



TUGAS AKHIR - TM 141585

***ANALISA FINITE ELEMENT METHOD (FEM) UNTUK
FRICTION STIR WELDING***

**IBNU ADIWIYATA
NRP. 2110 100 058**

**Dosen Pembimbing
Ir.Yusuf Kaelani, Msc.E**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2017**



FINAL PROJECT - TM 141585

***ANALYSIS FINITE ELEMENT METHOD (FEM) FOR
FRICTION STIR WELDING***

**IBNU ADIWIYATA
NRP. 2110 100 058**

**Supervisor
Ir.Yusuf Kaelani, Msc.E**

**DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2017**

ANALISA *FINITE ELEMENT METHOD* (FEM) UNTUK *FRICTION STIR WELDING*

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

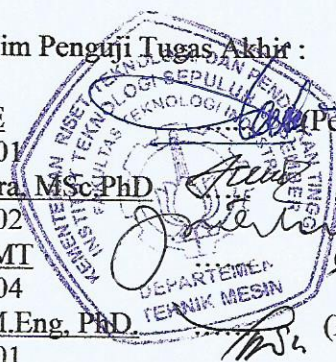
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

IBNU ADIWIYATA

NRP. 2110 100 058

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Ir. Yusuf Kaelani, MSc.E
NIP. 196511031990021001 (Pembimbing)
 2. Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, MSc, PhD
NIP. 195106051978031002 (Penguji I)
 3. Ir. Julendra B. Ariatedja, MT
NIP. 196807061999031004 (Penguji II)
 4. Achmad Syaifudin, ST, M.Eng, PhD
NIP. 197909262005011001 (Penguji III)
- 

SURABAYA

JANUARI, 2018

ANALISA FINITE ELEMENT METHOD (FEM) UNTUK FRICTION STIR WELDING

Nama Mahasiswa : Ibnu Adiwiyata
NRP : 2110 100 058
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Yusuf Kaelani, MSc.E

ABSTRAK

Aluminium adalah logam yang memiliki sifat resistensi yang baik, yaitu tahan terhadap korosi, Selain sifatnya yang tahan korosi, aluminium juga memiliki berat yang lebih ringan dibandingkan dengan baja, sehingga aluminium sering digunakan sebagai salah satu bahan yang digunakan dalam proses pengelasan. Proses pengelasan aluminium paduan salah satunya dapat dilakukan dengan cara pengelasan friction stir welding.

Friction Stir Welding (FSW) merupakan proses pengelasan baru yang dipromosikan dengan sedikit biaya dan kualitas sambungan yang baik. Hal itu dikarenakan pengelasan tidak membutuhkan logam pengisi dan bisa menghilangkan sedikit cacat retak dan porositas. Prinsip FSW menggunakan tools yang berotasi dan bergerak melintas sehingga material terjadi penempaan pada pusat lasan menjadi lebur. Kemungkinan terjadinya distribusi temperatur dan kecepatan pengelasan pada friction stir welding cukup besar. Keadaan ini terjadi dikarenakan pada saat proses pengadukan unit tool friction stir welding menerima gaya gesek dan tekan yang besar.

Secara umum, tujuan dari simulasi friction stir welding ini adalah untuk mengetahui distribusi temperatur dan kecepatan pengelasan,serta finite element pada proses pengelasan setelah membagi objek menjadi bagian-bagian kecil,dengan menggunakan simulasi ansys. Hal – hal yang

mampu dicakup oleh simulasi las gesek ini antara lain untuk memodelkan panas yang timbul dan fenomena apa saja yang terjadi pada daerah pengelasan serta efek yang menyertai proses las.

Kata Kunci: Aluminium, Friction stir welding, Distribusi temperatur, Kecepatan pengelasan

ANALYSIS FINITE ELEMENT METHOD (FEM) FOR FRICTION STIR WELDING

Name : Ibnu Adiwiyata
Reg Number : 2110 100 058
Departement : Teknik Mesin FTI-ITS
Supervisor : Ir. Yusuf Kaelani, MSc.E

ABSTRACT

Aluminum is a metal that has good resistance properties. It is resistant to corrosion, In addition to its corrosion, aluminum also has a lighter weight with steel, so aluminum is often used as one of the materials used in the process of clarity Alloy aluminum welding process can be done wrong by way of welding friction welding stir.

Friction Stir Welding (FSW) is a newly designed welding process with little cost and good connection quality. It happens that welding does not need cheap metal and can be slightly defective crack and porosity. The FSW principle uses a tool that rotates and moves across so that the material takes place at the center of the weld to melt. Friction stir welding is large enough. The current state occurs when the stirring process of the welding stroke brush compression unit receives a large frictional and tap force.

In general, the purpose of this welding swing simulation is to know the distribution of temperature and welding speed, as well as the finite element in the welding process after being split into small parts, using ansys simulations. Matters that can be covered by the simulation of friction welding are, among others, to model the heat that arises and any phenomena that occur in the welding area and the effects that accompany the welding process.

Keywords: Aluminum, Friction stir welding, temperature distribution, welding speed

*Dedicated to Bapak and Mama
For All Love, Trust, Support and All that have you
been sharing with me*

*Dearest to Marina Putri Maharani For the Love,
Motivation, Support, Patience and Faithful for me*

KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ

Alhamdulillah, tiada henti-hentinya penulis mengucapkan syukur kepada Allah SWT. Atas ridho-Nya, akhirnya penulis bisa menyelesaikan Tugas Akhir ini. Shalawat serta salam penulis kirimkan kepada Rasulullah SAW, sehingga sampai sekarang indahnya iman dan Islam masih terasa. Berbagai hambatan yang disertai air mata, terhapus sudah dengan kegembiraan selama menempuh. Menyadarkan penulis bahwa “*Man Jadda Wa Jadda*”, Barang siapa yang bersungguh – sungguh pasti akan mendapatkan hasil, “*When There is a Will, There is a Way*”. Bantuan dari berbagai pihak pun, tak luput dalam penyelesaian Tugas Akhir ini, baik bantuan secara materi, spiritual, informasi, motivasi. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Orangtua penulis, Ayah penulis Sugeng Priyono, Ibu penulis Alm. Kristanti, yang dengan sabar mendukung, mendoakan, dan menginspirasi penulis.
2. Pak Ir.Yusuf Kaelani, MSc.E. selaku pembimbing tugas akhir penulis, yang dengan setia dan sabar membimbing, memotivasi, mendoakan penulis agar menyelesaikan tugas akhir ini untuk meraih tujuan dan impian penulis.
3. Pak Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, MSc.PhD., Pak Ir.Julendra B. Ariatedja, MT, dan Pak Achmad Syaifudin, ST, M.Eng, PhD., selaku dosen penguji Tugas Akhir yang telah sabar memberikan waktu dan kesempatan disaat terakhir kepada penulis, sehingga penulis dapat lulus Sidang Tugas Akhir.
4. Kakak penulis,Netta Prismawiyati atas dukungan, cerewet, nasehat, doa, arahan, semangat, dan saran
5. *My SweetHeart*, Marina Putri Maharani yang dengan sabar menunggu dan memberikan perhatian kepada penulis untuk menyelesaikan tugas akhir ini. “사랑스레”

6. Teman – teman senasib seperjuangan saat pengerjaan tugas akhir, ilmy, maylana, irsyad, delia, agil, ricky, ipin, irsyad, terima kasih atas kerjasamanya.
7. Teman – teman yang mendukung penulis yanuar, nofal, ardian, popo, gunawan, erwin, balqis, chalid, yoyok, peter, dias, fadhil, betty, tetra, yadi, rasyid, pepeng, annisa, robby, prima, alif, tatiek, terima kasih atas dukungan dan doanya.
8. Arek–arek Mesin ITS M52 ,M53 ,M54 ,M55 ,M56 ,M57 ,M58 terima kasih atas persahabatan untuk membangun keluarga besar mesin UBER ALLES
9. Berbagai Pihak yang belum sempat penulis sebutkan jasa-jasanya dalam mendukung penyusunan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih belum sempurna, baik dalam penulisan laporan maupun analisis yang penulis lakukan. Oleh karena itu, diharapkan ada mahasiswa yang melakukan penelitian di bidang simulasi *Finite Element* dapat menyempurnakan tugas akhir ini. Semoga laporan ini dapat memberikan manfaat bagi para pembaca.

Surabaya, September 2017

Ibnu Adiwiyata

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR SIMBOL	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	3
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Tujuan Penelitian	4
1.5. Manfaat penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Dasar Teori	5
2.2.1. Jenis – jenis pengelasan	5
2.2. <i>Friction Stir Welding</i>	8
2.2.1. Keunggulan <i>FSW</i>	9
2.2.2. Prinsip kerja <i>Friction Stir Welding</i> ...	10
2.2.3. Mikrostruktur <i>FSW</i>	11
2.2.4. Siklus Proses <i>Friction Stir Welding</i> ...	12
2.3. <i>Finite Element Method (FEM)</i>	14
2.4. <i>Heat Flux</i>	15
2.5. Analisa Menggunakan <i>Ansys</i>	15
2.5.1. Tahapan proses menggunakan <i>software ANSYS</i>	15
2.6. Kecepatan Pengelasan	17
2.7. Distribusi Temperatur	19
2.8. Distribusi <i>Heat Flux</i>	20
2.9. Penelitian Terdahulu	22
2.8.1. Tugas akhir	

(Wijayanto&Anelis-2010)	22
2.8.2. Desain Pin <i>Tools FSW</i>	24
2.8.3. Parameter Pengelasan	24
2.8.4. Desain Joint	26
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	29
3.1. Flowchart Simulasi <i>FSW</i>	29
3.2. Prosedur Simulasi <i>FSW</i>	32
3.3. Flowchart Simulasi <i>Finite Element</i>	34
3.4. Prosedur Simulasi <i>Finite Element</i>	36
3.5. Verifikasi dengan <i>Handbook website</i>	37
3.5.1 Kekuatan dan momen reaksi alat	39
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	43
4.1. Analisa model simulasi	43
4.2. Analisa Parameter	43
4.3. Analisa Distribusi Temperatur	44
4.3.1. Analisa Temperatur 300	44
4.3.2. Analisa Temperatur 400	45
4.3.3. Analisa Temperatur 500	46
4.4. Analisa Distribusi Kecepatan	48
4.4.1. Analisa Kecepatan Putaran 800	48
4.4.2. Analisa Kecepatan Putaran 1000	49
4.4.3. Analisa Kecepatan Putaran 1200	50
4.5. Analisa Temperatur <i>Heat Flux</i>	51
4.5.1. Analisa <i>Heat flux</i> dengan <i>heat flow</i> 300	51
4.5.2. Analisa <i>Heat flux</i> dengan <i>heat flow</i> 400	52
4.5.3. Analisa <i>Heat flux</i> dengan <i>heat flow</i> 500	53
4.6. Hasil Simulasi <i>Ansys</i>	55
4.6.1. Diagram <i>Transient thermal</i>	55
4.6.2. Diagram Total <i>Heat Flux</i>	57
4.6.3. Diagram Total <i>Velocity</i>	59

4.7. Simulasi <i>Finite Element</i> pada simulasi <i>Ansys APDL</i>	61
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	65
5.1. Kesimpulan	65
5.2. Saran	66
DAFTAR PUSTAKA	67
LAMPIRAN	69
BIODATA PENULIS	85

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Klasifikasi Pengelasan	7
Gambar 2.2. Pengelasan FSW	9
Gambar 2.3. Prinsip kerja <i>Friction Stir Welding</i>	11
Gambar 2.4. Mikrostruktur material pengelasan	12
Gambar 2.5. Siklus proses FSW	13
Gambar 2.6. Gerakan Tool <i>Friction Stir Welding</i>	17
Gambar 2.7. Distribusi Temperatur	19
Gambar 2.8. Distribusi <i>Heat Flux</i>	22
Gambar 2.9. Rancangan tool	23
Gambar 2.10. Desain Pin tool	24
Gambar 2.11. <i>Joint</i> untuk pengelasan gesekan gesekan:	
(a) <i>Joint</i> persegi, (b) ujung <i>Joint</i> , (c) <i>Joint</i> t,	
(d) <i>Joint</i> pangkuan, (e) kemiringan putaran	
ganda, (f) <i>Joint</i> lap, dan (g) <i>Joint</i> fillet	27
Gambar 3.1. <i>Flowchart</i> FSW	31
Gambar 3.2 <i>Flowchart</i> <i>Finite Element</i>	35
Gambar 3.3 Lokasi partikel yang telah ditentukan	38
Gambar 3.4 Hasil simulasi menggunakan ABAQUS	38
Gambar 3.5 <i>Displacement magnitudes</i> pada jurnal lain	40
Gambar 3.6 <i>Displacement magnitudes</i> partikel pada	
“tracer 1”	41
Gambar 4.1. Grafik <i>Transient thermal</i> pada proses <i>friction</i>	
<i>stir welding</i>	55
Gambar 4.2. Gambar simulasi <i>Transient Thermal</i>	56
Gambar 4.3. Grafik <i>Total heat flux</i> pada <i>friction stir</i>	
<i>Welding</i>	57
Gambar 4.4. Gambar simulasi <i>Total Heat Flux</i>	58
Gambar 4.5. Grafik <i>Total Velocity</i> pada <i>friction stir</i>	
<i>welding</i>	59
Gambar 4.6. Gambar simulasi <i>Total Velocity</i>	60
Gambar 4.7. Gambar simulasi <i>Finite Element</i> pada	
<i>Heat Flux</i>	62
Gambar 4.8. Gambar simulasi <i>Finite Element</i> pada Nodal	63

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1.	Tabel Model Simulasi	43
Tabel 4.2.	Tabel Parameter Model Simulasi Pengelasan FSW	44
Tabel 4.3.	Tabel Analisa Temperatur dengan Temperatur 300	45
Tabel 4.4.	Tabel Analisa Temperatur dengan Temperatur 400	46
Tabel 4.5.	Tabel Analisa Temperatur dengan Temperatur 500	47
Tabel 4.6.	Tabel Analisa Kecepatan Putaran Mesin 800 rad/s	48
Tabel 4.7.	Tabel Analisa Kecepatan Putaran Mesin 1000 rad/s	49
Tabel 4.8.	Tabel Analisa Kecepatan Putaran Mesin 1200 rad/s	50
Tabel 4.9.	Tabel Analisa <i>Heat Flux</i> dengan <i>Heat Flow</i> 300 W	52
Tabel 4.10.	Tabel Analisa <i>Heat Flux</i> dengan <i>Heat Flow</i> 400 W	53
Tabel 4.11.	Tabel Analisa <i>Heat Flux</i> dengan <i>Heat Flow</i> 500 W	54

DAFTAR SIMBOL

Simbol

ω	=	Kecepatan putaran ($^{\circ}$)
r_s	=	Radius bahu probe (mm)
r_p	=	Radius pin (mm)
δ	=	Variabel status kontak
μ	=	Koefisien gesek antara probe dan plat
F	=	Gaya normal (kN)
r_0	=	Jari-jari belakang pada <i>shoulder</i> (mm)
R	=	Jarak titik sumbu probe (mm)
Q_1	=	Panas yang dihasilkan antara stir welding dan permukaan plat aluminium (J)
Q_{total}	=	Banyaknya panas yang dihasilkan dari jumlah panas permukaan probe dan plat (J)
Q_2	=	Perpindahan panas yang dihasilkan dari permukaan pin (J)
P	=	Tekanan aksial (Mpa)
T_0	=	Suhu Awal ($^{\circ}\text{C}$)
t_0	=	Waktu Awal Pengelasan ($^{\circ}\text{C}$)
T_{total}	=	Banyaknya temperatur yang dihasilkan dari jumlah temperatur pada permukaan probe dan plat ($^{\circ}\text{C}$)
h_{upside}	=	Koefisien perpindahan panas <i>upside</i> ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
$h_{downside}$	=	Koefisien perpindahan panas <i>downside</i> ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
V_{c_p}	=	Diameter tool probe (mm/s)
V_{ω}	=	Diameter tool probe (Rad/s)
C_p	=	Kapasitas panas pada tekanan konstan ($\text{J}/\text{Kg}^{\circ}\text{C}$)

Singkatan

FSW	=	<i>Friciton Stir Welding</i>
FEM	=	<i>Finite Element Method</i>

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Luasnya penggunaan teknologi ini disebabkan karena bangunan dan mesin yang dibuat dengan teknik penyambungan menjadi ringan dan lebih sederhana dalam proses pembuatannya. Lingkup penggunaan teknik pengelasan dalam bidang konstruksi sangat luas, meliputi perkapalan, jembatan, rangka baja, pipa saluran dan lain sebagainya. Di samping itu proses las dapat juga dipergunakan untuk reparasi misalnya untuk mengisi lubang-lubang pada coran, membuat lapisan keras pada perkakas, mempertebal bagian-bagian yang sudah aus dan lain-lain. Pengelasan bukan tujuan utama dari konstruksi, tetapi merupakan sarana untuk mencapai pembuatan yang lebih baik. Karena itu rancangan las harus betul-betul memperhatikan kesesuaian antara sifat-sifat las yaitu kekuatan dari sambungan dan memperhatikan sambungan yang akan dilas, sehingga hasil dari pengelasan sesuai dengan yang diharapkan. Dalam memilih proses pengelasan harus dititik beratkan pada proses yang paling sesuai untuk tiap-tiap sambungan las yang ada pada konstruksi.

Friction Stir Welding (FSW) merupakan proses pengelasan baru yang dipromosikan dengan sedikit biaya dan kualitas sambungan yang baik. Hal itu dikarenakan pengelasan tidak membutuhkan logam pengisi dan bisa menghilangkan sedikit cacat retak dan porositas. Prinsip FSW menggunakan *tools* yang berotasi dan bergerak melintas sehingga material terjadi penempaan pada pusat lasan menjadi lebur.

Kemungkinan terjadinya distribusi dan konsentrasi tegangan pada unit *tool friction stir welding* cukup besar. Keadaan ini terjadi dikarenakan pada saat proses pengadukan unit *tool friction stir welding* menerima gaya gesek dan tekan yang besar.

Beberapa contoh pengelasan jenis ini adalah pembuatan bodi mobil, sayap ataupun bodi pesawat terbang serta peralatan memasak. Penelitian *friction stir welding* masih dikembangkan, seperti variasi desain *tool*, perbaikan teknik pengelasan dan perbaikan material *tool* baru untuk dapat memperpanjang umur pakai *tool*. Pengelasan ini berhasil menekan biaya proses pengelasan menjadi lebih murah karena pengelasan hanya membutuhkan *input* energi yang rendah dan tidak menggunakan *filler metal*. Kualitas hasil pengelasan *friction stir welding* memiliki permukaan yang lebih halus dan rata dari hasil pengelasan tradisional lain, kuat dan tidak ada pori - pori yang timbul. Proses ini ramah terhadap lingkungan karena tidak ada uap atau percikan dan tidak ada silauan busur nyala pada *fusion*.

Jarot Wijayanto dan Aghda Anelis (2010), menganalisa sifat mekanik dari hasil pengelasan dengan metode *friction stir welding* pada aluminium 6110. Pada penelitian ini menggunakan putaran mesin 3600 rpm dengan variasi kecepatan pengelasan yaitu : 40 mm/menit, 64 mm/menit, 93 mm/menit, 200 mm/menit, dan 320 mm/menit. Hasil dari penelitian ini adalah kekuatan *yield* dan kekuatan tarik sangat berbeda dengan logam induk. Hal ini dikarenakan oleh pengaruh temperatur tinggi pada saat proses pengelasan. Daerah lasan (*stir zone*) mempunyai nilai kekerasan yang sangat berbeda dibandingkan dengan logam induk. *Stir zone* mempunyai kekerasan sekitar 37,5 VHN, hal ini dikarenakan pengaruh temperatur tinggi pada saat proses pengelasan. Penelitian ini membahas pengaruh penggunaan pin *tool* terhadap kekuatan tarik, nilai kekerasan dan struktur makro pada plat aluminium 5083 (Wijayanto&Anelis, 2010).

P. Biswas dan N. R. Mandal (2011), meneliti secara tiga dimensi dengan metode elemen hingga dan secara eksperimental. Analisa dilakukan dengan parameter *tool* dan proses yang berbeda. Sumber panas diasumsikan murni akibat gesekan antara *tool* dan permukaan benda kerja. Pada FSW ini *tool* yang digunakan terbuat dari SS 310 dan material yang akan dilas adalah AA 1100. *Tool* dengan geometri *shoulder* cekung dan pin

berbentuk kerucut menghasilkan lasan yang lebih baik untuk AA 1100.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan utama yang penting dikaji dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana cara untuk mengetahui distribusi temperatur pada saat melakukan proses *friction stir welding*
2. Bagaimana cara untuk mengetahui kecepatan pengelasan pada saat proses *friction stir welding*
3. Bagaimana mengetahui *total heat flux* pada material aluminium saat proses pengelasan *friction stir welding*

1.3 Batasan Masalah

Untuk mencapai tujuan dan agar dalam penulisan skripsi ini lebih terarah, maka diperlukan adanya batasan masalah sebagai berikut:

1. Jenis Pengelesan yang digunakan adalah *Friction Stir Welding* (FSW)
2. Objek penelitian adalah *finite element*.
3. Analisis dan simulasi menggunakan program *software ANSYS*.
4. Kedua permukaan material diasumsikan rata pada saat prose pengelasan.
5. Proses pengelasan dilakukan pada temperatur kamar 27°C (300 K)
6. Kontak kedua benda kerja pada saat proses pengelasan dianggap simetri
7. Kondisi peralatan yang digunakan saat pengelasan diasumsikan terkalibrasi
8. Tidak membahas mengenai konstruksi mesin

1.4 Tujuan Penelitian

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

1. Mengetahui distribusi temperatur pada saat melakukan proses *friction stir welding*.
2. Mengetahui pengaruh *total heat flux* dari material aluminium pada proses pengelasan.
3. Mengetahui kecepatan pengelasan pada saat proses *stir welding*.

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.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dasar Teori

Proses *Friction Stir Welding* ditemukan oleh The Welding Institute (TWI) di tahun 1991 sebagai sebuah teknik penyambungan keadaan-padat. Secara prinsip, proses ini sangat sederhana yaitu tool yang tidak terumpan dengan pin dan bahu (*shoulder*) yang didesain khusus di masukkan dan diputar di sisi-sisi spesimen serta berjalan sepanjang spesimen untuk membentuk sambungan. Tool mempunyai dua macam fungsi yaitu fungsi pembangkitan energi dan pengaduk material lumer untuk membentuk sambungan. Parameter proses yang penting dalam proses FSW ini adalah kecepatan putar *tool* kecepatan transversal, kedalaman masuk *tool* serta kemiringan *tool* relatif terhadap garis vertikal.

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 hem 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

2.1.1 Jenis-Jenis Pengelasan

Sampai pada saat ini sudah terdapat banyak jenis-jenis pengelasan, dan di klasifikasikan dalam 2 golongan yaitu klasifikasi berdasarkan cara kerja dan klasifikasi berdasarkan energi yang digunakan. Berdasarkan klasifikasi tersebut

pengelasan dapat dibagi dalam tiga kelas utama yaitu pengelasan cair, pengelasan tekan dan pematrian.

- a. Pengelasan cair adalah cara pengelasan dimana sambungan dipanaskan sampai mencair dengan sumber panas dari busur listrik atau semburan api gas yang terbakar
- b. Pengelasan tekan adalah cara pengelasan dimana sambungan dipanaskan dan kemudian ditekan hingga menjadi satu.
- c. Pematrian adalah cara pengelasan dimana sambungan diikat dan disatukan dengan menggunakan paduan logam yang mempunyai titik cair rendah. Dalam cara ini logam induk tidak turut mencair.

Perincian lebih lanjut dari klasifikasi ini dapat dilihat pada tabel dibawah ini. Pada tabel tersebut menerangkan beberapa cara dan jenis jenis pengelasan yang banyak dilakukan.



Gambar 2.1 Klasifikasi Pengelasan

2.2 *Friction Stir Welding (FSW)*

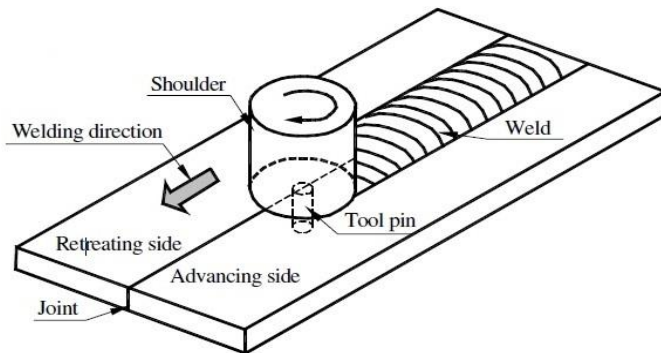
FSW (*friction stir welding*) adalah sebuah metode pengelasan yang termasuk pengelasan gesek, yang pada prosesnya tidak memerlukan bahan penambah atau pengisi. Panas yang digunakan untuk mencairkan logam kerja dihasilkan dari gesekan antara benda yang berputar (*pin*) dengan benda yang diam (*benda kerja*). *Pin* berputar dengan kecepatan konstan disentuhkan ke material kerja yang telah dicekam. Gesekan antara kedua benda tersebut menimbulkan panas sampai $\pm 80\%$ dari titik cair material kerja dan selanjutnya *pin* ditekankan dan ditarik searah daerah yang akan dilas. Putaran dari *pin* bisa searah jarum jam atau berlawanan dengan arah jarum jam. *Pin* yang digunakan pada pengelasan *friction stir welding* harus mempunyai titik cair dan kekerasan yang lebih dibandingkan dengan material kerja, sehingga hasil lasan bisa baik.

Pin yang digunakan pada pengelasan *friction stir welding* harus mempunyai titik cair dan kekerasan yang lebih dibandingkan dengan material kerja, sehingga hasil pengelasan baik. Pengelasan dengan menggunakan metode FSW bisa digunakan untuk menyambungkan material yang sama (*similar metal*) ataupun material yang tidak sama (*dissimilar metal*) seperti baja dengan baja tahan karat, alumunium dengan kuningan dan memungkinkan untuk mengelas kombinasi material lain yang tidak dapat di las dengan menggunakan metode pengelasan yang lain. Parameter pengelasan yang dilakukan harus disesuaikan sedemikian rupa, sehingga pengurangan volume dari *pin* ketika terjadi gesekan dengan material kerja bisa diperkecil. Hal ini bertujuan untuk menjaga masukan panas yang konstan sepanjang pengelasan.

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, alumunium dengan kuningan dan memungkinkan untuk mengelas kombinasi material lain yang

tidak dapat di las dengan menggunakan metode pengelasan yang lain.

Parameter pengelasan yang dilakukan harus disesuaikan sedemikian rupa, sehingga pengurangan volume dari pin ketika terjadi gesekan dengan material kerja bisa diperkecil. Hal ini bertujuan untuk menjaga masukan panas yang konstan sepanjang pengelasan. Prinsip Friction Stir Welding yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 dengan gesekan dua benda yang terus-menerus akan menghasilkan panas, ini menjadi suatu prinsip dasar terciptanya suatu proses pengelasan gesek. Pada proses friction stir welding, sebuah tool yang berputar di tekankan pada material yang akan disatukan. Gesekan tool yang berbentuk silindris (cylindrical-shoulder) yang dilengkapi pin/probe dengan material, mengakibatkan pemanasan setempat yang mampu melunakkan bagian tersebut. Tool bergerak pada kecepatan tetap (parameter1) dan bergerak melintang (parameter 2) pada jalur pengelasan (joint line) dari material yang akan disatukan.



Gambar 2.2. Pengelasan FSW

2.2.1 Keunggulan FSW

- Sifat mekanik yang baik(apabila daerah lasan yang dihasilkan dapat memberikan kualitas yang sempurna

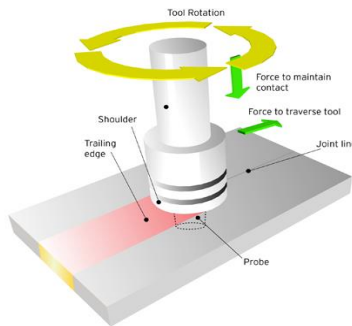
antara bagian yang disambung dengan setiap bagian sambungan, sehingga sambungan dan logam induknya tidak menunjukkan perbedaan yang jelas. Oleh karena itu ada kondisi-kondisi yang harus dipenuhi dalam proses pengelasan antara lain adanya pemilihan bahan, suplai energi, cara pengelasan, bebas dari kontaminasi seperti oksida dan kotoran, proteksi terhadap atmosfer yang baik dan metalurgi las yang terkontrol) seperti pada kondisi pengelasan

- Peningkatan keamanan karena tidak adanya asap beracun
- *No consumables* (perlengkapan las yang tidak bisa habis terpakai)
- Bisa beroperasi di semua posisi
- Dampak lingkungan rendah

2.2.2 Prinsip Kerja *Friciton Stir Welding*

Pada pengelasan FSW, tool probe berputar dan bergerak dengan kecepatan konstan sepanjang jalur sambungan antara dua material yang akan dilas. Benda kerja harus dicekam dengan kuat pada ragum atau *fixture* untuk mempertahankan posisinya akibat gaya yang terjadi pada proses pengelasan. Panjang dari probe harus lebih pendek dari tebal benda kerja dan shoulder dari tool harus bersentuhan dengan permukaan benda kerja.

Gesekan panas pada FSW dihasilkan oleh gesekan antara *probe* dan *shoulder* dari *welding tool* dengan material benda kerja. Panas lokal yang terjadi mengakibatkan adanya pelunakan logam induk bagian adukan *tool*. Kombinasi putaran dan translasi tool FSW memungkinkan material bergerak dari sisi depan pin hingga sisi belakang pin.



Gambar 2.3 Prinsip kerja *Friction Stir Welding*

Ketika *pin welding tool* bergerak sepanjang jalur pengelasan, permukaan depan pin akan memberikan gaya dorong plastis terhadap material. Material yang akan dilas harus dicekam dengan baik dan ditempatkan di backing plat sehingga beban yang diberikan pada tool dan diteruskan ke benda kerja tidak menyebabkan bagian bawah plat yang dilas terdeformasi.

Panas yang terjadi membuat material yang ada di sekitar pin melunak dan akibat adanya gerak rotasi dan translasi dari tool material di depan pin bergerak ke belakang pin dan ini akan terjadi terus menerus selama gerak translasi berlangsung dan menghasilkan sambungan yang diinginkan.

2.2.3 Microstruktur *FSW*

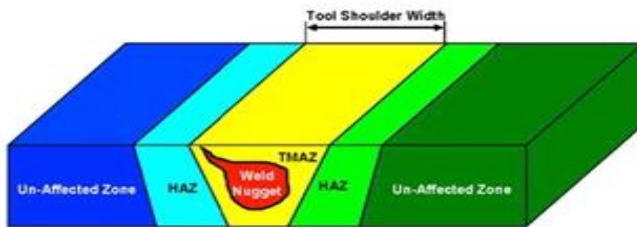
Heat Affected Zone (HAZ), merupakan daerah yang paling dekat dengan lokasi pengelasan, material pada area ini sudah mengalami siklus *thermal* yang menyebabkan perubahan struktur mikro dan sifat mekanik dari *basemetal*.

Thermo Mechanically Affected Zone (TMAZ), merupakan daerah yang terdeformasi plastis oleh *tool*, dan panas pada area ini dihasilkan pada proses pengelasan juga membawa pengaruh terhadap 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*) dan area TMAZ yang terdeformasi.

Flow Arm Zone adalah area yang terseret adukan oleh *shoulder* yang menjadi batas pengelasan dari *friction stir welding*.

Weld Nugget/Weld Metal adalah area yang secara utuh mengalami rekristalisasi atau terkadang area ini disebut juga dengan *stir zone*. Area ini merupakan area yang menghasilkan sambungan akibat gerakan *tools*.

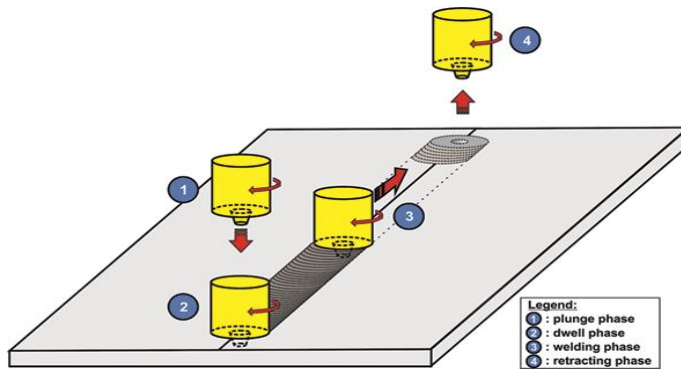


Gambar 2.4 Microstruktur material pengelasan

2.2.4 Siklus Proses Friction Stir Welding

Untuk menggabungkan dua piring dengan menggunakan proses FSW, urutan gerakan yang ditentukan dilakukan. Urutan ini biasanya dibagi menjadi empat fase yang berbeda. Setiap fase memainkan peran spesifik dalam proses pengelasan. Fase ini diilustrasikan pada Gambar 2.5 dan diidentifikasi sebagai berikut:

1. *Plunge phase,*
2. *Dwell or stabilization phase,*
3. *Welding or advancing phase,*
4. *Tool removal or retraction phase*



Gambar 2.5 Siklus proses FSW

Selama *plunge phase*, bahannya relatif dingin; hanya pin yang kontak dengan benda kerja. Gaya aksial (juga disebut gaya tempa) dan torsi yang diterapkan pada alat itu tinggi, dan dalam kebanyakan kasus, mencapai nilai tertinggi mereka. Pada akhir *plunge phase*, pin telah sepenuhnya menembus (*penetrated*) benda kerja dan *shoulder* bersentuhan dengan permukaan. Kecepatan putaran alat dan fase awal seringkali sama.

Dwell phase dimulai saat kedalaman terjun yang diinginkan telah tercapai. Gaya aksial Gambar 2.5 dipertahankan pada alat selama *stabilization phase* ini. Efek gabungan dari kecepatan relatif antara *probe* berputar dan material dengan gaya aksial yang diterapkan menghasilkan panas karena gesekan pada antarmuka *tool* material. Alat ini disimpan dengan waktu yang cukup lama untuk mencapai suhu yang dibutuhkan pengelasan.

Setelah *dwell phase*, alat ini mulai bergerak maju dan mempercepat kecepatan translasi yang ditentukan sepanjang jalur pengelasan. 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.

Proses FSW memiliki keterbatasan tertentu. Untuk membawa bahan ke dalam keadaan plastic (*plastic state*), torsi dan kekuatan yang dibutuhkan bisa sangat tinggi. Untuk alasan ini, mesin las harus kuat, biasanya mengarah ke peralatan yang relatif mahal. Agar memiliki lasan berkualitas tinggi, penting juga untuk memastikan penjepitan dan penyangga yang tepat. Keterbatasan lebih lanjut dari proses FSW sebagian besar terkait dengan faktor geometris. Selama pengelasan, alat bahu (*shoulder*) harus memiliki tekanan konstan dan seragam pada material.

2.3 *Finite Element Method (FEM)*

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 *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, pendekatan matematis tidak terlalu ditekankan.

2.4 Heat Flux

Dalam proses FSW, panasnya fluks dalam benda kerja harus dijaga suhu maksimumnya, sehingga bahannya cukup lembut agar pin bisa diaduk, sehingga bahannya tidak meleleh. Tingkat suhu maksimum yang dibuat oleh proses FSW berkisar antara 80% sampai 90% dari suhu leleh bahan pengelasan, sehingga cacat pengelasan yang umumnya terkait dengan pengelasan diminimalkan atau dihindari.

Heat Flux dalam proses FSW dihasilkan dari gesekan dan proses deformasi. Panas ini dilakukan dari alat dan benda kerja. Jumlah konduksi ke benda kerja menentukan proses FSW yang berhasil, kualitas pengelasan, bentuk las dan struktur mikro las. Jumlah panas yang masuk ke alat menentukan umur pemakaian dan kemampuan alat untuk proses pengelasan. Misalnya, panas yang tidak cukup dari gesekan bisa menyebabkan kerusakan dari probe karena bahannya tidak cukup lunak.

2.5 Analisa menggunakan Ansys

Secara garis besar tahapan analisa perancangan yang ditujukan untuk menyelesaikan perancangan *tool friction stir welding* adalah menganalisa distribusi temperatur dan distribusi kecepatan yang terjadi pada *tool friction stir welding* saat terjadi kontak element pada plat aluminium dengan *tool probe*.

2.5.1 Tahapan proses menggunakan software ANSYS

Untuk melakukan simulasi *friction stir welding* menggunakan software *Ansys*, maka dibutuhkan tahapan proses sebagai berikut:

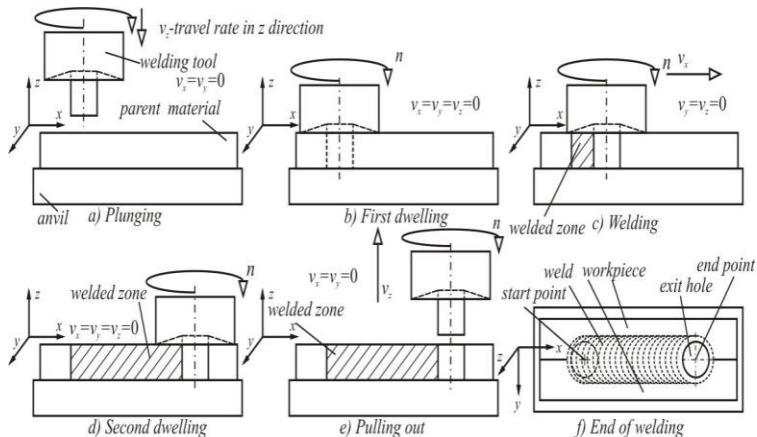
1. Mulai ANSYS, Start> All Programs> ANSYS 16.2
2. Apabila telah muncul jendela ANSYS, Anda coba scroll down pada Toolbox dan klik Component Systems. Pilih Geometry

3. Klik Geometry. Setelah muncul jendela Design Modeler, pilih satuan milimeter. Klik OK.
4. Aktifkan XYPlane, dan klik *Look at Face*.
5. Tukar ke mode Sketching dan pilih Rectangle. Kemudian, buat ukuran sembarang.
6. Lalu diberi dimensi pada rectangle yang baru dibuat. Beralih dari tab Draw ke tab Dimensions. (untuk memudahkan menggerakkan layar *workbench*, maka dapat menekan sambil ditahan ctrl+scroll tengah mouse, lalu pada tab Dimension, klik Displays. Dapat diberikan tanda cek pada *Value* agar nilai ditampilkan pada pemberian dimensi.)
7. Pemodelan sudah selesai. Sekarang beralih ke mode Modeling.
8. Pilih menu Concept pada toolbar dan pilih *Surface from Sketch*. Pilihlah sketch yang telah dibuat tadi, klik Apply
9. Lalu klik Generate
10. Tahap pertama sudah selesai. Tutup window *Geometry Modeler*. Karena analisis pada 2D, maka pada blok Geometry pada Geometry Modeler harus disetting. Caranya, Klik kanan Geometry dan pilih properties.
11. Klik dan *drag mesh* pada *component system*. Untuk membuat link, caranya klik dan tahan Geometry pada *Design Modeler* dan arahkan ke Geometry pada Mesh. Apabila sukses lanjut ke tahapan berikut.
12. Klik ganda Mesh, akan muncul window baru Mesh. Pilih cancel pada menu yang ada di sebelah kanan karena kita akan melakukan setting secara manual. Cara yang digunakan *Mapping Mesh*.
13. Klik kanan Mesh pada root Outline dan pilih *Insert > Sizing*.
14. Setelah itu, aktifkan Edge Selection dan pilih 2 vertikal edge dan klik Apply.
15. Selanjutnya atur parameter untuk *Sizing*

16. Selanjutnya, kita pilih 2 horizontal edge dengan menggunakan cara yang sama. Apabila Anda selesai melakukannya, atur kembali parameter Sizing yang kedua
17. Klik Mesh, klik kanan pilih insert dan klik Mapped Face Meshing. Klik kanan objek/model dan pilih Select All. Apabila tidak terjadi masalah selama proses, klik kanan Mesh dan pilih *generate mesh*
18. Terakhir sebelum Anda mengimport hasil Mesh ke *transient thermal*, kita terlebih dahulu harus memberi nama pada masing-masing edge

2.6 Kecepatan pengelasan

Ada dua kecepatan alat yang harus diperhitungkan dalam pengelasan ini yaitu seberapa cepat *tool* itu berputar dan seberapa cepat *tool* itu melintasi jalur pengelasan (*joint line*). Gerakan *tool* ditunjukkan pada Gambar 2.6



Gambar 2.6 Gerakan Tool *Friction Stir Welding*

Kedua parameter ini harus ditentukan secara cermat untuk memastikan proses pengelasan yang efisien dan hasil yang

memuaskan. Hubungan antara kecepatan pengelasan dan *input* panas selama proses pengelasan sangat kompleks, tetapi umumnya dapat dikatakan bahwa meningkatnya kecepatan rotasi dan berkurangnya kecepatan melintas akan mengakibatkan titik las lebih panas. Jika material tidak cukup panas maka arus pelunakan tidak akan optimal sehingga dimungkinkan 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.

Pengelasan gesek dilakukan dengan kombinasi dari sliding dan sticking dan perlu menentukan (δ) variabel status kontak element antara probe dengan plat aluminium. Pada persamaan 2.1 rasio kecepatan titik kontak pada bagian las segmen (V_{cp}) yang kontak dengan alat, dimana akan menghasilkan panas spesifik dan (V_{ω}) yang berasal dari kecepatan putaran alat (*probe*).

$$\delta = \frac{V_{cp}}{V_{\omega}} \quad (2.1)$$

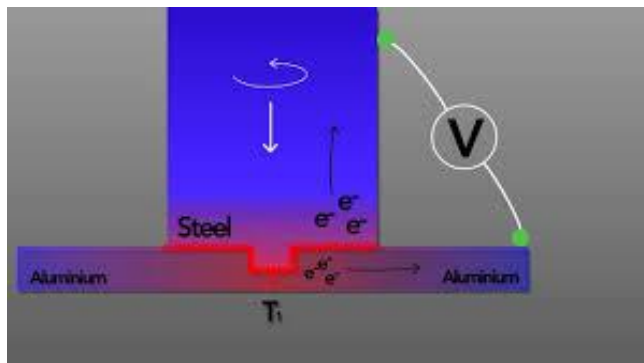
Pada persamaan 2.2 dapat dilihat, V adalah kecepatan rotasi dari pin, dalam persamaan kecepatan, R adalah jarak yang dihitung titik dari sumbu alat dan N adalah kecepatan pengelasan alat. Jelas bahwa kecepatan rotasi dan kecepatan pengelasan adalah yang utama faktor dalam menghasilkan panas dan juga masalah masukan panas. Hubungan antara kecepatan dan masukan panas sangat kompleks selama FSW. Masukan panas yang terlalu banyak atau terlalu rendah mempengaruhi kualitas pengelasan.

$$V = 2 \pi R N \quad (2.2)$$

2.7 Distribusi Temperatur

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, karakter batas butir, pada akhirnya akan mempengaruhi kekuatan hasil mekanik lasan.

Tidak mudah untuk memperoleh informasi tentang distribusi temperatur, terutama daerah pengadukan (*stirred zone*), proses FSW karena sangat intensnya deformasi plastis di daerah tersebut. Akibatnya distribusi temperatur pada daerah tersebut didapatkan dengan memperkirakan besarnya berdasarkan mikrostruktur yang terjadi atau melakukan pengukuran di dekat daerah tersebut dengan termokopel.



Gambar 2.7 Distribusi Temperatur pada Pengelasan FSW

Karena kecepatan pengelasan (v_w), kecepatan putaran alat (ω), dan gaya gesek (F) semua mempengaruhi energi total yang diberikan pada benda kerja, masukan panas total (T_{total}) lebih tepat mengindikasikan kondisi pengelasan daripada parameter pengelasan masing-masing. Energi per satuan panjang lasan diturunkan oleh Khandkar (Ref. 8) dari model berbasis torsi dimana torsi total, T_{total} , dinyatakan sebagai jumlah kontribusi

torsi dari alat bahu terhadap benda kerja, bagian bawah alat pin terhadap material ketebalan, dan permukaan pin terhadap material ketebalan.

$$T_{total} = 2\mu F \left(\frac{r_0}{3} + \frac{r_p^2}{r_0^2} hp \right) \quad (2.3)$$

Pada Persamaan 2.3, jari - jari belakang *shoulder* (r_0) diabaikan, sedangkan untuk jari jari pada permukaan pin (r_p) dan tinggi tool pin (hp) dapat dilihat pada tabel parameter (tabel 4.2). Selain itu (μ) sebagai koefisien gesekan.

2.8 Distribusi *Heat Flux*

Pemodelan panas pada persamaan 2.4, dalam pengelasan gesekan sangat penting untuk mengevaluasi suhu maksimum. Model ini dapat memprediksi evolusi suhu melalui keseluruhan proses dan keseluruhannya volume. Distribusi suhu dalam derajat celcius ($^{\circ}\text{C}$). Temperatur dari potongan kerja secara langsung mempengaruhi sifat mekanik, tegangan sisa dan struktur mikro. Panas yang dihasilkan antara *stir welding* dan permukaan adalah Q_1 yang dihitung:

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

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 masing-masing. 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 dengan 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 fluks panas di atas permukaan bahu diberikan pada persamaan 2.9, sebagai berikut:

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

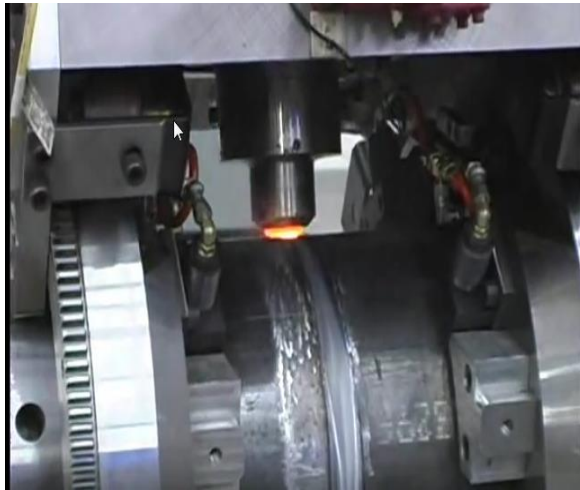
Dimana ($q_{shoulder}$) adalah panas yang dihasilkan pada tool pin dibagian *shoulder*, (r_0) adalah jari-jari belakang *shoulder*. Untuk nilai (Q_r) didapat dari panas permukaan probe, pada saat probe berputar dan kontak dengan plat aluminium. Namun sangat sulit untuk merumuskan distribusi fluks panas 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 diistribusi fluks 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 fluks panas dapat ditunjukkan pada gambar. 2.8



Gambar 2.8 Distribusi *Heat flux*

2.8 Penelitian Terdahulu

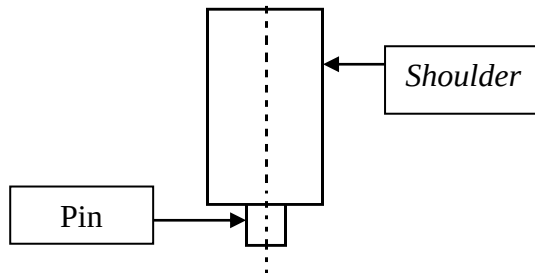
2.8.1 Tugas Akhir (Wijayanto&Anelis-2010)

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. Panas yang dihasilkan dari gesekan *tool* dan material yang akan dilas sekitar 70 – 80% 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* terdiri dari *shoulder* dan *pin*. *Pin* berfungsi untuk menghasilkan panas dan menggerakkan material yang sedang dilas. *Shoulder* memiliki beberapa fungsi antara lain:

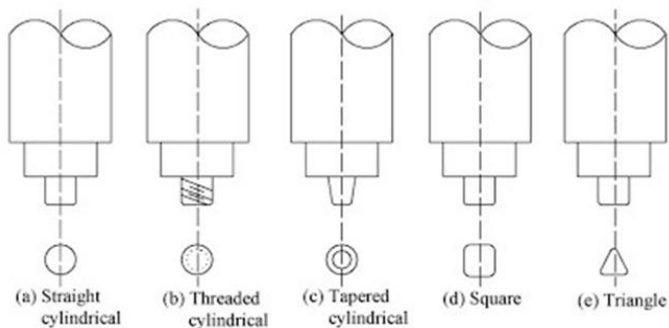
1. Sebagai pelindung dari kemungkinan masuknya suatu material berbeda.
2. *Shoulder* yang berdiameter lebih besar, berperan untuk mempertahankan dan menjaga agar material *plasticised* tidak keluar dari daerah las.
3. *Shoulder* memberi tekanan ke bawah yang memberi efek tempa pada lasan.
4. *Shoulder*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



Gambar 2.9. Rancangan *tool*

2.8.2 Desain *Pin Tools FSW*

Bentuk pin (probe) pada tool yang selama ini dikembangkan untuk aplikasi FSW ada beberapa tipe seperti pada gambar 2.10. Bentuk pin memengaruhi aliran bahan plastis dan memengaruhi sifat lasan. Sementara tool shoulder memfasilitasi aliran bahan bongkahan, pin membantu aliran bahan lapis demi lapis. Pin berbentuk ‘triflute’ meningkatkan aliran bahan di banding pin silindris. Gaya aksial pada bahan benda kerja dan aliran bahan dekat tool dipengaruhi oleh orientasi ulir pada permukaan pin. Penelitian lain menunjukkan bahwa lasan bebas cacat dapat diperoleh pada bahan lebih lunak seperti AA1050 dengan pin berbentuk columnar tanpa ulir. Sementara pin berbentuk prisma triangular lebih sesuai untuk bahan lebih keras.



Gambar 2.10 Desain *Pin tools*

2.8.3 Parameter Pengelasan

Untuk FSW, dua parameter sangat penting: laju perputaran alat (ω , rpm) searah jarum jam atau berlawanan arah jarum jam dan kecepatan travers tool (v , mm / min) sepanjang garis sambungan. Rotasi alat menghasilkan pengadukan dan pencampuran material di sekitar pin yang berputar dan terjemahan alat memindahkan bahan yang diaduk dari depan ke belakang pin

dan menyelesaikan proses pengelasan. Tingkat perputaran alat yang lebih tinggi menghasilkan suhu yang lebih tinggi karena pemanasan gesekan yang lebih tinggi dan menghasilkan pengadukan dan pencampuran material yang lebih intens seperti yang akan dibahas nanti. Namun, perlu dicatat bahwa kopling gesekan permukaan alat dengan benda kerja akan mengatur pemanasan. Jadi, peningkatan monoton dalam pemanasan dengan laju rotasi alat yang meningkat tidak diharapkan karena koefisien gesekan pada antarmuka akan berubah seiring dengan laju rotasi alat yang meningkat.

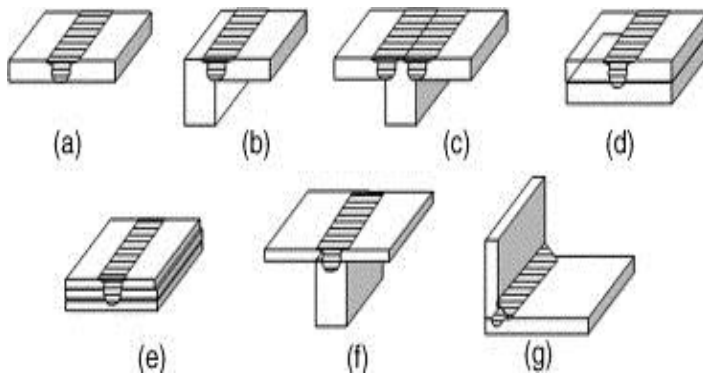
Selain kecepatan rotasi alat dan kecepatan traverse, parameter proses penting lainnya adalah sudut poros atau kemiringan alat berkenaan dengan permukaan benda kerja. Kemiringan spindle yang sesuai ke arah trailing memastikan bahwa pundak alat menahan bahan yang diaduk dengan pin berulir dan memindahkan material secara efisien dari bagian depan ke belakang pin. Selanjutnya, kedalaman penyisipan pin ke benda kerja (juga disebut kedalaman target) penting untuk menghasilkan lasan suara dengan bahu alat halus. Kedalaman penyisipan pin dihubungkan dengan tinggi pin. Bila kedalaman penyisipan terlalu dangkal, bahu alat tidak menyentuh permukaan benda kerja asli. Dengan demikian, bahu yang berputar tidak bisa menggerakkan bahan yang diaduk secara efisien dari depan ke belakang pin, sehingga menghasilkan lasan dengan saluran dalam atau alur permukaan. Bila kedalaman penyisipan terlalu dalam, pundak alat menjorok ke dalam benda kerja yang menciptakan kilatan berlebihan. Pemanasan awal atau pendinginan juga penting untuk beberapa proses FSW tertentu.

Untuk bahan dengan titik leleh tinggi seperti baja dan titanium atau konduktivitas tinggi seperti tembaga, panas yang dihasilkan oleh gesekan dan pengadukan mungkin tidak cukup untuk melembutkan dan melunakkan bahan di sekitar alat yang berputar. Dengan demikian, sulit untuk menghasilkan lasan tanpa cacat secara kontinyu. Dalam kasus ini, pemanasan awal atau tambahan sumber pemanas eksternal dapat membantu aliran

material dan meningkatkan jendela proses. Di sisi lain, bahan dengan titik lebur yang lebih rendah seperti aluminium dan magnesium, pendinginan dapat digunakan untuk mengurangi pertumbuhan biji-bijian dan pembubaran rekristalisasi pelepasan presipitat di dalam dan di sekitar zona yang diaduk.

2.8.4 Desain Joint

Desain *joint* yang paling nyaman untuk FSW adalah butt dan putaran sendi. Sambungan butt persegi sederhana ditunjukkan pada Gambar.2.11 a. Dua piring atau lembaran dengan ketebalan yang sama diletakkan di atas pelat belakang dan perawatan ekstra diperlukan untuk memastikan bahwa pelat dalam konfigurasi butt tidak terpisah. Alat berputar dilemparkan ke dalam garis sendi dan dilalui sepanjang garis ini saat bahu alat berada dalam kontak intim dengan permukaan pelat, menghasilkan lasan sepanjang jalur. Di sisi lain, untuk sambungan sederhana, dua pelat atau lembaran berlapis dijepit di atas pelat belakang. Alat yang berputar secara vertikal jatuh melalui pelat atas dan ke pelat bawah dan dilalui sepanjang arah yang diinginkan, bergabung dengan dua pelat (Gambar2.11.d). Banyak konfigurasi lain dapat diproduksi dengan kombinasi butt dan putaran sendi. Selain konfigurasi butt dan putaran joint, jenis desain sendi lainnya, seperti sambungan fillet (Gambar2.11.g), juga dimungkinkan sesuai kebutuhan beberapa aplikasi teknik. dan dijepit kuat untuk mencegah *joint* yang tertutup terpisah. Selama terjun awal alat ini, kekuatannya cukup besar

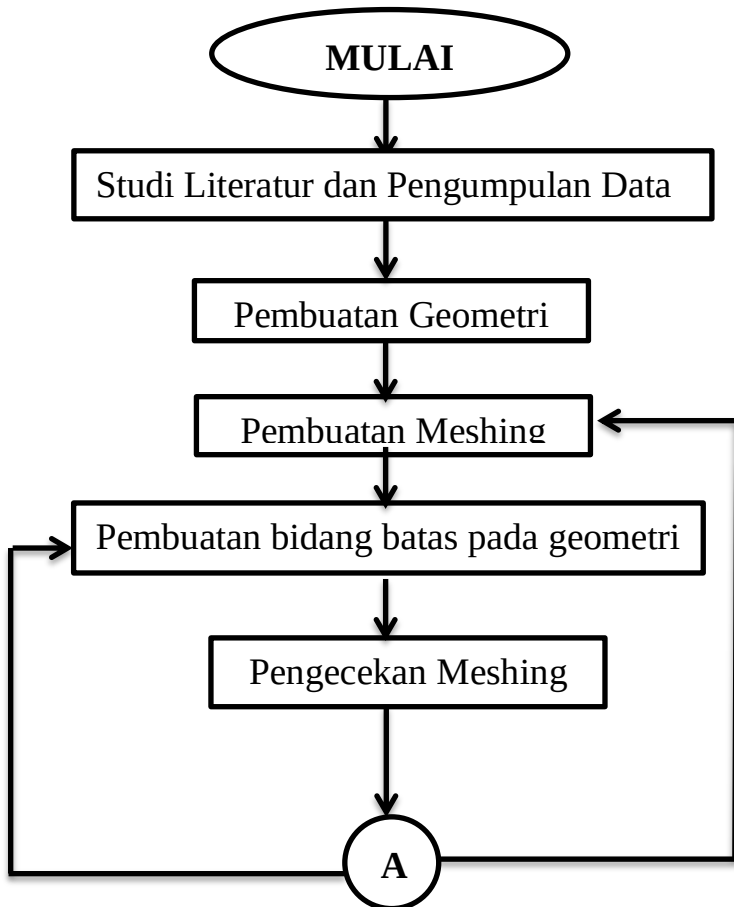


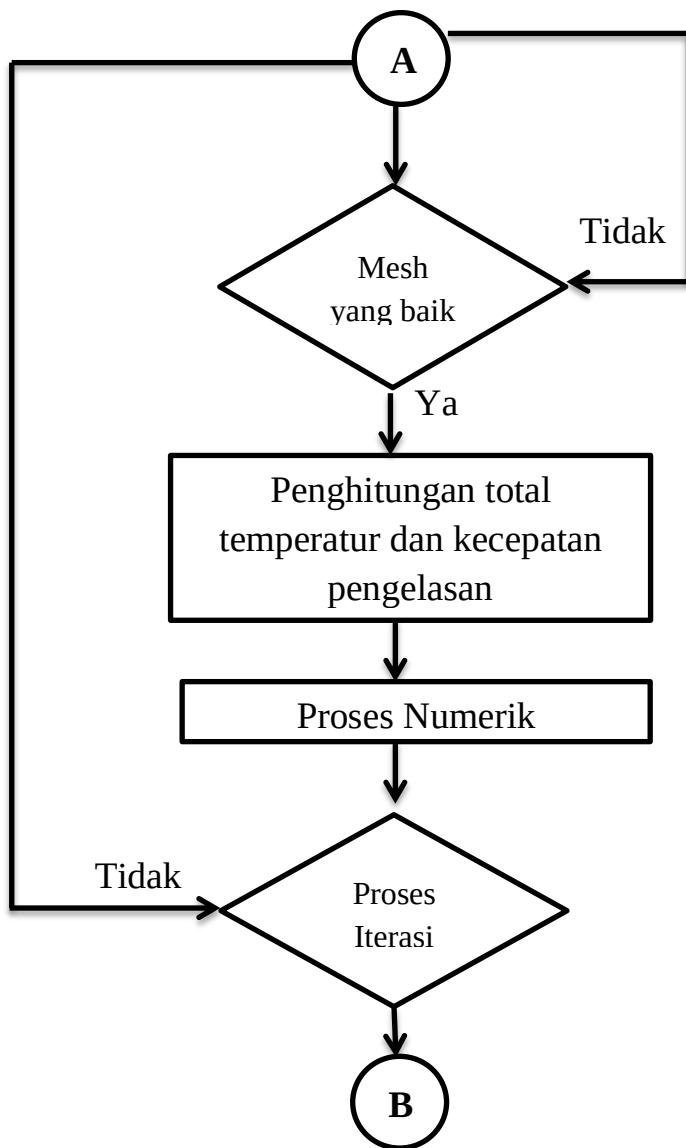
Gambar 2.11 *Joint* untuk pengelasan gesekan gesekan: (a) *Joint* persegi, (b) ujung *Joint*, (c) *Joint* t, (d) *Joint* pangkuan, (e) kemiringan putaran ganda, (f) *Joint* lap, dan (g) *Joint* fillet

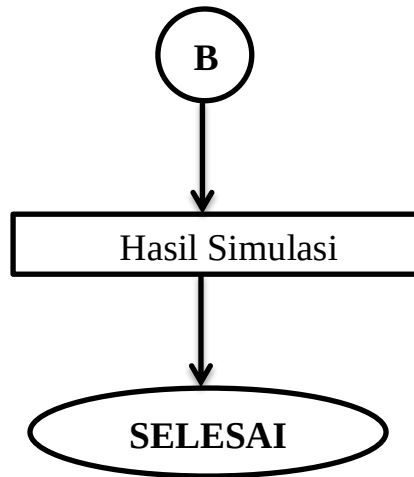
[Halaman Sengaja Dikosongkan]

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Flowchart simulasi FSW







Gambar 3.1 Flowchart FSW

3.2 Prosedur simulasi FSW

Dalam melakukan pemodelan finite element mengenai distribusi kecepatan dan temperatur dalam proses friction stir welding, terdapat beberapa tahapan yang dilakukan, di antaranya :

1. Studi Literatur dan Pengumpulan Data

Untuk memperdalam pemahaman mengenai permasalahan yang dibahas, dilakukan studi literatur yang berkaitan dengan FSW Studi literatur diperoleh dari *e-book*, jurnal, dan penelitian terdahulu yang berkaitan dengan topik permasalahan. Sebelum melakukan simulasi, diperlukan adanya data acuan pemodelan dan simulasi dari sistem yang akan ditinjau sehingga dilakukan pengumpulan data.

2. Pembuatan Geometri

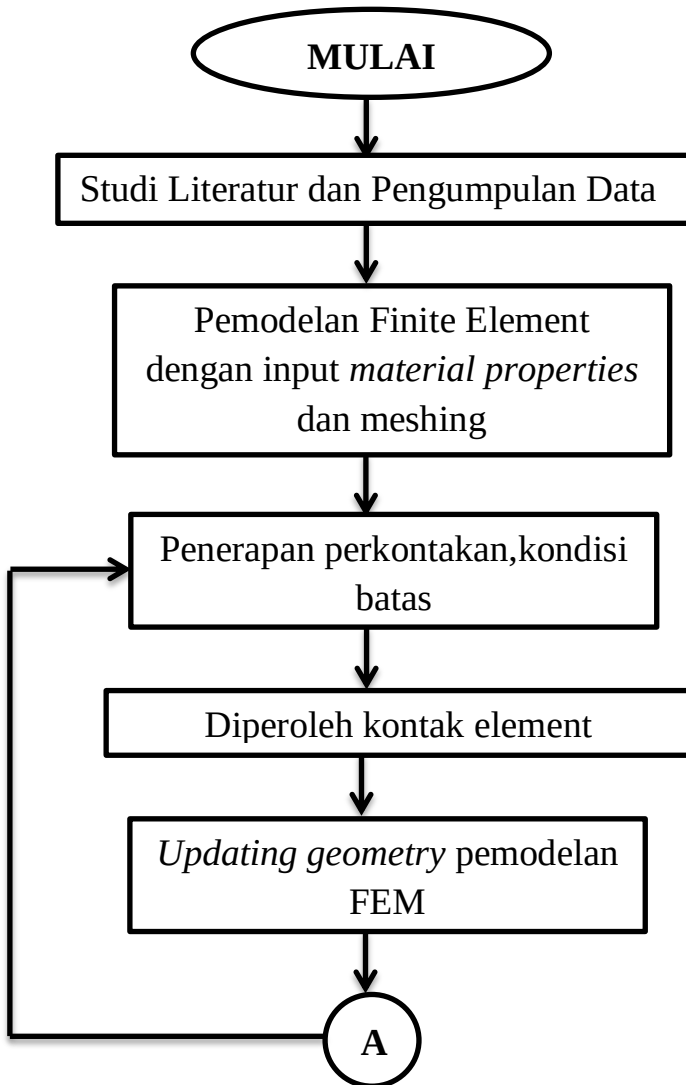
Tahapan ini diawali dengan *pre-processing* yaitu pembuatan geometri *finite element* Selanjutnya, dilakukan *processing* berupa proses simulasi dari sistem yang telah dibuat. Dan pada akhir simulasi, dilakukan *post processing* dengan menampilkan hasil simulasi berupa distribusi kecepatan dan temperatur sepanjang material. Untuk processing dan post processing menggunakan *software* ANSYS.

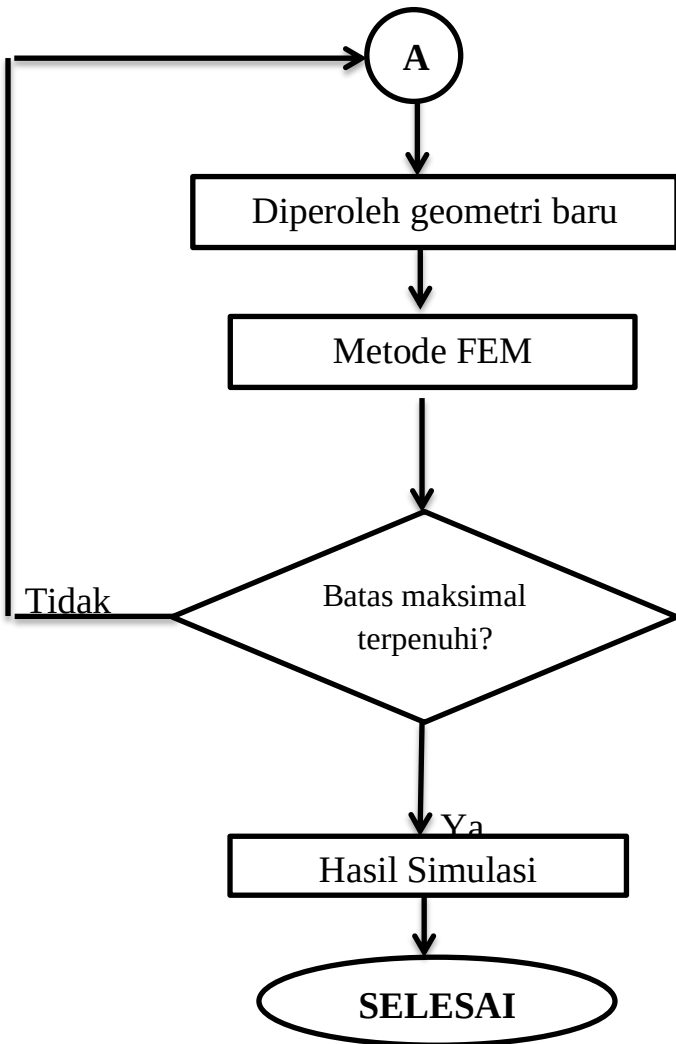
3. Pembuatan Mesh

Setelah membuat geometri, selanjutnya perlu dilakukan proses meshing (membagi volume menjadi bagian-bagian kecil) supaya dapat dianalisis pada ANSYS. Ukuran mesh yang terdapat pada suatu objek akan mempengaruhi ketelitian dan daya komputasi analisis.

4. Pembuatan bidang batas geometri
Pembuatan bidang batas pada geometri agar simulasi pengelasan *friction stir welding* yang digunakan bergerak sesuai yang diinginkan
5. Pengecekan Mesh
Melakukan evaluasi terhadap kemungkinan terjadinya *error* pada waktu dilakukan *meshing*.
6. Penghitungan Total Temperatur dan Kecepatan Pengelasan
Penghitungan total temperatur dan kecepatan pada saat pengelasan dengan menggunakan *software excel*
7. Proses Numerik
Proses numerik yang digunakan untuk memformulasikan masalah numerik pada *software ASNYS*
8. Proses Iterasi
Pada proses ini akan dilakukan iterasi hingga terjadi konvergensi. *Time step size* adalah waktu yang didapatkan untuk setiap proses kalkulasi yang dilakukan. *Number of time steps* adalah jumlah total *time step* yang ingin dilakukan proses kalkulasi
9. Hasil Simulasi
Hasil simulasi dilakukan untuk mengetahui hasil dari analisa yang telah dijalankan.

3.3 Flowchart simulasi *Finite Element*





Gambar 3.2 Flowchart *Finite Element*

3.4 Prosedur simulasi *Finite Element*

Tahap-tahap yang dilaksanakan pada saat simulasi proses *Finite Element* menggunakan *software ANSYS mechanical APDL* adalah sebagai berikut.

1. Studi Literatur dan Pengumpulan Data
Untuk memperdalam pemahaman mengenai permasalahan yang dibahas, dilakukan studi literatur yang berkaitan dengan *finite element* untuk FSW Studi literatur diperoleh dari *e-book* dan jurnal, Sebelum melakukan simulasi, diperlukan adanya data acuan pemodelan.
2. Pemodelan *Finite Element*
Pemodelan *Finite Element* dilakukan dengan pembuatan geometri model yang telah disederhanakan
3. Penerapan perkontakan,kondisi batas
Pemberian kondisi batas ini agar bergerak ke arah sumbu tertentu ataupun dikehendaki agar tidak bergerak ke arah manapun.
4. Kontak element
Kontak element diperoleh dari hasil kontak antara *probe* dengan material aluminium menggunakan simulasi ansys
5. *Updating Geometry*
Updating geometry pemodelan *Finite Element* dengan pembebanan berupa *displacement*.
6. Geometri baru
Model geometri baru ini berbeda dengan geometri pertama,jika geometri pertama dibuat menghasilkan kontak rata-rata,simulasi kedua ini dengan menekankan model *displacement* yang diperoleh dari simulasi pertama

7. Metode *Finite Element*

Metode *Finite Element* berupa pendekatan, metode ini dikenal cukup ampuh memecahkan struktur-struktur yang kompleks dalam analisis mekanika benda padat (*solid mechanics*) dan perpindahan panas (*heat transfer*)

8. Batas Maksimal

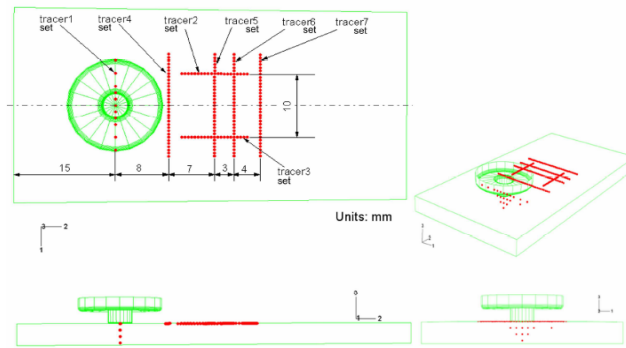
Batas maksimal jika belum terpenuhi maka dilakukan secara berulang hingga mendapat batas maksimal yang diinginkan

9. Hasil Simulasi

Hasil simulasi dilakukan untuk mengetahui hasil dari analisa yang telah dijalankan.

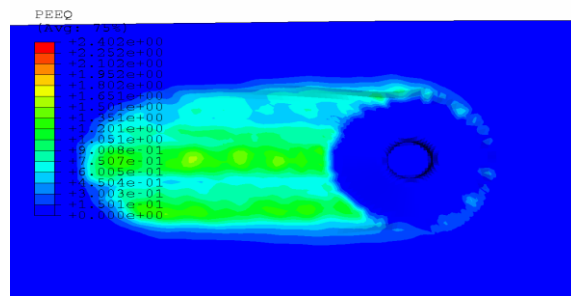
3.5 Verifikasi dengan *Handbook website*

Aliran material selama FSW rumit dan secara langsung mempengaruhi sifat-sifat FSW las. Sangat penting untuk memahami proses deformasi dan fisika dasar Aliran material untuk perancangan alat yang optimal. Untuk memvisualisasikan fenomena aliran material, partikel pelacak Set didefinisikan secara simetris, masing-masing sisi, sepanjang garis pengelasan untuk melacak materi Gerakan di lokasi tertentu Tujuh set partikel pelacak diberi nomor 1 sampai 7, digunakan dan Disorot oleh titik merah pada gambar 3.3. Setiap pelacak mencakup beberapa partikel dalam satu garis atau / dan di pesawat dan posisi awal. Perpindahan beberapa partikel representatif pada set "tracer1" diplot dalam Angka 13 dan 14. Set partikel pelacak ini hanya didefinisikan dalam 15 detik pertama untuk mengurangi ukuran File hasil. Partikel yang dipilih diberi nomor pada Gambar 3.3. Gerakan ke bawah Dari alat itu perpindahan dikontrol pada kecepatan konstan. Hal ini tercermin dari alur cerita besarnya perpindahan partikel pelacak 30 yang berada tepat di bawah pusat alat ini. Garis lurus linier partikel 28 di tepi pin disingkirkan saat kemudian pin dimulai karena itu terjunlah, dimana memiliki



Gambar 3.3 Lokasi partikel yang telah ditentukan.

perpindahan kecil sampai diaduk oleh bahu. Partikel 29 yang juga di bawah permukaan pin bawah tapi dengan jarak setengah pin radius alat dari pin center mengalami perpindahan terbesar (di antara semua partikel pelacak yang didefinisikan dalam model saat ini) sampai Sekitar 7,5 detik, menunjukkan area material ini mengalami sebagian besar kegemparan di awal terjun.



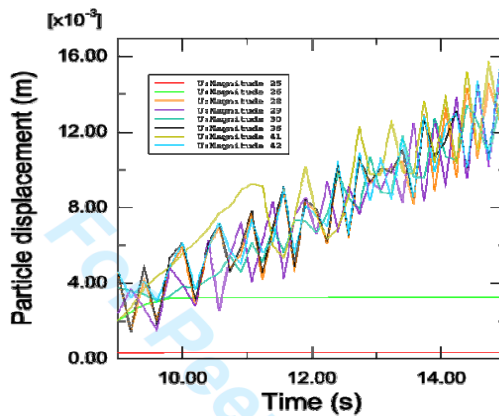
Gambar 3.4 Hasil simulasi menggunakan ABAQUS

Hal ini bisa dijelaskan sebagai hasil deformasi benda kerja global. Benda kerja itu tetap dengan membatasi ujung tepi bawahnya, jadi saat pin alat disisipkan ke benda kerja yang ada

pada gambar 3.4 Bahan di bawah pin alat ditekan ke bawah dan benda kerja di luar radius pin menjadi besar ke atas Partikel 25, yang semula di bawah tepi alat bahu, bergerak keluar Jari-jari bahu saat penetrasi alat. Sejak saat itu, pin tidak memiliki kontak dengan alat ini, demikian Perpindahan seluruh proses sangat kecil dan murni karena benda kerja global Deformasi, seperti yang digambarkan oleh kurva merah pada gambar 3.5 dan 3.6. Tidak ada kontak dengan alat untuk partikel 28, 36 dan 42 sebelum 7.8, tapi begitu disentuh dan diaduk oleh alatnya Perpindahan tiba-tiba meningkat. Titik waktu kunci dapat diidentifikasi pada sekitar 8.4 detik, setelah itu semua Partikel yang bersentuhan dengan alat ini mengalami dorongan yang signifikan dalam perpindahan dalam jarak yang sangat periode singkat. Pada saat ini, bisa dikatakan dikatakan bahwa material tersebut dalam keadaan flow dan siap untuk pengelasan.

3.5.1 Kekuatan dan Momen Reaksi Alat

Menghitung gaya reaksi alat dan momen merupakan ciri khas lain dari model saat ini. Sebagian besar model FE 3D dalam literatur hanya bisa menghitung gaya dalam tahap pengelasan yang telah ditetapkan, seperti yang ada pada karya eksperimental Itu Tekanan yang cukup besar yang dialami pin dapat menyebabkan kegagalan jika kekuatan mekanik tidak cukup. Untuk mencegah kerusakan alat dan memperbaiki umur mesin, perlu diketahui, Cukup akurat, kekuatan reaksi alat dan torsi selama keseluruhan proses. Variasi gaya aksi aksial (Z), RFZ, untuk keseluruhan proses diilustrasikan pada gambar 3.5. Tahap penurunan, pada kecepatan konstan, terjadi selama 8,3 detik pertama. Nilai dari Kekuatan reaksi dalam arah melintang (X) dan longitudinal (Y) sangat kecil dibandingkan Dengan gaya reaksi aksial (Z) dan karenanya tidak diperlihatkan untuk singkatnya.



Gambar 3.6 *Displacement magnitudes* partikel pada "tracer1"

puncaknya yang jauh lebih tinggi dari maksimum sebelumnya sebelum 6.8 detik. Setelah 8.4 detik di tahap *dwel* and *tranverse* kurva secara bertahap menurun dengan fluktuasi.

[Halaman Sengaja Dikosongkan]

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa model simulasi

Banyak komponen penting yang terlibat dalam pengelasan gesekan gesekan (FSW) dan alat yang jelas sangat penting mereka menuju kesuksesan proses. Alat ini biasanya terdiri dari bahu bundar yang berputar dan sebuah pin yang memanaskan bagian pekerjaan sebagian besar oleh gesekan dan menggerakkan paduan melunak di sekitarnya untuk membentuk sendi. Tidak ada pelelehan massal dari pekerjaan, seperti masalah umum pengelasan fusi seperti pemadatan dan retak liquation, porositas dan hilangnya elemen paduan yang mudah menguap dihindari pada FSW Namun, FSW mengalami tekanan berat dan suhu tinggi terutama untuk pengelasan paduan keras baja, baja tahan karat dan paduan titanium.

Simulasi ini dipelajari secara numerik untuk mengetahui alat fsw dan parameter operasi yang berbeda dengan menggunakan material *Alluminium Alloy*.

Tabel 4.1 Tabel Model Simulasi

Parameter	Efek
Kecepatan Putaran	Gesekan Panas “mengaduk” lapisan oksida pada material
Sudut Miring	Munculnya las, yang mengakibatkan material menipis
Kecepatan Pengelasan	Mengontrol Panas
Down Force	Gesekan panas

4.2 Analisa parameter

Pada simulasi ini dilakukan pemodelan sederhana untuk melihat seberapa dalam dan lebar pengaruh masukan panas pada sebuah material solid berbentuk plat tipis yang didefinisikan memiliki sifat seperti aluminium Al 6061.

Pendiskritan dilakukan untuk geometri plat berukuran 20 mm x 40 mm x 5 mm dengan ukuran mesh 2,5 mm x 2,5mm x 2,5 mm sehingga menjadi seperti dalam gambar 4.1 berikut ini.

Proses *friction stir welding* didominasi oleh efek yang terkait dengan aliran material dan deformasi mekanis yang besar, yang dipengaruhi oleh parameter proses seperti:

Tabel 4.2 Tabel Parameter Model Simulasi Pengelasan FSW

Nama	Nilai	Unit	Deskripsi
T0	300	[°C]	Suhu Awal
t0	0,1	[S]	Waktu Awal
h_upside	12,25	[W/(m ² *K)]	Koefisien perpindahan panas (Upside)
h_downside	6,25	[W/(m ² *K)]	Koefisien perpindahan panas (Downside)
μ	0,18	[I]	Koefisien gesek
F	171,5	[kN]	Gaya normal
rs	7	[mm]	Jari-jari shoulder
rp	2	[mm]	Jari-jari pin
Cp	500	[J/Kg°C]	Panas Spesifik
R	4,61	mm	Jarak titik dari sumbu probe

4.3 Analisa Distribusi Temperatur

4.3.1 Analisa Temperatur 300

Pengaruh heat flow 300 W dan material properties yang diberikan sebagai bahan analisa distribusi temperatur menghasilkan output temperatur yang terus meningkat pada daerah yang dikenai panas hingga mencapai temperatur puncak. Pada *load step* (tiap langkah) pengelasan terjadi pemanasan pada tiap elemen sesuai dengan letak probe pada langkah tersebut.

Tabel 4.3 Tabel Analisa Temperatur dengan Temperatur 300

Waktu	Temperatur	Q1	Q2	Ttotal
0,1	300	1218,5	1216,8	1247,346
0,2	300	1219,5	1216,7	1248,37
0,41706	300	1221	1216,6	1249,905
0,8601	300	1222,7	1216,6	1251,646
1,8373	300	1225,1	1217	1254,102
4,4493	300	1229	1217	1258,095
9,2699	300	1233,5	1217	1262,701
13,576	300	1238,7	1217	1268,024
20,343	300	1240	1217	1269,355
41,014	300	1247,4	1217	1276,93
70,507	300	1254,6	1217	1284,301
100	300	1260,2	1217,1	1290,033

Panas tersebut secara stimultan kemudian ditransfer melalui proses konduksi pada elemen - elemen yang berada di sekitar daerah lasan dan konveksi pada seluruh elemen benda kerja yang mengalami kontak langsung dengan udara sekitar. Pada waktu 100 diketahui panas Q1 adalah 1260 J, dimana Q1 adalah panas yang dihasilkan antara stir welding dan permukaan plat aluminium, untuk panas pada permukaan probe (Q2) di dapatkan 1217 J.

Dengan memperhatikan tabel di atas, panas nilai *heat flow* sebesar 300 W, maka besarnya Ttotal yang terjadi selama pengelasan dapat menggunakan persamaan 2.3 dan dihasilkan 1290 °C.

4.3.2 Analisa temperatur 400

Pengamatan terhadap pengaruh heat flow 400 W dan material properties yang diberikan sebagai bahan analisa distribusi temperatur menghasilkan output temperatur yang terus meningkat pada daerah yang dikenai panas hingga mencapai

Tabel 4.4 Tabel Analisa Temperatur dengan Temperatur 400

Waktu	Temperatur	Q1	Q2	Ttotal
0,1	400	1219	1216,7	1247,858
0,2	400	1220,4	1216,6	1249,291
0,41706	400	1222,3	1216,4	1251,236
0,86009	400	1224,7	1216,4	1253,693
1,8373	400	1227,8	1217	1256,866
4,4493	400	1232,9	1217	1262,087
10,631	400	1240,3	1217	1269,662
19,901	400	1247,6	1217	1277,135
24,563	400	1253,2	1217	1282,868
43,012	400	1258,2	1217	1287,986
83,593	400	1270,3	1217,1	1300,372
100	400	1274,5	1217,1	1304,672

temperatur puncak. Pada *load step* (tiap langkah) pengelasan terjadi pemanasan pada tiap elemen sesuai dengan letak probe pada langkah tersebut.

Panas tersebut secara stimultan kemudian ditransfer melalui proses konduksi pada elemen - elemen yang berada di sekitar daerah lasan dan konveksi pada seluruh elemen benda kerja yang mengalami kontak langsung dengan udara sekitar. Pada waktu 100 diketahui panas Q1 adalah 1274 J, dimana Q1 adalah panas yang dihasilkan antara stir welding dan permukaan plat aluminium, untuk panas pada permukaan probe (Q2) di dapatkan 1217 J.

Dengan memperhatikan tabel di atas, panas nilai *heat flow* sebesar 400 W, maka besarnya Ttotal yang terjadi selama pengelasan dapat menggunakan persamaan 2.3 dan dihasilkan 1304,7 °C .

4.3.3 Analisa Temperatur 500

Untuk pengamatan selanjutnya, pada pengelasan *friction stir welding* dengan *heat flow* sebesar 500 W dan material

properties yang diberikan sebagai bahan analisa distribusi temperatur menghasilkan output temperatur yang terus meningkat pada daerah yang dikenai panas hingga mencapai temperatur puncak. Pada *load step* (tiap langkah) pengelasan terjadi pemanasan pada tiap elemen sesuai dengan letak probe pada langkah tersebut.

Tabel 4.5 Tabel Analisa Temperatur dengan Temperatur 500

Waktu	Temperatur	Q1	Q2	Ttotal
0,1	500	1219,5	1216,6	1248,37
0,2	500	1221,2	1216,4	1250,11
0,41706	500	1223,6	1216,3	1252,567
0,86009	500	1226,6	1216,3	1255,638
1,8373	500	1230,4	1216,9	1259,528
3,2665	500	1234,5	1217	1263,725
7,554	500	1242,2	1217	1271,607
13,576	500	1249,7	1217	1279,285
28,458	500	1261	1217	1290,852
52,951	500	1273	1217	1303,136
90,732	500	1286,1	1217,1	1316,546
100	500	1289,1	1217,1	1319,617

Panas tersebut secara stimultan kemudian ditransfer melalui proses konduksi pada elemen - elemen yang berada di sekitar daerah lasan dan konveksi pada seluruh elemen benda kerja yang mengalami kontak langsung dengan udara sekitar. Pada waktu 100 diketahui panas Q1 adalah 1289 J, dimana Q1 adalah panas yang dihasilkan antara stir welding dan permukaan plat aluminium, untuk panas pada permukaan probe (Q2) di dapatkan 1217 J.

Dengan memperhatikan tabel di atas, panas nilai *heat flow* sebesar 500 W, maka besarnya Ttotal yang terjadi selama pengelasan dapat menggunakan persamaan 2.3 dan dihasilkan 1319,6 °C.

4.4 Analisa Distribusi Kecepatan

4.4.1 Analisa Kecepatan Putaran 800

Pengaruh kecepatan putaran sebesar 800 rad/s dan material properties yang diberikan sebagai bahan analisa distribusi kecepatan pengelasan menghasilkan output kecepatan yang terus meningkat pada daerah kontak elemen hingga

Tabel 4.6 Tabel Analisa Kecepatan Putaran Mesin 800 rad/s

Waktu	Kec.Arah	Kec.Pengelasan
0,1	3,E-04	39,27
0,2	1,E+00	19,2
0,35	3,E-04	35,746
0,575	1,E+00	17,7
0,9125	2,E-04	28,141
1,4188	6,E-01	14,325
2,1781	8,E-05	15,746
3,3172	1,E-01	6,7312
5,0258	2,E-01	3,6649
7,5887	9,E-05	7,6091
11,433	7,E-01	12,048
17,2	0,E+00	25,987

mencapai panas. Pada *load step* (tiap langkah) pengelasan terjadi kecepatan pengelasan pada tiap elemen sesuai dengan letak probe pada langkah tersebut.

Kecepatan putar tersebut ditransfer melalui proses kontak elemen yang mengalami gesekan antara probe dan permukaan material aluminium. Pada elemen yang berada di sekitar daerah lasan dan konveksi pada seluruh elemen benda kerja yang mengalami kontak langsung dengan udara sekitar. Pada waktu 17,2 diketahui kecepatan pengelasan sebesar 25,9 mm/s, dimana kecepatan pengelasan didapatkan dari gerak linear probe. Sedangkan nilai kecepatan V_{cp} sebesar 376172,219 mm/s didapatkan dari kecepatan titik kontak dengan tool

pengelasan. Sedangkan untuk nilai $V\omega$ yang di dapatkan sebesar 12940,32 mm/s.

Dengan memperhatikan tabel di atas, pada nilai kecepatan putaran sebesar 800 rad/s, maka besarnya δ yang terjadi selama pengelasan juga dapat dihitung.

4.4.2 Analisa Kecepatan Putaran 1000

Pengamatan terhadap pengaruh kecepatan putaran sebesar 1000 rad/s dan material properties yang diberikan sebagai bahan analisa distribusi kecepatan pengelasan menghasilkan output kecepatan yang terus meningkat pada daerah kontak elemen hingga mencapai panas. Pada *load step* (tiap langkah) pengelasan terjadi kecepatan pengelasan pada tiap elemen sesuai dengan letak probe pada langkah tersebut.

Tabel 4.7 Tabel Analisa Kecepatan Putaran Mesin 1000 rad/s

Waktu	Kec.Arah	Kec.Pengelasan
0,1	5,E-04	39,27
0,2	2,E+00	19,2
0,35	4,E-04	35,746
0,575	2,E+00	17,7
0,9125	3,E-04	28,141
1,4188	1,E+00	14,325
2,1781	1,E-04	15,746
3,3172	2,E-01	6,7312
5,0258	2,E-01	3,6649
7,5887	1,E-04	7,6091
11,433	1,E+00	12,048
17,2	0,E+00	25,987

Kecepatan putar tersebut ditransfer melalui proses kontak elemen yang mengalami gesekan anatra probe dan permukaan material aluminium. Pada elemen yang berada di sekitar daerah lasan dan konveksi pada seluruh elemen benda

kerja yang mengalami kontak langsung dengan udara sekitar. Pada waktu 17,2 diketahui kecepatan pengelasan sebesar 25,9 mm/s, dimana kecepatan pengelasan didapatkan dari gerak linear probe. Sedangkan nilai kecepatan V_{cp} sebesar 376172,219 mm/s didapatkan dari kecepatan titik kontak dengan tool pengelasan. Sedangkan untuk nilai V_{ω} yang di dapatkan sebesar 12940,32 mm/s.

Dengan memperhatikan tabel di atas, pada nilai kecepatan putaran sebesar 1000 rad/s, maka besarnya δ yang terjadi selama pengelasan juga dapat dihitung.

4.4.3 Analisa Kecepatan Putaran 1200

Untuk pengamatan selanjutnya, pada pengelasan *friction stir welding* dengan kecepatan putaran sebesar 1200 rad/s dan material properties yang diberikan sebagai bahan analisa distribusi kecepatan pengelasan menghasilkan output kecepatan yang terus meningkat pada daerah kontak elemen

Tabel 4.8 Tabel Analisa Kecepatan Putaran Mesin 1200 rad/s

Waktu	Kec.Arah	Kec.Pengelasan
0,1	6,E-04	39,27
0,2	3,E+00	19,2
0,35	6,E-04	35,746
0,575	2,E+00	17,7
0,9125	4,E-04	28,141
1,4188	1,E+00	14,325
2,1781	2,E-04	15,746
3,3172	3,E-01	6,7312
5,0258	3,E-01	3,6649
7,5887	2,E-04	7,6091
11,433	2,E+00	12,048
17,2	0,E+00	25,987

hingga mencapai panas. Pada *load step* (tiap langkah) pengelasan terjadi kecepatan pengelasan pada tiap elemen sesuai dengan letak probe pada langkah tersebut.

Kecepatan putar tersebut ditransfer melalui proses kontak elemen yang mengalami gesekan antara probe dan permukaan material aluminium. Pada elemen yang berada di sekitar daerah lasan dan konveksi pada seluruh elemen benda kerja yang mengalami kontak langsung dengan udara sekitar. Pada waktu 17,2 diketahui kecepatan pengelasan sebesar 25,9 mm/s, dimana kecepatan pengelasan didapatkan dari gerak linear probe. Sedangkan nilai kecepatan V_{cp} sebesar 376172,2 mm/s didapatkan dari kecepatan titik kontak dengan tool pengelasan. Sedangkan untuk nilai V_{ω} yang di dapatkan sebesar 12940,3 mm/s

Dengan memperhatikan tabel di atas, pada nilai kecepatan putaran sebesar 1200 rad/s, maka besarnya δ yang terjadi selama pengelasan juga dapat dihitung.

4.5 Analisa Temperatur *Heat flux*

4.5.1 Analisa *Heat flux*, dengan *Heat flow 300*

Pada analisa *heat fluks* yang dipengaruhi oleh heat flow 300 W dan material properties yang diberikan sebagai bahan analisa distribusi temperatur menghasilkan output temperatur yang terus meningkat pada daerah yang dikenai. panas hingga mencapai temperatur puncak. Pada *load step* (tiap langkah) pengelasan terjadi pemanasan pada tiap elemen sesuai dengan letak probe pada langkah tersebut. Panas tersebut secara stimultan kemudian ditransfer melalui proses konduksi pada elemen - elemen yang berada di sekitar daerah lasan dan konveksi pada seluruh elemen benda kerja yang mengalami kontak langsung dengan udara sekitar. Pada waktu 100 diketahui panas $q_{shoulder}$ adalah 65290,96 W/mm², dimana $q_{shoulder}$ adalah panas yang dihasilkn dari bagian *shoulder probe* ,untuk panas *heat flux* pin q_p di dapatkan 173,87 W/mm². Untuk gaya F sebesar 171,5 N

Tabel 4.9 Tabel Analisa *Heat Flux* dengan *Heat Flow* 300 W

Waktu	Heat Flow	Q1	Q2	Qtotal	qshoulder	qp
0,1	300	1218,5	1216,8	2435,3	63130,485	173,82857
0,2	300	1219,5	1216,7	2436,2	63182,295	173,81429
0,41706	300	1221	1216,6	2437,6	63260,01	173,8
0,8601	300	1222,7	1216,6	2439,3	63348,087	173,8
1,8373	300	1225,1	1217	2442,1	63472,431	173,85714
4,4493	300	1229	1217	2446	63674,49	173,85714
9,2699	300	1233,5	1217	2450,5	63907,635	173,85714
13,576	300	1238,7	1217	2455,7	64177,047	173,85714
20,343	300	1240	1217	2457	64244,4	173,85714
41,014	300	1247,4	1217	2464,4	64627,794	173,85714
70,507	300	1254,6	1217	2471,6	65000,826	173,85714
100	300	1260,2	1217,1	2477,3	65290,962	173,87143

yang didapatkan dari gaya reaksi yang dihasilkan saat alat bergerak maju sepanjang sambungan

Dengan memperhatikan tabel di atas, panas nilai *heat flow* sebesar 300 W, maka besarnya nilai Fv yang terjadi selama pengelasan juga dapat dihitung.

4.5.2 Analisa *Heat flux*, dengan *Heat flow* 400 W

Pengamatan terhadap analisa *heat flux*s yang dipengaruhi oleh heat flow 400 W dan material properties yang diberikan sebagai bahan analisa distribusi temperatur menghasilkan output temperatur yang terus meningkat pada daerah yang dikenai panas hingga mencapai temperatur puncak. Pada *load step* (tiap langkah) pengelasan terjadi pemanasan pada tiap elemen sesuai dengan letak probe pada langkah tersebut.

Tabel 4.10 Tabel Analisa *Heat Flux* dengan *Heat Flow* 400 W

Waktu	Heat Flow	Q1	Q2	Qttotal	qshoulder	qp
0,1	400	1219	1216,7	2435,7	63156,39	173,81429
0,2	400	1220,4	1216,6	2437	63228,924	173,8
0,41706	400	1222,3	1216,4	2438,7	63327,363	173,77143
0,86009	400	1224,7	1216,4	2441,1	63451,707	173,77143
1,8373	400	1227,8	1217	2444,8	63612,318	173,85714
4,4493	400	1232,9	1217	2449,9	63876,549	173,85714
10,631	400	1240,3	1217	2457,3	64259,943	173,85714
19,901	400	1247,6	1217	2464,6	64638,156	173,85714
24,563	400	1253,2	1217	2470,2	64928,292	173,85714
43,012	400	1258,2	1217	2475,2	65187,342	173,85714
83,593	400	1270,3	1217,1	2487,4	65814,243	173,87143
100	400	1274,5	1217,1	2491,6	66031,845	173,87143

Panas tersebut secara stimultan kemudian ditransfer melalui proses konduksi pada elemen - elemen yang berada di sekitar daerah lasan dan konveksi pada seluruh elemen benda kerja yang mengalami kontak langsung dengan udara sekitar. Pada waktu 100 diketahui panas *qshoulder* adalah 66031,85 W/mm², dimana *qshoulder* adalah panas yang dihasilkan dari bagian *shoulder probe*, untuk panas *heat flux* pin qp di dapatkan 173,87 W/mm². Untuk gaya F sebesar 171,5 N yang didapatkan dari gaya reaksi yang dihasilkan saat alat bergerak maju sepanjang sambungan

Dengan memperhatikan tabel di atas, panas nilai *heat flow* sebesar 400 W, maka besarnya nilai Fv yang terjadi selama pengelasan juga dapat dihitung..

4.5.3 Analisa *Heat flux*, dengan *Heat flow* 500

Untuk pengamatan selanjutnya, pada pengelasan *friction stir welding* dengan analisa *heat fluks* yang dipengaruhi oleh *heat flow* 500 W dan material properties yang diberikan sebagai bahan analisa distribusi temperatur menghasilkan output temperatur

yang terus meningkat pada daerah yang dikenai panas hingga mencapai temperatur puncak. Pada *load step* (tiap langkah) pengelasan terjadi pemanasan pada tiap elemen sesuai dengan letak probe pada langkah tersebut.

Tabel 4.11 Tabel Analisa *Heat Flux* dengan *Heat Flow* 500 W

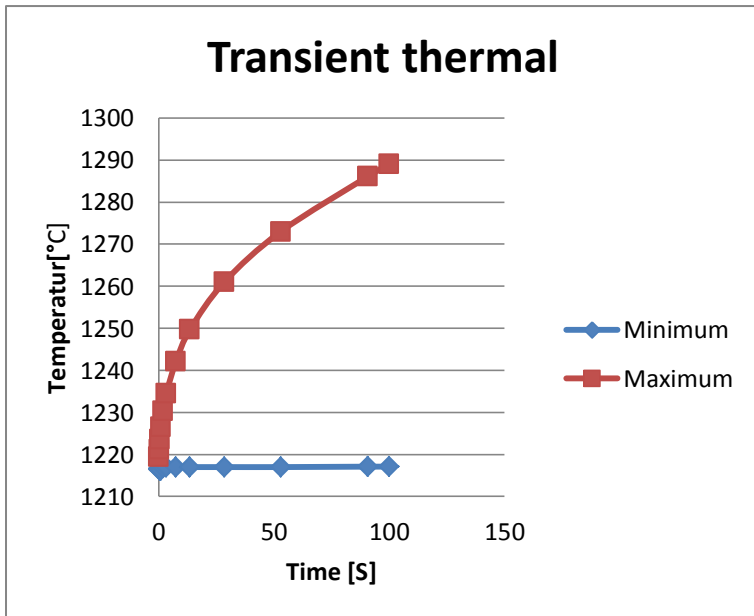
Waktu	Heat Flow	Q1	Q2	Qtotal	qshoulder	qp
0,1	500	1219,5	1216,6	2436,1	63182,295	173,8
0,2	500	1221,2	1216,4	2437,6	63270,372	173,77143
0,41706	500	1223,6	1216,3	2439,9	63394,716	173,75714
0,86009	500	1226,6	1216,3	2442,9	63550,146	173,75714
1,8373	500	1230,4	1216,9	2447,3	63747,024	173,84286
3,2665	500	1234,5	1217	2451,5	63959,445	173,85714
7,554	500	1242,2	1217	2459,2	64358,382	173,85714
13,576	500	1249,7	1217	2466,7	64746,957	173,85714
28,458	500	1261	1217	2478	65332,41	173,85714
52,951	500	1273	1217	2490	65954,13	173,85714
90,732	500	1286,1	1217,1	2503,2	66632,841	173,87143
100	500	1289,1	1217,1	2506,2	66788,271	173,87143

Panas tersebut secara stimultan kemudian ditransfer melalui proses konduksi pada elemen - elemen yang berada di sekitar daerah lasan dan konveksi pada seluruh elemen benda kerja yang mengalami kontak langsung dengan udara sekitar. Pada waktu 100 diketahui panas *qshoulder* adalah 66788,27 W/mm², dimana *qshoulder* adalah panas yang dihasilkan dari bagian *shoulder probe*, untuk panas *heat flux* pin *qp* di dapatkan 173,87 W/mm². Untuk gaya *F* sebesar 171,5 N yang didapatkan dari gaya reaksi yang dihasilkan saat alat bergerak maju sepanjang sambungan

Dengan memperhatikan tabel di atas, panas nilai *heat flow* sebesar 500 W, maka besarnya nilai *Fv* yang terjadi selama pengelasan juga dapat dihitung.

4.6 Hasil Simulasi ansys

4.6.1 Diagram *Transient thermal*



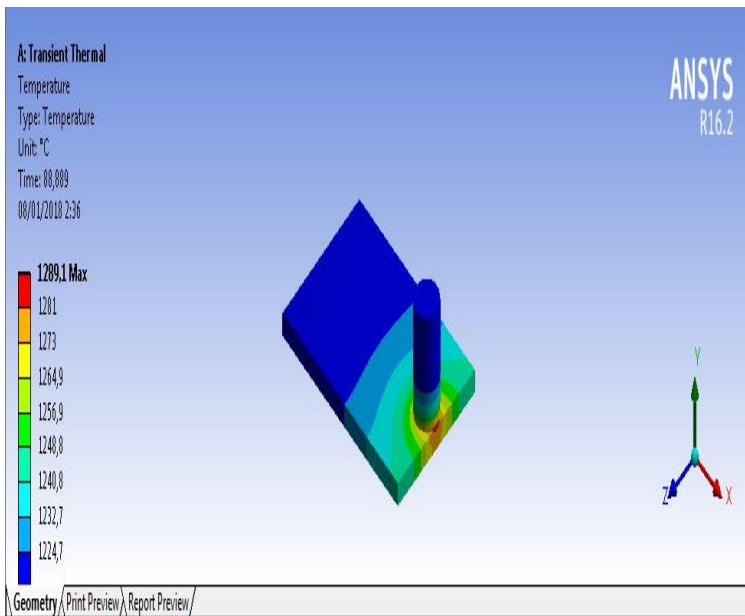
Gambar 4.1 Grafik *Transient thermal* pada proses *friction stir welding*

Grafik yang terbentuk pada kondisi puncak, dimana temperatur adalah 1289°C. Pada kondisi tersebut, besar μ pada material aluminum yang di las oleh probe adalah sebesar 0.18. temperatur 1216°C merupakan temperatur paling kecil.

Nilai temperatur 1289°C yang dialami oleh material hasil pengelasan tersebut merupakan nilai temperatur terbesar jika dibandingkan dengan temperatur lain pada kondisi kecepatan

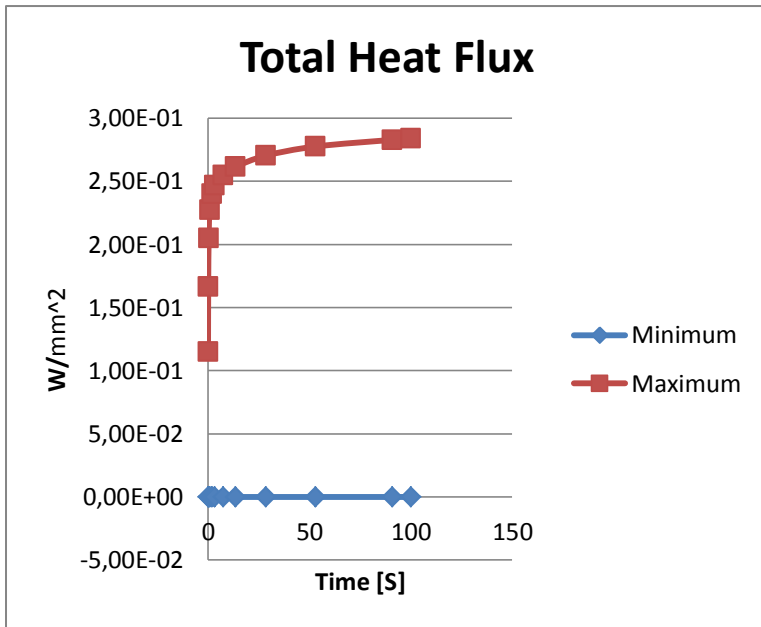
pengelasan yang sama. Selanjutnya, kecepatan pengelasan sebesar 1000 Rpm dialami oleh koefisien gesek 0,18.

Berdasarkan pembahasan tentang grafik pada gambar 4.1 di atas, dengan membandingkan ketiga kondisi minimal temperatur 1216°C, waktu pengelasan 90,7 detik dan maximal temperatur 1289°C, terlihat bahwa temperatur mengalami kenaikan.



Gambar 4.2 Gambar simulasi *Transient Thermal*

4.6.2 Diagram *Total Heat flux*

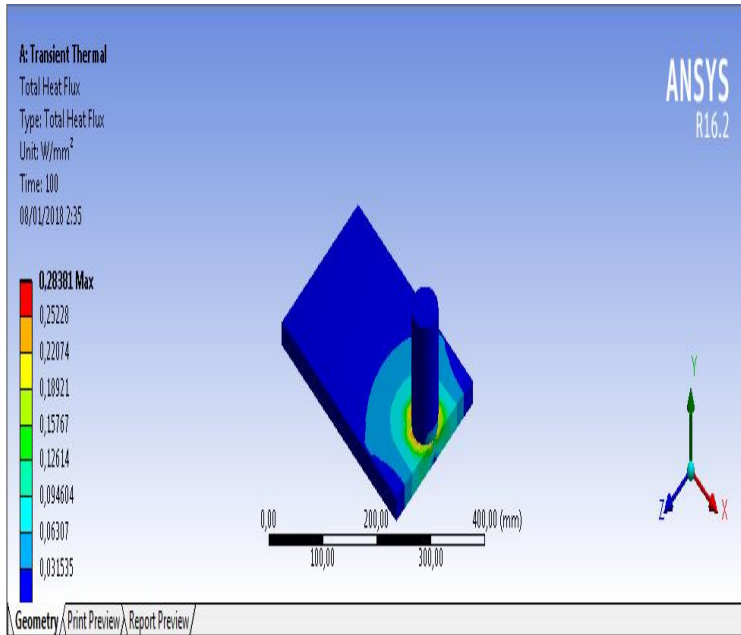


Gambar 4.3 Grafik *Total heat flux* pada *friction stir welding*

Untuk pembahasan selanjutnya ditinjau dari grafik yang terbentuk pada kondisi puncak, dimana panas fluks (*Heat Flux*) adalah $0,28 \text{ W/mm}^2$. Pada kondisi tersebut, besar **waktu** pada material aluminum yang di las oleh probe adalah sebesar 100 detik. Panas fluks (*Heat Flux*) $0,014 \text{ W/mm}^2$ panas fluks (*Heat Flux*) merupakan temperatur paling kecil.

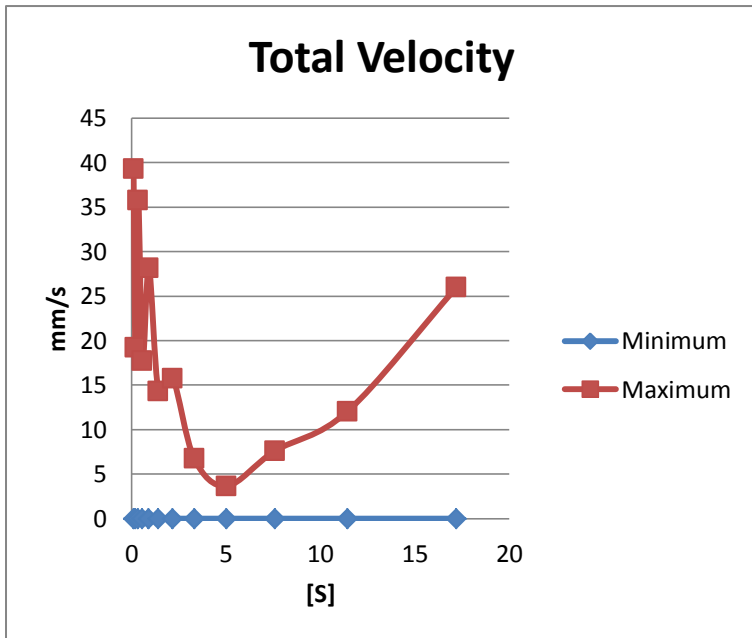
Nilai temperatur $0,28 \text{ W/mm}^2$. yang dialami oleh material hasil pengelasan tersebut merupakan nilai panas fluks terbesar jika dibandingkan dengan temperatur lain pada kondisi kecepatan pengelasan yang sama. Selanjutnya, waktu pengelasan sebesar 90,73 detik dialami oleh 0,18.

Berdasarkan pembahasan tentang grafik pada gambar 4.3 di atas, dengan membandingkan ketiga kondisi waktu pengelasan, panas fluks pengelasan 100 detik, 0,17 dan 0,28 W/mm², terlihat bahwa temperatur mengalami kenaikan.



Gambar 4.4 Gambar simulasi *Total Heat Flux*

4.6.3 Diagram *Total Velocity*

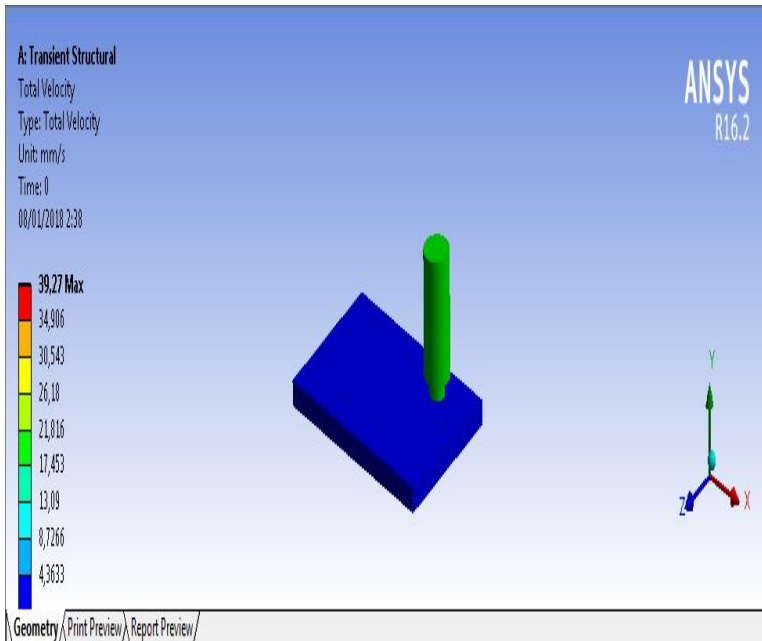


Gambar 4.5 Grafik *Total Velocity* pada *friction stir welding*

Pembahasan selanjutnya ditinjau dari grafik yang terbentuk pada kondisi puncak, dimana kecepatan pengelasan pada kondisi tersebut, besar **waktu** pada material aluminum yang di las oleh probe adalah sebesar 100 detik. Kecepatan pengelasan 0 mm/s merupakan kecepatan pengelasan paling kecil.

Nilai kecepatan 25,98 mm/s yang dialami oleh material hasil pengelasan tersebut merupakan nilai kecepatan pengelasan terbesar jika dibandingkan dengan kecepatan pengelasan lain. Selanjutnya, waktu pengelasan sebesar 17,2 detik dialami oleh koefisien gesek 0.18.

Berdasarkan pembahasan tentang grafik pada gambar 4.5 di atas, dengan membandingkan ketiga kondisi waktu pengelasan, kecepatan pengelasan 17,2 detik 0 dan 25,98 mm/s, terlihat bahwa kecepatan pengelasan mengalami kenaikan.



Gambar 4.6 Gambar simulasi *Total Velocity*

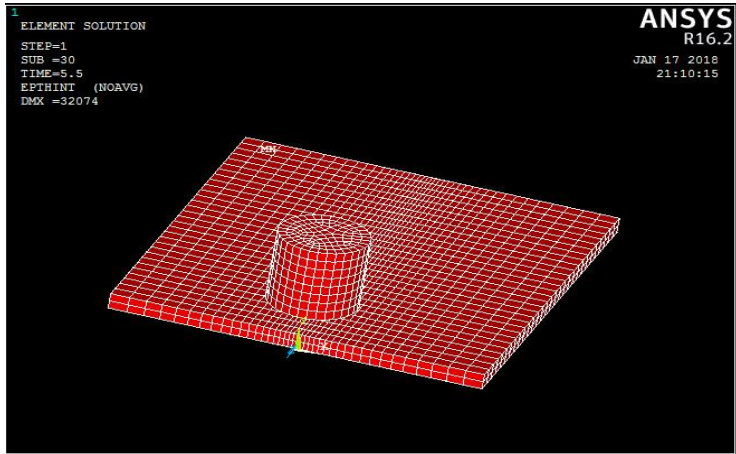
4.7 Simulasi *Finite Element* pada simulasi *ANSYS APDL*

Meshing benda kerja dilakukan terlebih dahulu sebelum memberikan beban termal. Meshing dilakukan guna membagi daerah analisa menjadi bagian – bagian yang lebih kecil. Bagian – bagian tersebut digambarkan dalam bentuk elemen. Dengan pembentukan elemen ini, maka analisa termal dan struktur dapat dilakukan dengan lebih mudah.

Pada penelitian ini digunakan 2 jenis elemen yaitu aluminium alloy dan aluminium alloy NL. Pemilihan kedua jenis elemen ini dilakukan dengan mempertimbangkan karakteristik material dan output analisa yang diinginkan. Pada analisa termal mampu memmmperhitungkan distribusi temperatur beban konduksi yang dilakukan selama proses pengelasan.

Pembebanan elemen pada daerah las bergantung panjangnya las dan kecepatan pengelasan yang dilakukan. Hal tersebut dengan persamaan 4.1 sebagai berikut:

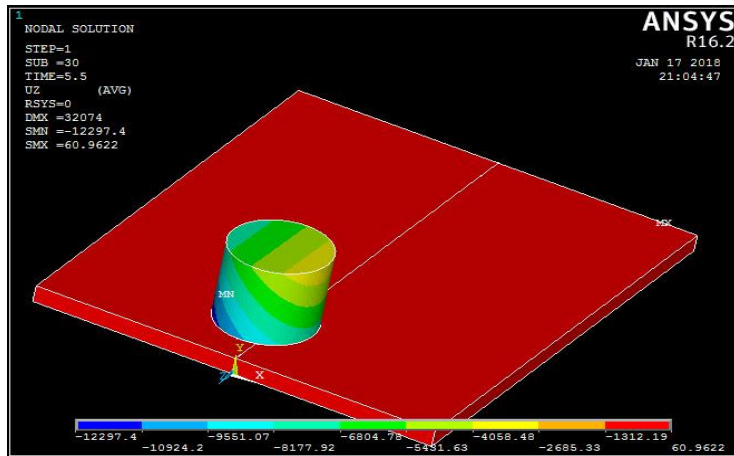
$$\begin{aligned}
 \text{Jumlah elemen} &= \frac{\text{Panjang las}}{\text{Kecepatan pengelasan}} \\
 &= \frac{30}{2,5} \\
 &= 8 \text{ (Pembulatan)} \qquad (4.1)
 \end{aligned}$$



Gambar 4.7 Gambar simulasi *Finite Element* menggunakan *Ansys APDL*

Karena proses pengelasan berlangsung sebanyak 2 lapisan, maka total jumlah elemen pada sumbu las adalah $8 \times 2 = 16$ elemen. Sedangkan jumlah keseluruhan elemen yang dihasilkan dalam proses meshing adalah 32074. Heat input yang digunakan pada pembebanan termal ini berupa pemanasan secara konduksi.

Pemanasan secara konduksi dilakukan dengan memberikan beban berupa heat flux. Heat flux yang diberikan merupakan panas yang berasal dari putaran probe sebagai pengantar panas pada pengelasan *Friciton Stir Welding*. Pada gambar di bawah menunjukkan ,semakin besar heat flux yang diberikan maka semakin lama waktu yang dibutuhkan untuk melakukan pengelasan .



Gambar 4.8 Gambar simulasi *Finite Element* pada *Nodal* material Aluminium

Pembebanan termal yang diberikan oleh *probe* dilakukan secara transient. Dengan pembebanan ini maka distribusi temperatur yang diberikan merupakan fungsi waktu dari selang waktu selama proses analisa. Pada gambar 4.8, waktu saat pengelasan yaitu 5,5 detik, laju panas pada arah x sebesar 60,96 W/mm²

[Halaman Sengaja Dikosongkan]

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

Di akhir pembuatan buku tugas akhir ini seluruh pengerjaan simulasi pengelasan *friction stir welding* yang telah dilakukan, dirumuskan ke dalam suatu kesimpulan yang berupa poin – poin penting yang dapat digunakan untuk memahami hasil dari tugas akhir ini. Disini disertakan juga saran yang nantinya dapat digunakan untuk melakukan penelitian lebih lanjut.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi pengelasan *friction stir welding* yang telah dilakukan, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Temperatur pengelasan tertinggi yang didapatkan pada pengerjaan simulasi adalah sebesar 1319,6 °C. Hasil tersebut didapatkan pada pola pengelasan searah yang diberikan koefisien gesek sebesar 0.18 dan adanya gaya normal sebesar 171,5 kN. Dapat disimpulkan bahwa semakin besar *heat flow* pengelasan yang diberikan maka temperatur yang dihasilkan semakin tinggi
2. Nilai total *heat fluks* yang didapatkan pada heat flow tertinggi (500 W), q_{shoulder} 66788,2 W/mm² dan 173,87 W/mm² untuk q_p , sedangkan nilai *heat fluks* yang terkecil ada pada *heat flow* 300 W
3. Distribusi kecepatan, pada putaran mesin tertinggi yaitu 1200 rad/s didapatkan kecepatan pengelasan sebesar 25,987 mm/s, dan untuk variabel status kontak sebesar 29,07
4. Pada *Heat flow* terkecil yaitu 300 J menghasilkan Q_{total} paling kecil di antara heat flow yang lainnya yaitu 2447,3 J, pada waktu pengelasan gesek sebesar 100 detik

5.2 Saran

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

1. Pengerjaan simulasi dapat dilakukan dengan menggunakan “birth and dead” element dimana ketika sebuah elemen diaktifkan kembali, yaitu "lahir", kekakuannya, massa, beban elemen, dan lain-lain kembali ke nilai asli mereka sepenuhnya. Elemen diaktifkan kembali tanpa catatan riwayat regangan (atau penyimpanan panas, dll.). Strain termal dihitung untuk elemen yang baru diaktifkan berdasarkan suhu langkah beban saat ini dan suhu referensi., sehingga panas yang terjadi pada plat pengelasan tidak mengalami konduksi ke arah elemen yang berada di atasnya
2. Perlu dilakukan simulasi lebih lanjut untuk memperkuat hasil –hasil analisa di atas dengan parameter yang sama tapi dilakukan jangan hanya sekali karena bisa terjadi eror yang besar pada proses analisa
3. Pemililhan bahan/material yang akan dilakukan pengelasan merupakan faktor utama yang akan berpengaruh terhadap parameter pengelasan lainnya seperti material *tool* yang digunakan, *travel speed*, dan kecepatan putar dari *tool*
4. Perlu untuk mencoba penggunaan *tool pin* dengan bentuk profil yang berbeda agar didapat hasil pengelasan yang lebih variatif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ulysse, P. (2002), "Three-dimensional Modelling of the Friction Stir-welding Process", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, pp. 1549-1557.
- [2] Cary, H.B., (1994), *Modern Welding Technology 3rd Ed.*, Englewood Cliffs, New Jersey, Regents/Pretince Hall.
- [3] Robert Hamilton, Donald MacKenzie, and Hongjun Li, "Multi-physics simulation of friction stir welding process," *Engineering Computations*, vol. 27, pp. 967-985, 2010.
- [4] Renju Mohan, N. R. Rajesh and Satheesh Kumar " finite element modeling for maximum temperature in friction stir welding of AA1100 and optimization of process parameters by Taguchi method" *International Journal of Research in Engineering and Technology*, V. 03 Issue: 05 | May-2014.
- [5] A. K. Lakshminarayanan, V. Balasubrahmanyam. Process parameters optimization for friction stir welding of RDE-40 aluminium alloy using Taguchi technique; *Trans.Nonferrous Met.Soc China* 2008.18. 548-554
- [6] P.Prasanna, B. Subba Rao, G. Krishna Mohana Rao; Finite element modeling for maximum temperature in friction stir welding and its validation; *Int J Adv Manuf Technol*; 2010;51:925-933.
- [7] X.K.Zhu, Y.J.Chao; Numerical simulation of transient temperature and residual stresses in friction stir welding of 304L stainless steel; *journal of materials processing technology* 146(2004) 263-272
- [8] P.Biswas, N.R Mandal, Effect of tool geometries on thermal history of FSW of AA1100; *Supplement to the welding journal*, July 2011.
- [9] Bohjwani S. Smoothed particle hydrodynamics modeling of the friction stir welding process: University of Texas at El Paso; 2007.

- [10] G.I. Mahiskar, dkk. (2014). *Thermo-mechanical Analysis of Multipass-bead-on-plate Welding*. Procedia Materials Science 2522-2531.

LAMPIRAN

Tabel Hasil Analisa Temperatur 300

Waktu	Temperatur	Q1	Q2	Qtotal	qshoulder	qp	F	Fv	Ttotal
0,1	300	1218,5	1216,8	2435,3	63130,485	173,8285714	171,5	1200,5	1247,346
0,2	300	1219,5	1216,7	2436,2	63182,295	173,8142857	171,5	1200,5	1248,37
0,41706	300	1221	1216,6	2437,6	63260,01	173,8	171,5	1200,5	1249,905
0,8601	300	1222,7	1216,6	2439,3	63348,087	173,8	171,5	1200,5	1251,646
1,8373	300	1225,1	1217	2442,1	63472,431	173,8571429	171,5	1200,5	1254,102
4,4493	300	1229	1217	2446	63674,49	173,8571429	171,5	1200,5	1258,095
9,2699	300	1233,5	1217	2450,5	63907,635	173,8571429	171,5	1200,5	1262,701
13,576	300	1238,7	1217	2455,7	64177,047	173,8571429	171,5	1200,5	1268,024
20,343	300	1240	1217	2457	64244,4	173,8571429	171,5	1200,5	1269,355
41,014	300	1247,4	1217	2464,4	64627,794	173,8571429	171,5	1200,5	1276,93
70,507	300	1254,6	1217	2471,6	65000,826	173,8571429	171,5	1200,5	1284,301
100	300	1260,2	1217,1	2477,3	65290,962	173,8714286	171,5	1200,5	1290,033

Tabel Hasil Analisa Temperatur 400

Waktu	Temperatur	Q1	Q2	Qtotal	qshoulder	qp	F	Fv	Ttotal
0,1	400	1219	1216,7	2435,7	63156,39	173,8142857	171,5	1200,5	1247,858
0,2	400	1220,4	1216,6	2437	63228,924	173,8	171,5	1200,5	1249,291
0,41706	400	1222,3	1216,4	2438,7	63327,363	173,7714286	171,5	1200,5	1251,236
0,86009	400	1224,7	1216,4	2441,1	63451,707	173,7714286	171,5	1200,5	1253,693
1,8373	400	1227,8	1217	2444,8	63612,318	173,8571429	171,5	1200,5	1256,866
4,4493	400	1232,9	1217	2449,9	63876,549	173,8571429	171,5	1200,5	1262,087
10,631	400	1240,3	1217	2457,3	64259,943	173,8571429	171,5	1200,5	1269,662
19,901	400	1247,6	1217	2464,6	64638,156	173,8571429	171,5	1200,5	1277,135
24,563	400	1253,2	1217	2470,2	64928,292	173,8571429	171,5	1200,5	1282,868
43,012	400	1258,2	1217	2475,2	65187,342	173,8571429	171,5	1200,5	1287,986
83,593	400	1270,3	1217,1	2487,4	65814,243	173,8714286	171,5	1200,5	1300,372
100	400	1274,5	1217,1	2491,6	66031,845	173,8714286	171,5	1200,5	1304,672

Tabel Hasil Analisa Temperatur 300

Waktu	Temperatur	Q1	Q2	Qtotal	qshoulder	qp	F	Fv	Total
0,1	500	1219,5	1216,5	2436,1	63182,295	173,8	171,5	1200,5	1248,37
0,2	500	1221,2	1216,4	2437,6	63270,372	173,7714286	171,5	1200,5	1250,11
0,41706	500	1223,6	1216,3	2439,9	63394,716	173,7571429	171,5	1200,5	1252,567
0,86009	500	1226,6	1216,3	2442,9	63550,146	173,7571429	171,5	1200,5	1255,638
1,8373	500	1230,4	1216,9	2447,3	63747,024	173,8428571	171,5	1200,5	1259,528
3,2665	500	1234,5	1217	2451,5	63959,445	173,8571429	171,5	1200,5	1263,725
7,554	500	1242,2	1217	2459,2	64358,382	173,8571429	171,5	1200,5	1271,607
13,576	500	1249,7	1217	2466,7	64746,957	173,8571429	171,5	1200,5	1279,285
28,458	500	1261	1217	2478	65332,41	173,8571429	171,5	1200,5	1290,852
52,951	500	1273	1217	2490	65954,13	173,8571429	171,5	1200,5	1303,136
90,732	500	1286,1	1217,1	2503,2	66632,841	173,8714286	171,5	1200,5	1316,546
100	500	1289,1	1217,1	2506,2	66788,271	173,8714286	171,5	1200,5	1319,617

Tabel Hasil Analisa Kecepatan Putaran Mesin 1200 rad/s

Waktu	ω	Kec.Arah	Kec.Pengelasan	V	Vcp	V ω	δ
0,1	1200	6,E-04	39,27	1136,898	568449	113,6898	5000
0,2	1200	3,E+00	19,2	555,8554	277927,7	111,1711	2500
0,35	1200	6,E-04	35,746	1034,875	517437,6	362,2064	1428,6
0,575	1200	2,E+00	17,7	512,4292	256214,6	294,6468	869,57
0,9125	1200	4,E-04	28,141	814,7045	407352,2	743,4178	547,95
1,4188	1200	1,E+00	14,325	414,7202	207360,1	588,405	352,41
2,1781	1200	2,E-04	15,746	455,8593	227929,6	992,9071	229,56
3,3172	1200	3,E-01	6,7312	194,8736	97436,81	646,4348	150,73
5,0258	1200	3,E-01	3,6649	106,1018	53050,89	533,2464	99,487
7,5887	1200	2,E-04	7,6091	220,2895	110144,8	1671,711	65,887
11,433	1200	2,E+00	12,048	348,7992	174399,6	3987,822	43,733
17,2	1200	0,E+00	25,987	752,3444	376172,2	12940,32	29,07

Tabel Hasil Analisa Kecepatan Putaran Mesin 1000 rad/s

Waktu	ω	Kec.Arah	Kec.Pengelasan	V	Vcp	V ω	δ
0,1	1000	5,E-04	39,27	1136,897916	568448,958	113,6897916	5000
0,2	1000	2,E+00	19,2	555,85536	277927,68	111,171072	2500
0,35	1000	4,E-04	35,746	1034,875297	517437,6484	362,2063539	1428,57
0,575	1000	2,E+00	17,7	512,42916	256214,58	294,646767	869,565
0,9125	1000	3,E-04	28,141	814,7044628	407352,2314	743,4178223	547,945
1,4188	1000	1,E+00	14,325	414,72021	207360,105	588,4050339	352,41
2,1781	1000	1,E-04	15,746	455,8592968	227929,6484	992,9071344	229,558
3,3172	1000	2,E-01	6,7312	194,873625	97436,81248	646,4347887	150,73
5,0258	1000	2,E-01	3,6649	106,1017869	53050,89346	533,2463607	99,4866
7,5887	1000	1,E-04	7,6091	220,2895323	110144,7661	1671,711174	65,8874
11,433	1000	1,E+00	12,048	348,7992384	174399,6192	3987,821693	43,7331
17,2	1000	0,E+00	25,987	752,3444396	376172,2198	12940,32436	29,0698

Tabel Hasil Analisa Kecepatan Putaran Mesin 1000 rad/s

Waktu	ω	Kec.Arah	Kec.Pengelasan	V	Vcp	V ω	δ
0,1	800	3,E-04	39,27	1137	568448,958	909518,3328	0,625
0,2	800	1,E+00	19,2	555,9	277927,68	111,171072	2500
0,35	800	3,E-04	35,746	1035	517437,6484	362,2063539	1428,5714
0,575	800	1,E+00	17,7	512,4	256214,58	294,646767	869,56522
0,9125	800	2,E-04	28,141	814,7	407352,2314	743,4178223	547,94521
1,4188	800	6,E-01	14,325	414,7	207360,105	588,4050339	352,41049
2,1781	800	8,E-05	15,746	455,9	227929,6484	992,9071344	229,55787
3,3172	800	1,E-01	6,7312	194,9	97436,81248	646,4347887	150,72953
5,0258	800	2,E-01	3,6649	106,1	53050,89346	533,2463607	99,486649
7,5887	800	9,E-05	7,6091	220,3	110144,7661	1671,711174	65,887438
11,433	800	7,E-01	12,048	348,8	174399,6192	3987,821693	43,733053
17,2	800	0,E+00	25,987	752,3	376172,2198	12940,32436	29,069767

Tabel Hasil Analisa *Heat Flux* dengan Heat Flow 300 W

Waktu	Heat Flow	Q1	Q2	Qtotal	r	qshoulder	qp	F	Fv
0,1	300	1218,5	1216,8	2435,3	5,5	63130,485	173,829	171,5	30,87
0,2	300	1219,5	1216,7	2436,2	5,5	63182,295	173,814	171,5	30,87
0,41706	300	1221	1216,6	2437,6	5,5	63260,01	173,8	171,5	30,87
0,8601	300	1222,7	1216,6	2439,3	5,5	63348,087	173,8	171,5	30,87
1,8373	300	1225,1	1217	2442,1	5,5	63472,431	173,857	171,5	30,87
4,4493	300	1229	1217	2446	5,5	63674,49	173,857	171,5	30,87
9,2699	300	1233,5	1217	2450,5	5,5	63907,635	173,857	171,5	30,87
13,576	300	1238,7	1217	2455,7	5,5	64177,047	173,857	171,5	30,87
20,343	300	1240	1217	2457	5,5	64244,4	173,857	171,5	30,87
41,014	300	1247,4	1217	2464,4	5,5	64627,794	173,857	171,5	30,87
70,507	300	1254,6	1217	2471,6	5,5	65000,826	173,857	171,5	30,87
100	300	1260,2	1217,1	2477,3	5,5	65290,962	173,871	171,5	30,87

Tabel Hasil Analisa *Heat Flux* dengan Heat Flow 400 W

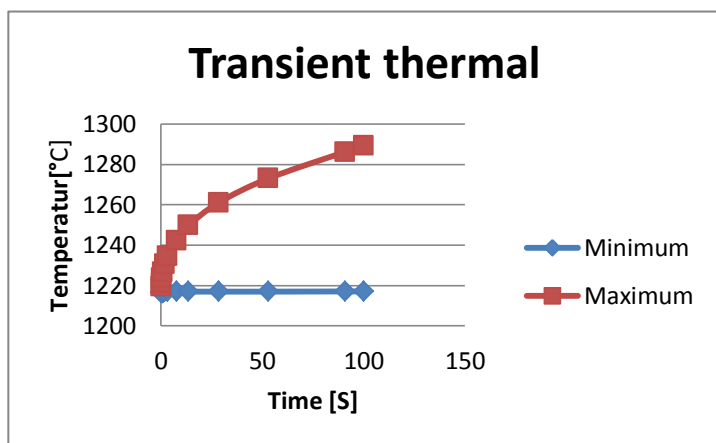
Waktu	Heat Flow	Q1	Q2	Qtotal	r	qshoulder	qp	F	Fv
0,1	400	1219	1216,7	2435,7	5,5	63156,39	173,814	171,5	30,87
0,2	400	1220,4	1216,6	2437	5,5	63228,924	173,8	171,5	30,87
0,41706	400	1222,3	1216,4	2438,7	5,5	63327,363	173,771	171,5	30,87
0,86009	400	1224,7	1216,4	2441,1	5,5	63451,707	173,771	171,5	30,87
1,8373	400	1227,8	1217	2444,8	5,5	63612,318	173,857	171,5	30,87
4,4493	400	1232,9	1217	2449,9	5,5	63876,549	173,857	171,5	30,87
10,631	400	1240,3	1217	2457,3	5,5	64259,943	173,857	171,5	30,87
19,901	400	1247,6	1217	2464,6	5,5	64638,156	173,857	171,5	30,87
24,563	400	1253,2	1217	2470,2	5,5	64928,292	173,857	171,5	30,87
43,012	400	1258,2	1217	2475,2	5,5	65187,342	173,857	171,5	30,87
83,593	400	1270,3	1217,1	2487,4	5,5	65814,243	173,871	171,5	30,87
100	400	1274,5	1217,1	2491,6	5,5	66031,845	173,871	171,5	30,87

Tabel Hasil Analisa *Heat Flux* dengan Heat Flow 500 W

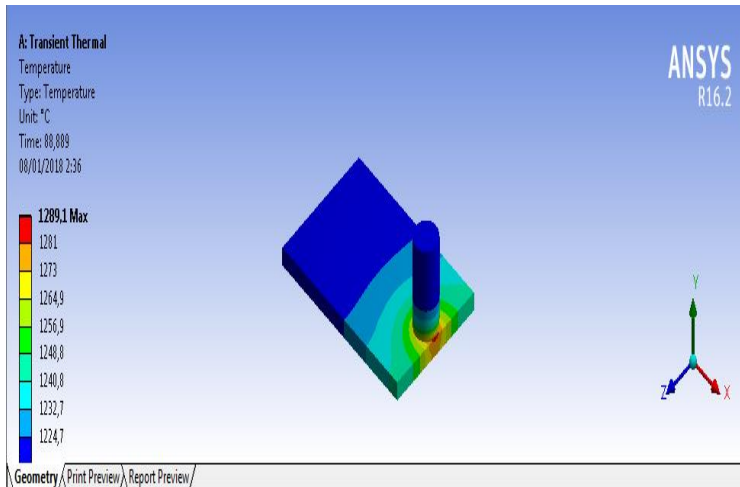
Waktu	Heat Flow	Q1	Q2	Qtotal	r	qshoulder	qp	F	Fv
0,1	500	1219,5	1216,6	2436,1	5,5	63182,295	173,8	171,5	30,87
0,2	500	1221,2	1216,4	2437,6	5,5	63270,372	173,771	171,5	30,87
0,41706	500	1223,6	1216,3	2439,9	5,5	63394,716	173,757	171,5	30,87
0,86009	500	1226,6	1216,3	2442,9	5,5	63550,146	173,757	171,5	30,87
1,8373	500	1230,4	1216,9	2447,3	5,5	63747,024	173,843	171,5	30,87
3,2665	500	1234,5	1217	2451,5	5,5	63959,445	173,857	171,5	30,87
7,554	500	1242,2	1217	2459,2	5,5	64358,382	173,857	171,5	30,87
13,576	500	1249,7	1217	2466,7	5,5	64746,957	173,857	171,5	30,87
28,458	500	1261	1217	2478	5,5	65332,41	173,857	171,5	30,87
52,951	500	1273	1217	2490	5,5	65954,13	173,857	171,5	30,87
90,732	500	1286,1	1217,1	2503,2	5,5	66632,841	173,871	171,5	30,87
100	500	1289,1	1217,1	2506,2	5,5	66788,271	173,871	171,5	30,87

Tabel Hasil Analisa *Transient Thermal* pada Simulasi Ansys

Time (s)	Minimum	Maximum
0,1	1216,6	1219,5
0,2	1216,4	1221,2
0,41706	1216,3	1223,6
0,86009	1216,3	1226,6
1,8373	1216,9	1230,4
3,2665	1217	1234,5
7,554	1217	1242,2
13,576	1217	1249,7
28,458	1217	1261
52,951	1217	1273
90,732	1217,1	1286,1
100	1217,1	1289,1



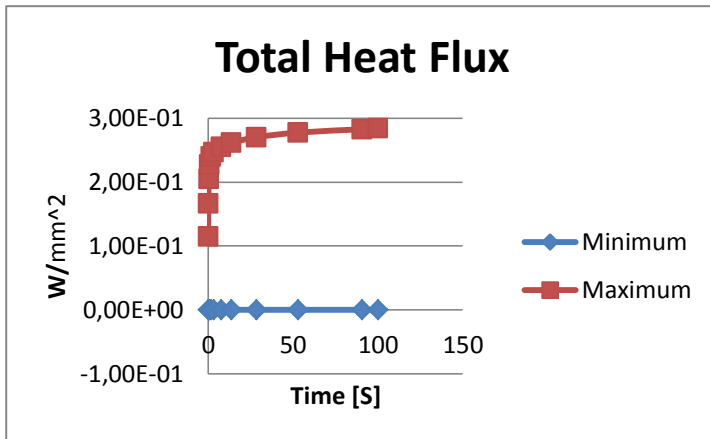
Grafik hasil simulasi *Transient thermal* pada proses *friction stir welding*



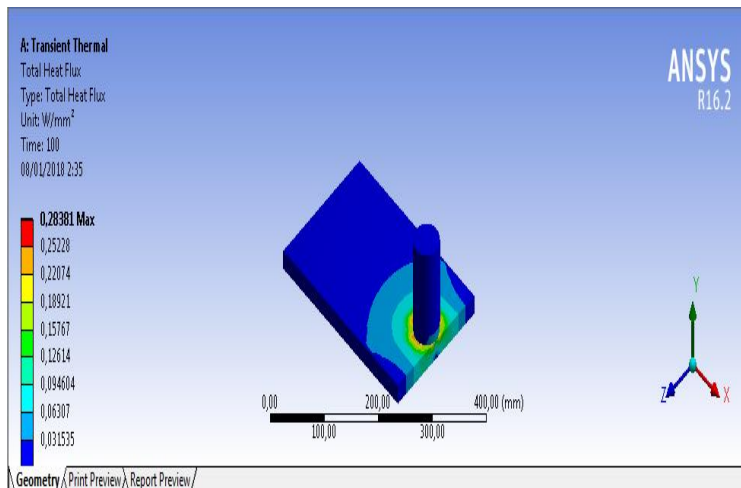
Gambar hasil simulasi *Transient Thermal*

Tabel Hasil Analisa *Total Heat flux* pada Simulasi Ansys

Time (s)	Minimum	Maximum
0,1	6,64E-09	0,11485
0,2	1,88E-08	0,16636
0,41706	1,95E-08	0,205
0,86009	9,86E-09	0,22736
1,8373	2,74E-09	0,23998
3,2665	7,83E-10	0,24672
7,554	1,67E-09	0,25471
13,576	1,53E-09	0,26143
28,458	1,78E-08	0,27022
52,951	3,52E-07	0,27751
90,732	1,50E-06	0,28277
100	1,79E-06	0,28381



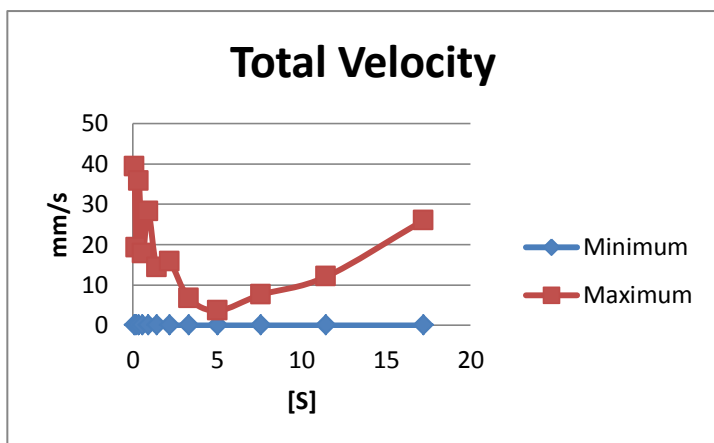
Grafik hasil *Total Heat Flux* pada proses *friction stir welding*



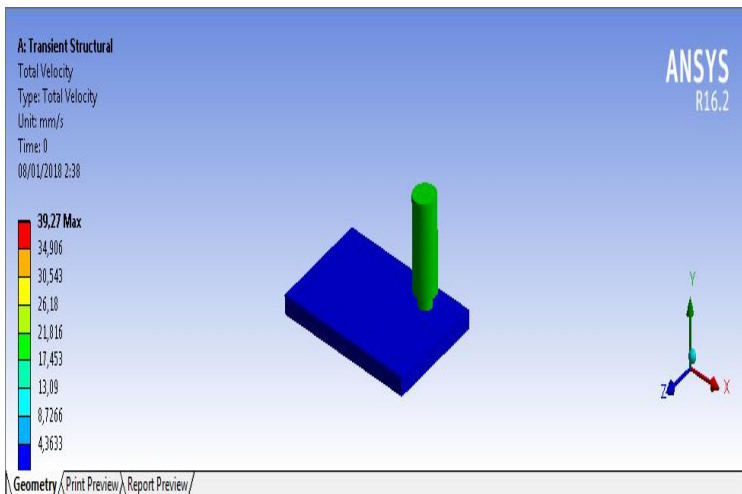
Gambar hasil simulasi *Total Heat Flux*

Tabel Hasil Analisa *Total Velocity* pada Simulasi *Ansys*

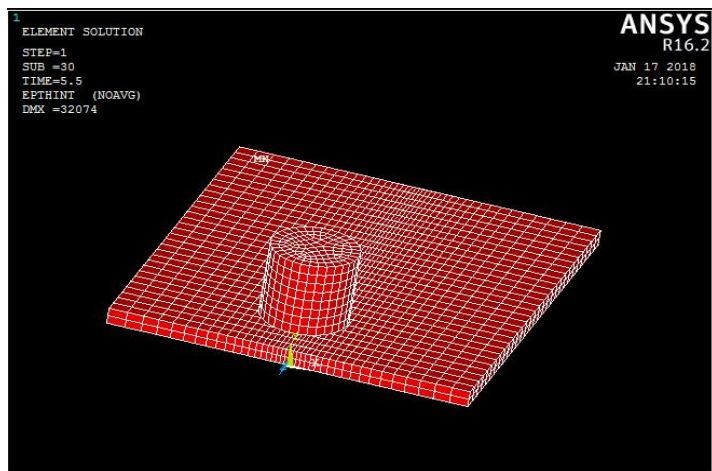
Time (s)	Minimum	Maximum
0,1	0	39,27
0,2	0	19,2
0,35	0	35,746
0,575	0	17,7
0,9125	0	28,141
1,4188	0	14,325
2,1781	0	15,746
3,3172	0	6,7312
5,0258	0	3,6649
7,5887	0	7,6091
11,433	0	12,048
17,2	0	25,987



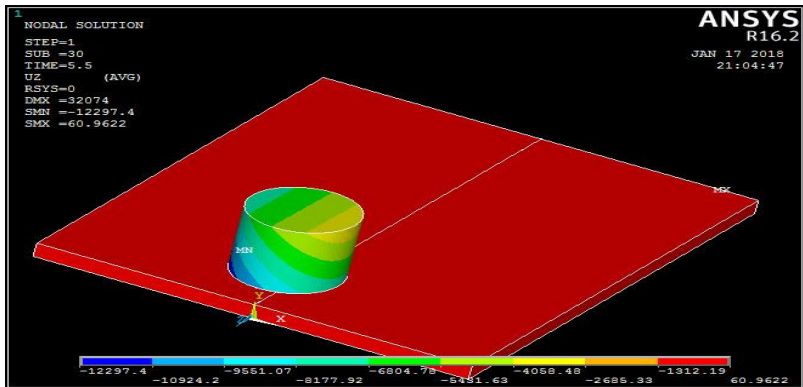
Grafik hasil *Total Velocity* pada proses *friction stir welding*



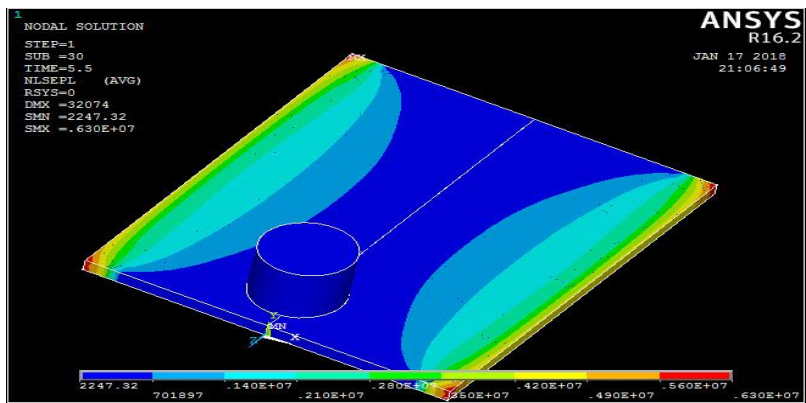
Gambar hasil simulasi *Total Velocity*



Gambar hasil simulasi *Finite Element* menggunakan *Ansyes APDL*



Gambar hasil simulasi *Finite Element* pada *Nodal* material aluminium



Gambar hasil simulasi *Finite Element* pada proses pengelasan *FSW*

[Halaman Sengaja Dikosongkan]

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Bontang, 27 Juni 1992, merupakan anak terakhir dari 2 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu TK VIDATRA, SD VIDATRA, SMP VIDATRA, SMAN 1 Bontang. Setelah lulus dari SMAN tahun 2010, Penulis mengikuti PMDK dan diterima di Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS pada tahun 2010 dan terdaftar dengan NRP 2110100058. Di jurusan Teknik Mesin ini Penulis mengambil bidang minat Mekanika Benda Padat (*Solid Mechanics*). Penulis sempat aktif di beberapa kegiatan seminar, *event*, kepanitiaan di beberapa kegiatan yang diselenggarakan oleh jurusan Teknik Mesin ITS.

Untuk segala informasi dan saran yang ditujukan kepada penulis dapat menghubungi penulis melalui *email* ibnuadiwiyata@yahoo.com.