintang. Ketika tool bergerak mencapai waktu ke 0,4s pada temperatur 378,63°C, penyebaran panas yang timbul pada tool dan plat akibat gesekan sudah mulai merata, sehingga pada waktu ke 0,4s sampai waktu ke 2s terjadi kenaikan temperatur yang konstan.

Dari ketiga grafik variasi kecepatan putar terlihat bahwa terdapat penurunan nilai temperatur di beberapa waktu tertentu yang disebabkan oleh pembacaan temperatur yang kurang sesuai dimana pada beberapa titik, temperatur yang terbaca merupakan temperatur yang dipengaruhi oleh elemen sebelahnya (yang dingin) dimana elemen sebelumnya terlewat (tidak terbaca), hal ini disebabkan oleh pengaturan *timestep* yang terlalu besar.

4.2.4. Perbandingan Trendline Ketiga Variasi Kecepatan Putar



Gambar 4.6 Perbandingan Trendline Ketiga Variasi Kecepatan Putar

Dari ketiga percobaan variasi parameter kecepatan putar *friction stir welding* pada plat *aluminium alloy* dibuat trendline dalam satu grafik dimana ketiga trendline tersebut dibandingkan dari saat penyebaran panas mulai timbul dari permukaan plat yang mulanya diam kemudian diberi gesekan oleh tool yang bertekanan, berputar dan bergerak melintang yang dimana pada saat itu kenaikan temperatur sudah konstan hingga selesai melakukan pengelasan yang berjarak 800 mm.

Berdasarkan trendline diatas terlihat bahwa garis yang memiliki gradien garis tertinggi adalah garis temperatur dengan kecepatan putar 30 Rpm yaitu sebesar 79,686 lalu disusul garis temperatur dengan kecepatan putar 20 Rpm dengan gradien garis 65,444 dan gradient garis dengan nilai terkecil adalah garis temperatur dengan kecepatan putar 10 Rpm yaitu sebesar 57,218.

Dengan demikian, dari ketiga percobaan variasi parameter kecepatan putar didapat bahwa semakin tinggi nilai kecepatan putar pada *friction stir welding*, maka semakin tinggi pula temperatur maksimum yang didapat. Hal ini berhubungan dengan kualitas dari hasil pengelasan *friction stir welding* itu sendiri, yang mana semakin tinggi temperatur yang dihasilkan (dalam kisaran 70-90% titik leleh material) semakin baik kualitas dari pengelasan tersebut.

Berdasarkan hasil percobaan simulasi variasi parameter kecepatan putar, distribusi temperatur dan persentase nilai temperatur maksimum terhadap titik leleh material *aluminium alloy* sebagai berikut:

Tabel 4.1 Distribusi Temperatur dan Persentase Titik Leleh Material dari Ketiga Variasi Kecepatan Putar

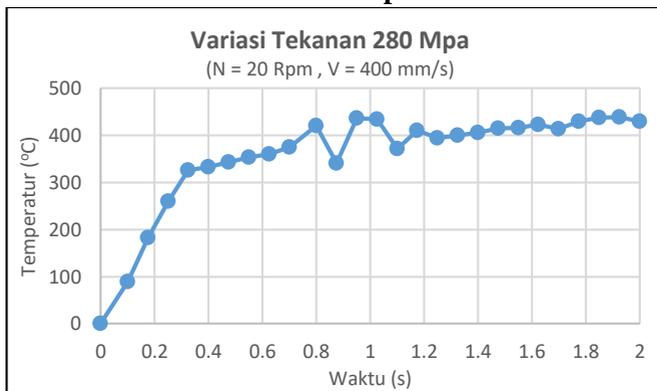
Kecepatan Putar (Rpm)	Temperatur Rata-Rata (°C)	Standar Deviasi	Temperatur Maksimum (°C)	% Titik Leleh Material
10	455,06	17,9	487,74	73,9%
20	455,83	23,24	500,94	75,9%
30	483,61	20,18	520,3	78,83%

Maka pada simulasi percobaan ketiga variasi parameter kecepatan putar tersebut didapat bahwa parameter yang memiliki nilai kecepatan putar sebesar 30 Rpm dengan nilai temperatur maksimum sebesar 520,3°C (78,83% dari titik leleh *aluminium alloy*) memiliki kualitas pengelasan yang paling baik. memiliki kualitas pengelasan yang paling baik.

4.3 Pengaruh Variasi Tekanan Tool

Dalam simulasi variasi parameter tekanan, untuk mendapatkan grafik pengaruh variasi tekanan terhadap temperatur dilakukan tiga kali simulasi dengan menggunakan nilai parameter tekanan yang berbeda-beda yaitu sebesar 280 Mpa, 300 Mpa dan 320 Mpa. Untuk nilai parameter yang lain pada ketiga percobaan tersebut seperti Kecepatan putar dan kecepatan pengelasan diatur konstan dengan nilai masing-masing sebesar 20 Rpm dan 400mm/s. Grafik hasil yang ditunjukkan berupa temperatur terhadap waktu, dimana waktu itu sendiri diatur selama 2s dalam menyelesaikan satu kali pengelasan yang memiliki jarak 800mm.

4.3.1. Variasi Tekanan Tool 280 Mpa



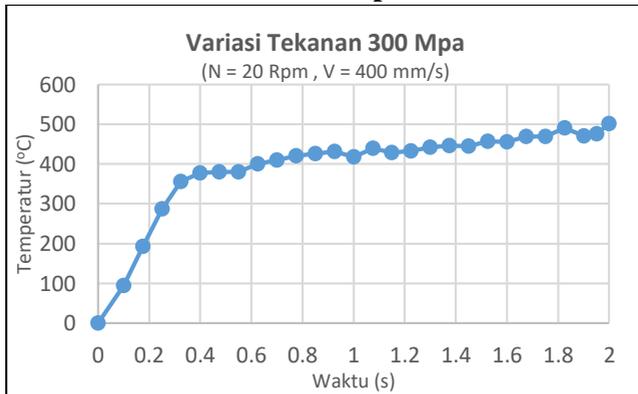
Gambar 4.7 Grafik Variasi Tekanan Tool 280 Mpa

Pada Gambar 4.7 didapat bahwa pada simulasi variasi parameter pertama dengan nilai tekanan sebesar 280 mpa untuk grafik pengaruh variasi tekanan tool terhadap distribusi

temperatur plat aluminium alloy memiliki trend yang cenderung naik dengan temperatur maksimum sebesar 438,48°C yang didapat pada waktu ke-1,925 dari waktu pengelasan.

Berdasarkan grafik diatas, pada waktu ke 0s sampai waktu ke 0,325s temperatur mengalami kenaikan yang signifikan dikarenakan pada waktu tersebut merupakan waktu dimana panas mulai timbul dari permukaan plat yang mulanya diam kemudian diberi gesekan oleh tool yang berputar dan bergerak melintang. Ketika tool bergerak mencapai waktu ke 0,325s pada temperatur 325,31°C, penyebaran panas yang timbul pada tool dan plat akibat gesekan sudah mulai merata, sehingga pada waktu ke 0,325s sampai waktu ke 2s terjadi kenaikan temperatur yang konstan.

4.3.2. Variasi Tekanan Tool 300 Mpa

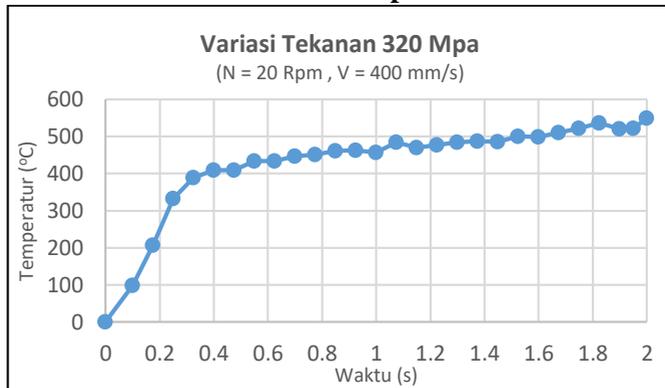


Gambar 4.8 Grafik Variasi Tekanan Tool 300 Mpa

Pada Gambar 4.8 didapat bahwa pada simulasi variasi parameter kedua dengan nilai tekanan sebesar 300 Mpa untuk grafik pengaruh variasi tekanan tool terhadap distribusi temperatur plat aluminium alloy memiliki trend yang cenderung naik dengan temperatur maksimum sebesar 509,94°C yang didapat pada waktu ke 2s dari waktu pengelasan.

Berdasarkan grafik diatas, pada waktu ke 0s sampai waktu ke 0,4s temperatur mengalami kenaikan yang signifikan dikarenakan pada waktu tersebut merupakan waktu dimana panas mulai timbul dari permukaan plat yang mulanya diam kemudian diberi gesekan oleh tool yang berputar dan bergerak melintang. Ketika tool bergerak mencapai waktu ke 0,4s pada temperatur 377,18°C, penyebaran panas yang timbul pada tool dan plat akibat gesekan sudah mulai merata, sehingga pada waktu ke 0,4s sampai waktu ke 2s terjadi kenaikan temperatur yang konstan.

4.3.3. Variasi Tekanan Tool 320 Mpa



Gambar 4.9 Grafik Variasi Tekanan Tool 320 Mpa

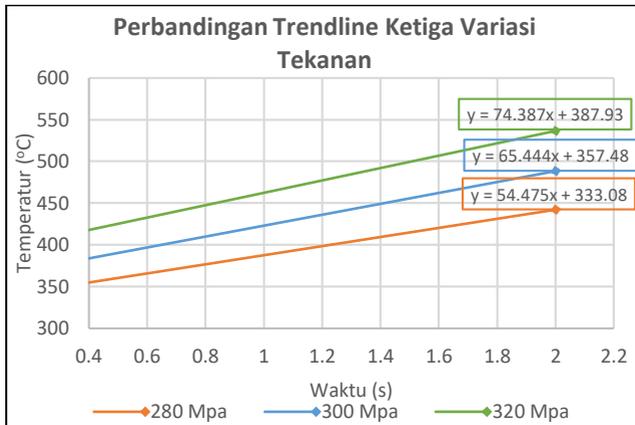
Pada Gambar 4.9 didapat bahwa pada simulasi variasi parameter ketiga dengan nilai tekanan sebesar 320 Mpa untuk grafik pengaruh variasi tekanan tool terhadap distribusi temperatur plat *aluminium alloy* memiliki trendline yang cenderung naik dengan temperatur maksimum sebesar 549,98°C yang didapat pada waktu terakhir dari waktu pengelasan.

Berdasarkan grafik diatas, pada waktu ke 0s sampai waktu ke 0,4s temperatur mengalami kenaikan yang signifikan dikarenakan pada waktu tersebut merupakan waktu dimana panas mulai timbul dari permukaan plat yang mulanya diam

kemudian diberi gesekan oleh tool yang berputar dan bergerak melintang. Ketika tool bergerak mencapai waktu ke 0,4s pada temperatur 409,63°C, penyebaran panas yang timbul pada tool dan plat akibat gesekan sudah mulai merata, sehingga pada waktu ke 0,4s sampai waktu ke 2s terjadi kenaikan temperatur yang konstan.

Dari ketiga grafik variasi tekanan tool terlihat bahwa terdapat penurunan nilai temperatur di beberapa waktu tertentu yang disebabkan oleh pembacaan temperatur yang kurang sesuai dimana pada beberapa titik, temperatur yang terbaca merupakan temperatur yang dipengaruhi oleh elemen sebelumnya (yang dingin) dimana elemen sebelumnya terlewat (tidak terbaca), hal ini disebabkan oleh pengaturan *timestep* yang terlalu besar.

4.3.4. Perbandingan Trendline Ketiga Variasi Tekanan Tool



Gambar 4.10 Perbandingan Trendline Ketiga Variasi Tekanan Tool

Dari ketiga percobaan variasi tekanan pengelasan *friction stir welding* pada plat *aluminium alloy* dibuat trendline dalam satu grafik dimana ketiga trendline tersebut dibandingkan dari

saat penyebaran panas mulai timbul dari permukaan plat yang mulanya diam kemudian diberi gesekan oleh tool yang bertekanan, berputar dan bergerak melintang yang dimana pada saat itu kenaikan temperatur sudah konstan hingga selesai melakukan pengelasan yang berjarak 800 mm.

Berdasarkan trendline diatas terlihat bahwa garis yang memiliki gradien garis tertinggi adalah garis temperatur dengan tekanan 320 Mpa yaitu sebesar 74,387 lalu disusul garis temperatur dengan tekanan 300 Mpa dengan gradien garis 65,444 dan gradient garis dengan nilai terkecil adalah garis temperatur dengan tekanan 280 Mpa yaitu sebesar 54,475.

Dengan demikian, dari ketiga percobaan variasi parameter tekanan tool didapat bahwa semakin tinggi nilai tekanan tool pada *friction stir welding*, maka semakin tinggi pula temperatur maksimum yang didapat. Hal ini berhubungan dengan kualitas dari hasil pengelasan *friction stir welding* itu sendiri, yang mana semakin tinggi temperatur yang dihasilkan (dalam kisaran 70-90% titik leleh material) semakin baik kualitas dari pengelasan tersebut.

Berdasarkan hasil percobaan simulasi variasi parameter tekanan, distribusi temperatur dan persentase nilai temperatur maksimum terhadap titik leleh material *aluminium alloy* sebagai berikut:

Tabel 4.2 Distribusi Temperatur dan Persentase Titik Leleh Material dari Ketiga Variasi Tekanan

Tekanan (Mpa)	Temperatur Rata-Rata (°C)	Standar Deviasi	Temperatur Maksimum (°C)	% Titik Leleh Material
280	415,3	18,86	438,48	66%
300	455,83	23,24	500,94	75,9%
320	500,27	25,95	549,98	83,33%

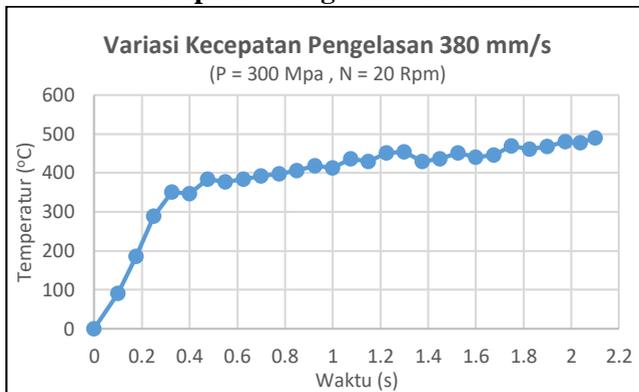
Maka pada simulasi percobaan ketiga variasi parameter tekanan tool tersebut didapat bahwa parameter yang memiliki nilai tekanan tool sebesar 320 Mpa dengan nilai temperatur

maksimum sebesar 549,98 °C (83,33% dari titik leleh *aluminium alloy*) memiliki kualitas pengelasan yang paling baik.

4.4 Pengaruh Variasi Kecepatan Pengelasan

Dalam simulasi variasi parameter kecepatan putar, untuk mendapatkan grafik pengaruh variasi kecepatan putar terhadap temperatur dilakukan tiga kali simulasi dengan menggunakan nilai parameter kecepatan putar yang berbeda-beda yaitu sebesar 380 mm/s, 400 mm/s dan 420 mm/s. Untuk nilai parameter yang lain pada ketiga percobaan tersebut seperti tekanan dan kecepatan putar pengelasan diatur konstan dengan nilai masing-masing sebesar 300 Mpa dan 20 Rpm. Grafik hasil yang ditunjukkan berupa temperatur terhadap waktu, dimana waktu itu sendiri disetting berdasarkan nilai variasi kecepatan masing-masing dalam melakukan satu kali pengelasan yang memiliki jarak 800 mm.

4.4.1. Variasi Kecepatan Pengelasan 380 mm/s



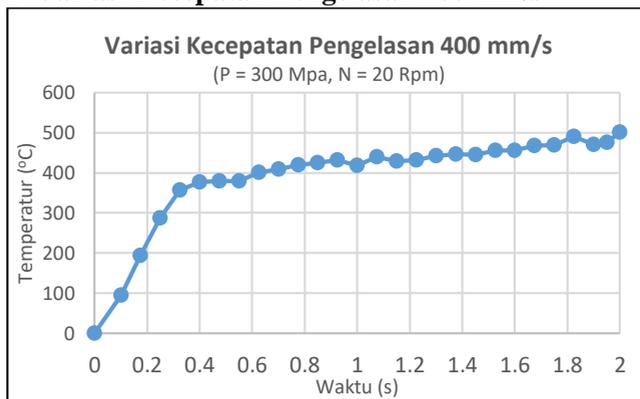
Gambar 4.11 Grafik Variasi Kecepatan Pengelasan 380 mm/s

Pada Gambar 4.11 didapat bahwa pada simulasi variasi parameter pertama dengan nilai kecepatan pengelasan sebesar 380 mm/s untuk grafik pengaruh variasi kecepatan pengelasan terhadap distribusi temperatur plat *aluminium alloy* membutuhkan waktu 2.1s untuk menyelesaikan pengelasan

dengan jarak 800 mm. Trend yang dihasilkan cenderung naik dengan temperatur maksimum sebesar 490,21°C yang didapat pada waktu terakhir dari waktu pengelasan..

Berdasarkan grafik diatas, pada waktu ke 0s sampai waktu ke 0,325s temperatur mengalami kenaikan yang signifikan dikarenakan pada waktu tersebut merupakan waktu dimana panas mulai timbul dari permukaan plat yang mulanya diam kemudian diberi gesekan oleh tool yang bertekanan, berputar dan bergerak melintang. Ketika tool bergerak mencapai waktu ke 0,325s pada temperatur 350,95°C, penyebaran panas yang timbul pada tool dan plat akibat gesekan sudah mulai merata, sehingga pada waktu ke 0,325s sampai waktu ke 2,1s terjadi kenaikan temperatur yang konstan.

4.4.2. Variasi Kecepatan Pengelasan 400 mm/s



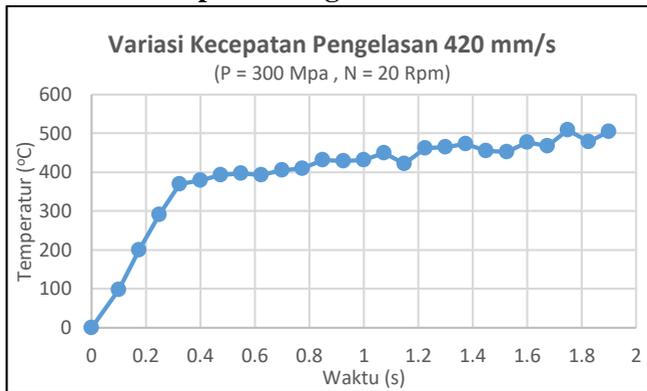
Gambar 4.12 Grafik Variasi Kecepatan Pengelasan 400 mm/s

Pada Gambar 4.12 didapat bahwa pada simulasi variasi parameter kedua dengan nilai kecepatan pengelasan sebesar 400 mm/s untuk grafik pengaruh variasi kecepatan pengelasan terhadap distribusi temperatur plat aluminium alloy membutuhkan waktu 2s untuk menyelesaikan pengelasan dengan jarak 800 mm. Trend yang dihasilkan cenderung naik

dengan temperatur maksimum sebesar $500,94^{\circ}\text{C}$ yang didapat pada waktu terakhir dari waktu pengelasan..

Berdasarkan grafik diatas, pada waktu ke 0s sampai waktu ke 0,325s temperatur mengalami kenaikan yang signifikan dikarenakan pada waktu tersebut merupakan waktu dimana panas mulai timbul dari permukaan plat yang mulanya diam kemudian diberi gesekan oleh tool yang bertekanan, berputar dan bergerak melintang. Ketika tool bergerak mencapai waktu ke 0,325s pada temperatur $356,34^{\circ}\text{C}$, penyebaran panas yang timbul pada tool dan plat akibat gesekan sudah mulai merata, sehingga pada waktu ke 0,325s sampai waktu ke 2s terjadi kenaikan temperatur yang konstan.

4.4.3. Variasi Kecepatan Pengelasan 420 mm/s



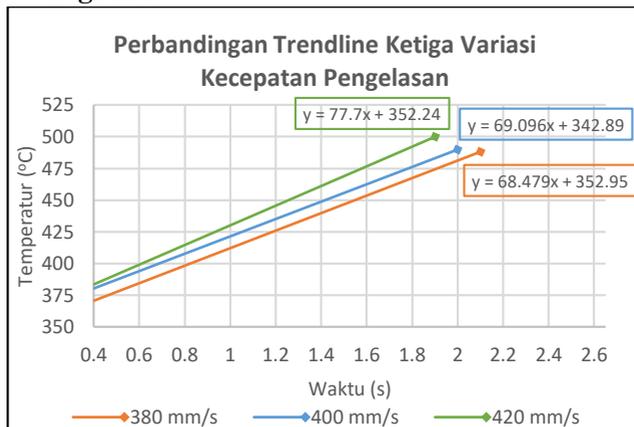
Gambar 4.13 Grafik Variasi Kecepatan Pengelasan 420 mm/s

Pada Gambar 4.13 didapat bahwa pada simulasi variasi parameter ketiga dengan nilai kecepatan pengelasan sebesar 420 mm/s untuk grafik pengaruh variasi kecepatan pengelasan terhadap distribusi temperatur plat *aluminium alloy* membutuhkan waktu 1.9s untuk menyelesaikan pengelasan dengan jarak 800 mm. Trend yang dihasilkan cenderung naik dengan temperatur maksimum sebesar $508,8^{\circ}\text{C}$ yang didapat pada waktu ke 1,75 dari waktu pengelasan..

Berdasarkan grafik diatas, pada waktu ke-0s sampai waktu ke-0,44s temperatur mengalami kenaikan yang signifikan dikarenakan pada waktu tersebut merupakan waktu dimana panas mulai timbul dari permukaan plat yang mulanya diam kemudian diberi gesekan oleh tool yang berputar dan bergerak melintang. Ketika tool bergerak mencapai waktu ke 0,44s pada temperatur 473,89°C, penyebaran panas yang timbul pada tool dan plat akibat gesekan sudah mulai merata, sehingga pada waktu ke 0,44s sampai waktu ke 2s terjadi kenaikan temperatur yang konstan.

Dari ketiga grafik variasi kecepatan pengelasan terlihat bahwa terdapat penurunan nilai temperatur di beberapa waktu tertentu yang disebabkan oleh pembacaan temperatur yang kurang sesuai dimana pada beberapa titik, temperatur yang terbaca merupakan temperatur yang dipengaruhi oleh elemen sebelahnya (yang dingin) dimana elemen sebelumnya terlewat (tidak terbaca), hal ini disebabkan oleh pengaturan *timestep* yang terlalu besar.

4.4.4. Perbandingan Trendline Ketiga Variasi Kecepatan Pengelasan



Gambar 4.14 Perbandingan Trendline Ketiga Variasi Kecepatan Pengelasan

Dari ketiga percobaan variasi kecepatan pengelasan *friction stir welding* pada plat *aluminium alloy* dibuat trendline dalam satu grafik dimana ketiga trendline tersebut dibandingkan dari saat penyebaran panas mulai timbul dari permukaan plat yang mulanya diam kemudian diberi gesekan oleh tool yang bertekanan, berputar dan bergerak melintang yang dimana pada saat itu kenaikan temperatur sudah konstan hingga selesai melakukan pengelasan yang berjarak 800 mm.

Berdasarkan trendline diatas terlihat bahwa garis yang memiliki gradien garis tertinggi adalah garis temperatur kecepatan 420 mm/s yaitu 77,7 lalu disusul garis temperatur kecepatan 400 mm/s dengan gradien garis 69,096 dimana memiliki nilai gradient yang hampir sama dengan gradien garis temperatur kecepatan 380 mm/s yaitu sebesar 68,479.

Dengan demikian, dari ketiga percobaan variasi parameter kecepatan pengelasan didapat bahwa semakin tinggi nilai kecepatan pengelasan pada *friction stir welding*, maka semakin tinggi pula temperatur maksimum yang didapat. Hal ini berhubungan dengan kualitas dari hasil pengelasan *friction stir welding* itu sendiri, yang mana semakin tinggi temperatur yang dihasilkan (dalam kisaran 70-90% titik leleh material) semakin baik kualitas dari pengelasan tersebut.

Berdasarkan hasil percobaan simulasi variasi parameter kecepatan pengelasan, distribusi temperatur dan persentase nilai temperatur maksimum terhadap titik leleh material *aluminium alloy* sebagai berikut:

Tabel 4.3 Distribusi Temperatur dan Persentase Titik Leleh Material dari Ketiga Variasi Kecepatan Pengelasan

Kecepatan Las (mm/s)	Temperatur Rata-Rata (°C)	Standar Deviasi	Temperatur Maksimum (°C)	% Titik Leleh Material
380	451,8	21,42	490,21	74,27%
400	455,83	23,24	500,94	75,9%
420	465,15	24,74	508,8	77,09%

Maka pada simulasi percobaan ketiga variasi parameter kecepatan pengelasan tersebut didapat bahwa parameter yang memiliki nilai kecepatan las sebesar 420 mm/s dengan nilai temperatur maksimum sebesar 508,8°C (77,09% dari titik leleh *aluminium alloy*) memiliki kualitas pengelasan yang paling baik.

4.5 Optimasi Parameter Proses dengan Metode Taguchi

Pada pengelasan menggunakan metode *friction stir welding*, hasil pengelasan dapat dikatakan optimal apabila temperatur maksimum yang dihasilkan sebesar 70-90% dari titik leleh logam dasar yang digunakan, dimana apabila temperatur maksimum sudah berada di kisaran persentase tersebut temperatur paling optimal untuk menghasilkan pengelasan dengan kualitas paling baik yaitu nilai tertinggi yang ada pada kisaran persentase tersebut.

4.5.1. Parameter dan Level

Distribusi temperatur yang terjadi selama proses *friction stir welding* secara langsung mempengaruhi *mechanical properties*, *residual stress* dan mikrostruktur. Oleh karena itu, temperatur pengelasan yang optimum harus didapatkan. Dalam penelitian ini, temperatur di optimalkan dengan mengendalikan parameter berikut:

1. Kecepatan Putar (Rpm)
2. Kecepatan Pengelasan (mm/s)
3. Tekanan (Mpa)

Tingkat parameter yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 4.4 berikut:

Tabel 4.4 Tingkat Parameter *Friction Stir Welding* yang Digunakan

Parameter	Level		
	1	2	3
P (Mpa)	280	300	320
N (Rpm)	10	20	30
V (mm/s)	380	400	420

4.5.2. Pemilihan *Array Orthogonal*

Berdasarkan jumlah faktor dan tingkat *array orthogonal* taguchi yang sesuai untuk percobaan simulasi *friction stir welding* dipilih dengan menggunakan perangkat lunak statistik MINITAB. Tabel orthogonal yang digunakan harus mempunyai jumlah baris minimum yang tidak boleh kurang dari total derajat kebebasan parameter dan level yang telah ditetapkan. Derajat kebebasan parameter proses dan level tersebut ditunjukkan pada 4.5 berikut:

Tabel 4.5 Total Derajat Kebebasan Parameter dan Level

No	Parameter Proses	Jumlah Level (k)	$V_n = (k-1)$
1	Tekanan Tool (P)	3	2
2	Kecepatan Putar (N)	3	2
3	Kecepatan Las (V)	3	2
Total Derajat Kebebasan			6

Dari Tabel 4.5 derajat kebebasan yang dimiliki ialah 6, sesuai dengan pilihan yang tersedia, tabel orthogonal L_9 memenuhi syarat untuk dijadikan rancangan percobaan. Rancangan percobaan tersebut dapat ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Rancangan Percobaan

Percobaan ke-	Level		
	P	N	V
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

4.5.3. Pembahasan Hasil

Dalam penelitian ini, dari sembilan kali simulasi percobaan dengan nilai parameter sesuai pada tabel 4.7 efek parameter proses terhadap temperatur maksimum yang dihasilkan telah didapat. Hasil simulasi dari temperatur maksimum yang didapat dari tiap simulasi masing-masing dikonversikan ke dalam nilai rasio S/N.

Tabel 4.7 Hasil Simulasi dan Rasio S/N berdasarkan Metode Taguchi

No	Level			Temperatur Maksimum (°C)	Persentase titik Leleh Material (%)	S/N Ratio
	P	N	V			
1	280	10	380	446,77	67,69	53.0017
2	280	20	400	467,91	70,89	53.4032
3	280	30	420	478,33	72,47	53.5946
4	300	10	400	487,74	73,9	53.7638
5	300	20	420	508,8	77,09	54.1309
6	300	30	380	495,55	75,08	53.9017
7	320	10	420	539,97	81,81	54.6474
8	320	20	380	534,13	80,92	54.5529
9	320	30	400	561,86	85,13	54.9926

Perangkat lunak statistik minitab digunakan untuk menghitung rasio S/N dengan menggunakan kriteria LTB. Kriteria *Larger The Better* (LTB) dipilih karena dengan semakin besarnya nilai temperatur yang didapat (dalam kisaran 70-90% titik leleh material), maka kualitas pengelasan yang dihasilkan akan semakin baik.

Nilai dari temperatur maksimum dan rasio S/N ditunjukkan pada tabel 4.6. Setelah menghitung rasio S/N dari tiap eksperimen dengan menggunakan software minitab, nilai rata-rata dari rasio S/N dihitung pada setiap faktor dan level. Sebagai contoh, nilai tengah dari rasio S/N untuk parameter

proses tekanan level 1 dapat dihitung dengan menghitung rata-rata dari penjumlahan nilai rasio S/N pada eksperimen no. 1, 2, 3, dan untuk level 2 eksperimen no. 4, 5, 6 dan pada level 3 eksperimen no. 7, 8, 9. Nilai tengah dari rasio S/N pada tiap level parameter yang lain dapat dihitung dengan ketentuan yang sama dimana hasil perhitungannya ditampilkan pada tabel 4.8 berikut.

Tabel 4.8 *Main Effect* dari Ketiga Variasi Parameter Proses

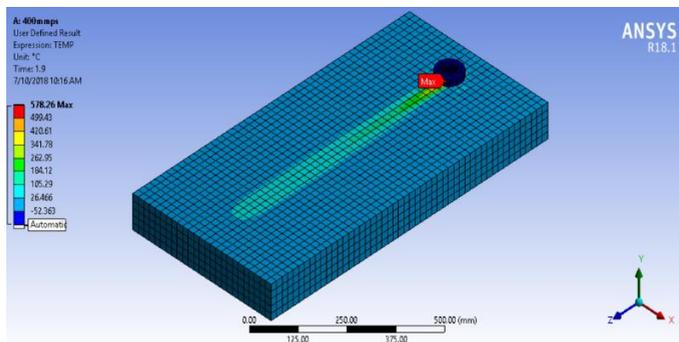
Parameter	Level 1	Level 2	Level 3	<i>Main Effect</i>
P	53,33	53,93	54,73	1,4
N	53,80	54,03	54,16	0,36
V	53,82	54,05	54,12	0,31

Main effect dari tiap parameter didapat dengan menghitung selisih dari nilai tertinggi dengan nilai terendah diantara level dari parameter tersebut.



Gambar 4.15 Grafik *Main Effect* dari Ketiga Variasi Parameter Proses

Gambar 4.15 menunjukkan tingkat pengaruh dari tiap parameter proses terhadap temperatur maksimum yang dihasilkan. Nilai titik maksimum pada tiap grafik menunjukkan nilai paling optimal dari parameter proses. Grafik tersebut juga menyatakan kondisi optimum dari besarnya rentang/kisaran kondisi eksperimen yang dilakukan. Parameter proses yang paling berpengaruh secara signifikan dalam menghasilkan temperatur yang optimal yaitu tekanan tool dengan nilai *main effect* sebesar 1,4. Selain itu, berdasarkan grafik diatas terlihat bahwa tekanan merupakan parameter proses yang memiliki kisaran nilai rasio S/N yang terbesar.



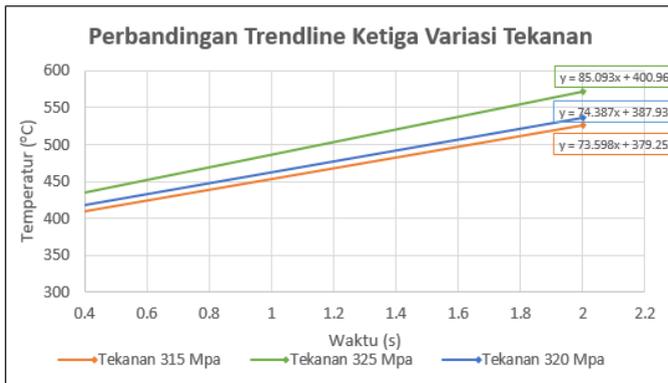
Gambar 4.16 Hasil Eksperimen Simulasi Menggunakan Parameter Proses yang Optimum

Berdasarkan data simulasi sembilan eksperimen pada tabel 4.6, didapat bahwa temperatur yang paling optimal didapat saat nilai $P = 320$ mpa, $N = 30$ rpm dan $V = 400$ mm/s dengan persentase terhadap titik leleh *aluminium alloy* sebesar 85,13%. Dari grafik *main effect* didapat bahwa temperatur akan optimal ketika $P = 320$ mpa, $N = 30$ rpm dan $V = 420$ mm/s. Setelah dilakukan simulasi menggunakan nilai parameter proses tersebut, didapat bahwa nilai temperatur optimum pada eksperimen simulasi sebesar 578,26°C dengan persentase terhadap titik leleh aluminium alloy sebesar 87,61%. Hal ini

menunjukkan bahwa dengan menggunakan nilai variasi parameter yang optimal berdasarkan grafik *main effect*, didapat temperatur yang lebih optimal daripada sembilan eksperimen simulasi yang telah dilakukan.

4.5.4. Konfirmasi Parameter Proses yang Berpengaruh Signifikan

Untuk mengkonfirmasi bahwa tekanan merupakan parameter proses yang paling berpengaruh secara signifikan dalam menghasilkan temperatur yang optimal, peneliti melakukan simulasi ulang dengan memvariasikan nilai tekanan sebesar 315 Mpa, 320 Mpa dan 325 Mpa. Dari ketiga percobaan variasi tekanan tersebut, dibuat trendline dalam satu grafik dimana ketiga trendline tersebut dibandingkan dari saat penyebaran panas mulai timbul dari permukaan plat yang mulanya diam kemudian diberi gesekan oleh tool yang bertekanan, berputar dan bergerak melintang yang dimana pada saat itu kenaikan temperatur sudah konstan hingga selesai melakukan pengelasan yang berjarak 800 mm.



Gambar 4.17 Konfirmasi Perbandingan Ketiga Variasi Tekanan Tool

Berdasarkan trendline diatas terlihat bahwa garis yang memiliki gradien garis tertinggi adalah garis temperatur dengan tekanan 325 Mpa yaitu sebesar 85,093 lalu disusul garis temperatur dengan tekanan 320 Mpa dengan gradien garis 74,387 dan gradien garis dengan nilai terkecil adalah garis temperatur dengan tekanan 315 Mpa yaitu sebesar 73,598.

Dari hasil percobaan variasi parameter tekanan tool tersebut, peneliti membandingkan ketiga nilai gradien garis yang didapat dengan gradien garis yang didapatkan dari variasi parameter proses kecepatan putar dan kecepatan pengelasan yang telah didapat sebelumnya seperti ditunjukkan pada tabel 4.9 berikut:

Tabel 4.9 Perbandingan Nilai Gradien Garis dari Ketiga Parameter Proses

Simulasi	Parameter Proses		
	Kecepatan Putar (10,20,30)	Tekanan Tool (315,320,325)	Kecepatan Pengelasan (380,400,420)
1	57,218	73,598	68,479
2	65,444	74,387	69,096
3	79,686	85,093	77,7

Dengan demikian, dari ketiga simulasi variasi masing-masing parameter proses didapat bahwa nilai gradien garis tertinggi dari tiap simulasinya dihasilkan pada parameter proses tekanan tool, dimana semakin tinggi nilai gradien garis yang didapat, semakin tinggi pula temperatur maksimum yang dihasilkan. Hal ini menunjukkan bahwa dengan menggunakan nilai variasi parameter proses tekanan tool yang berbeda, parameter proses yang berpengaruh signifikan terhadap terbentuknya temperatur maksimum tetap dihasilkan pada parameter proses tekanan tool.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan data hasil dari simulasi percobaan *friction stir welding* pada plat *aluminium alloy* yang telah dianalisa sebelumnya dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai variasi parameter kecepatan putar sebesar 30 rpm menghasilkan nilai temperatur maksimum tertinggi dari ketiga variasi yaitu sebesar 520,3°C dengan persentase terhadap titik leleh *aluminium alloy* sebesar 78,3%. Dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi nilai variasi parameter kecepatan putar maka temperatur yang dihasilkan semakin tinggi.
2. Nilai variasi parameter tekanan sebesar 320 Mpa menghasilkan nilai temperatur maksimum tertinggi dari ketiga variasi yaitu sebesar 549,98°C dengan persentase terhadap titik leleh *aluminium alloy* sebesar 83,33%. Dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi nilai variasi parameter tekanan maka temperatur yang dihasilkan semakin tinggi.
3. Nilai variasi parameter kecepatan pengelasan sebesar 420 mm/s menghasilkan nilai temperatur tertinggi dari ketiga variasi yaitu sebesar 508,8°C dengan persentase terhadap titik leleh *aluminium alloy* sebesar 77%. Dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi nilai variasi parameter kecepatan pengelasan maka temperatur yang dihasilkan semakin tinggi.
4. Dengan menggunakan metode taguchi, diperoleh bahwa tekanan merupakan parameter proses yang sangat berpengaruh terhadap temperatur maksimum yang dihasilkan.
5. Nilai temperatur yang optimal dari eksperimen simulasi dengan metode taguchi yaitu sebesar 578,26 °C dengan persentase terhadap titik leleh *aluminium alloy* sebesar 87,61%.

5.2 Saran

Beberapa hal yang perlu dilakukan untuk meningkatkan ketelitian dan akurasi simulasi pengelasan *friction stir welding* untuk penelitian kedepan adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan simulasi lebih lanjut dengan menggunakan software *ANSYS Mechanical APDL* dalam mensimulasikan pengelasan *friction stir welding* dengan bentuk tool dan proses pengelasan yang lebih sesuai sehingga dapat memperkuat hasil-hasil analisa di atas dengan parameter yang sama.
2. Perlu untuk mencoba penggunaan tool pin dengan bentuk profil yang berbeda agar didapat hasil pengelasan yang lebih variatif.
3. Menggunakan komputer dengan spesifikasi yang tinggi, sehingga dalam melakukan running simulasi tidak membutuhkan waktu yang lama.
4. Menggunakan *meshing* yang lebih kecil, karena besarnya *meshing* sangatlah berpengaruh pada ketelitian hasil pembacaan temperatur simulasi *friction stir welding* dimana nilai *meshing* yang lebih kecil akan menghasilkan ketelitian yang lebih tinggi sehingga nilai temperatur yang didapat lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

(Referensi artikel/prosiding/jurnal)

1. S verma, Meenu dan J P Misra, 2017. “Study on temperature distribution during Friction Stir Welding of 6082 aluminum alloy”, **5th International Conference of Materials Processing and Characterization (ICMPC 2016)**, 1350-1356
2. Jarot Wijayanto dan Agdha Anelis, 2010. “Pengaruh Feed Rate terhadap Sifat Mekanik pada Pengelasan Friction Stir Welding Alumunium 6110”, **Jurnal Kompetensi Teknik Vol.2, No.1**
3. Tarmizi dan Boy Prayoga,2016. “Analisa Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Pada Proses Friction Stir Welding Alumunium 5052”, **Jurnal Riset Industri Vol.10 No. 2**, Hal.70-82
4. BY P.Biswas dan N.R. Mandal, 2011. “Effect of Tool Geometries on Thermal History of FSW of AA1100”, **Supplement to The Welding Journal Vol.90**, 129-135
5. Renju Mohan, N.R. Rajesh, 2014. “Finite Element Modeling for Maximum Temperature in Friction Stir Welding of AA 1100 and Optimization of Process Parameter by Taguchi Method”,**International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET)**, 728-733
6. Bibit Sugito, Agus Dwi Anggono dan Damas Prasetyana,2016. “Pengaruh Kedalaman Pin (Depth Plunge) Terhadap Kekuatan Sambungan Las Pada Pengelasan Gesek AL 5083”, **The 3rd University Research Coloquium 2016**, 94-100
7. C. Hamilton, S. Dymek dan A. Sommers,2010. “Characteristic Temperature Curves for Aluminum Alloys during Friction Stir Welding”, **Supplement to The Welding Journal Vol.89**,Hal. 190-195
8. Soejanto, 2009. “Desain Eksperimen dengan Metode Taguchi”,**Yogyakarta : Graha Ilmu**

(Referensi buku)

1. Prof. Dr. Ir. Harsono Wiryosumarto dan Prof. Dr. Toshie Okumura,2000. “Teknologi Pengelasan Logam”, Cetakan ke-8

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Muhammad Iqbaal lahir di Cirebon, 1 September 1995. Merupakan anak pertama dari tiga bersaudara pasangan bapak Muchtar dan ibu Imma Adyani. Pendidikan formal yang ditempuh adalah SD Kartika Cirebon (2001-2007), SMP Negeri 1 Cirebon (2007-2010), dan SMA Negeri 2 Cirebon (2010-2013). Sejak muda, penulis selalu tertarik dengan dunia desain. Pada awalnya penulis melakukan studi di jurusan D3 Teknik Mesin Universitas Gadjah Mada, kemudian penulis melanjutkan studinya di jurusan S1 Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember yang terdaftar dengan NRP 02111645000038.

Selama masa kuliah, penulis aktif mengikuti kegiatan di yayasan Hamada regional Surabaya sebagai ketua. Selain itu penulis juga aktif di kegiatan UKM dan di beberapa kepanitiaan dan kegiatan lainnya selama menjadi mahasiswa Institut Teknologi Sepuluh Nopember .

Di Jurusan Teknik Mesin, penulis mengambil bidang studi Desain sebagai bahasan Tugas Akhir yang memiliki topik Studi Numerik Distribusi Temperatur dan Optimasi Parameter Proses Pada *Friction Stir Welding* Plat Aluminium Alloy yang dibimbing oleh bapak Ir. Julendra Bambang Ariatedja, MT. Jika ada informasi, pertanyaan maupun saran yang ingin disampaikan kepada Penulis, dapat melalui email m.iqbaal2121@gmail.com.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)