ANALISIS SIFAT MEKANIS DAN MIKROSTRUKTUR PADA SAMBUNGAN PENGELASAN DISSIMILAR FRICTION STIR WELDING (FSW) ALUMINIUM AA 6061 DENGAN ALUMINIUM AA 5052

SKRIPSI

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Menyelesaikan
Pendidikan Diploma Empat (D-4) Program Studi Teknik Manufaktur
Jurusan Teknik Mesin
Politeknik Negeri Ujung Pandang

FAUZAN ADZIMA A 443 14 001
ABD RAHIM 443 14 011

PROGRAM STUDI D-4 TEKNIK MANUFAKTUR
JURUSAN TEKNIK MESIN
POLITEKNIK NEGERI UJUNG PANDANG
MAKASSAR
2018

HALAMAN PENGESAHAN PEMBIMBING

Laporan skripsi dengan judul "*Analisis Sifat Mekanis Dan Mikrostruktur Pada Sambungan Pengelasan Dissimilar Friction Stir Welding (FSW) Aluminium AA 6061 Dengan Aluminium AA 5052*" oleh:

1. Fauzan Adzima A (443 14 001)
2. Abd. Rahim (443 14 011)

Telah diperiksa dan disahkan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar S1 Terapan (D4) pada Jurusan Teknik Mesin/Program studi D4 Teknik Manufaktur Politeknik Negeri Ujung Pnadang.

Makassar, Agustus 2018

Mengesahkan,

Pembimbing I,	Pembimbing II,
Abram Tangkemanda, S.T.,M.T	**Muhammad Arsyad Suyuti. S.T.,M.T**
NIP. 19650817 199003 1 003	**NIP. 19721206 200212 1 004**

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Mesin

Politeknik Negeri Ujung Pandang

Dr. Jamal, S.T., M.T

19730228 200012 1 002

PENERIMAAN PANITIA UJIAN

Panitia Ujian Sidang Tugas Akhir telah menerima dengan baik hasil Tugas Akhir Mahasiswa atas nama: Fauzan Adzima A/ 44314001, Abd. Rahim/ 44314011 dengan judul "*Analisis Sifat Mekanis Dan Mikrostruktur Pada Sambungan Pengelasan Dissimilar Friction Stir Welding (FSW) Aluminium AA 6061 Dengan Aluminium AA 5052*"

Makassar, Agustus 2018

Panitia Ujian Sidang Tugas Akhir

1.	Ir. Syaharuddin Rasyid, M.T	(Ketua)	(.....)
2.	Arthur Halik Razak, S.ST., M.T.	(Sekretaris)	(.....)
3.	Ir. Muas M, M.T.	(Anggota)	(.....)
4.	Muhammad Iswar, S.S.T., M.T.	(Anggota)	(.....)
5.	Abram Tangkemanda, S.T., M.T.	(Anggota)	(.....)
6.	Muhammad Arsyad Suyuti, S.T., M.T.	(Anggota)	(.....)

ABSTRAK

"Analisis Sifat Mekanis Dan Mikrostruktur Pada Sambungan Pengelasan *Dissimilar Friction Stir Welding* (Fsw) Aluminium AA 5052 Dengan Aluminium AA 6061", Makassar, (Fauzan Adzima A, Abd. Rahim', Abram Tangkemanda S.T., M.T dan Muhammad Arsyad Suyuti, S.T., M.T.).

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sifat mekanis dan mikrostruktur yang dihasilkan pengelasan *dissimilar* serta mempelajari pengaruh variasi pengelasan yaitu *pin tool*, putaran *tool*, dan kecepatan pengelasan (*feeding*) dalam pengelasan *dissimilar friction stir welding* (FSW) pada material Aluminium AA 5052 dengan alumunium AA 6061. Sifat mekanis yang dianalisa diantaranya kekuatan tarik, kekuatan lentur, kekerasan, dan mikrostruktur hasil pengelasan yang didapatkan dengan melakukan pengujian yang meliputi pengujian kekerasan, kekuatan tarik, kekuatan lentur dan foto mikrostruktur. Sifat mekanis dengan kualitas yang lebih baik terdapat pada *tool* dengan *pin* ulir dengan kekerasan tertinggi sebesar 53,7 HB pada putaran 1300 Rpm dengan *feeding* 130 mm/min, Kekuatan tarik dan tekuk tertinggi terjadi pada tool pin shoulder silinder untuk putaran 1300 rpm dan *feeding* 130 mm/min sebesar 123,51 Mpa dan 243, 7 Mpa. Dimana patahan hasil uji tarik yang terjadi pada daerah HAZ logam induk AA5052. Hasil foto struktur mikro pengelasan menunjukkan bahwa rata-rata ukuran butir (*Average size*) yang palin g kecil juga terjadi pada tool pin shoulder silinder dengan putaran 1300 rpm dan *feeding* 130 mm/min kecil sebesar 14,034 µm, proses yang terjadi pada saat pengelasan *dissimilar* yaitu terjadinya proses pelumeran dan pengadukan material beda jenis sehingga sifat mekanis dan mikrostruktur saling mempengaruhi. Pengelasan *dissimilar* FSW direkomendasikan untuk konstruksi yang ringan tanpa ada beban melebihi logam induk.

Kata kunci: Alumunium AA 6061, AA 5052, mikrostruktur, *dissimilar, tool pin*, *feeding, Friction Stir Welding,* pengelasan, putaran *tool*, *nugget zone, Average size.*

ABSTRACT

"Mechanical and micro structural analysis of dissimilar friction stir welding (FSW) of aluminum AA 5052 and AA 6061", Makassar (Fauzan Adzima A, Abd. Rahim', Abram Tangkemanda S.T., M.T dan Muhammad Arsyad Suyuti, S.T., M.T.).

The aim of this study was to analyze the mechanical and micro structural resulted by dissimilar welding and scrutinized the effect of welding, namely pin tool, rotation tool and feeding of welding in dissimilar friction stir welding of AA 5052 and AA 6061. The analyzed mechanical were pull power, bent power, hardness and micro structure of the welding result by doing a test that covered hardness test, pull power, bent power and micro structure image. The result of this study showed that tool with pitch pin is better in highest hardness with 53,7 HB in rotation 1300 Rpm with feeding 130 mm/min. Pull power and highest bent was in tool pin shoulder silinder with rotation 1300 rpm and feeding 130 mm/min by 123,51 Mpa and 243, 7 Mpa. The broken fragment result of pull test was occured on HAZ main metal AA 5052 area. The result of welding micro structure's image showed that average size of the smallest was also occured on tool pin shoulder silinder with rotation 1300 rpm and feeding 130 mm/min micro with 14,034 µm, the processes occured during dissimilar welding were melting and stirring dissimilar material process resulting mechanical and micro structural affected each other. FSW dissimilar welding was recommended to micro construction with no load over from the main metal.

Keywords: *Aluminum AA 6061, AA 5052, micro structure, dissimilar, tool pin, feeding, friction stir welding, welding, tool rotation, nugget zone, average size*

KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas berkat nikmat kesempatan dan kesehatan yang diberikan sehingga penulis mampu meyelesaikan skripsi ini dengan tepat waktu.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan dari berbagai pihak, untuk itu peneliti ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua dan seluruh keluarga yang telah banyak memberikan bantuan moril maupun materil serta dukungan dan motivasi.
2. Dr. Ir. Hamzah Yusuf, M.S. selaku Direktur Politeknik Negeri Ujung Pandang
3. Dr. Jamal, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin.
4. Ir. Abdul Salam, M.T. selaku Ketua Program Studi S-1 Terapan/(D-4) Teknik Mesin.
5. Abram Tangkemanda S.T., M.T. selaku pembimbing I yang memberikan arahan dan bimbingan dalam penyelesaian skripsi ini.
6. Muhammad Arsyad Suyuti, S.T., M.T. selaku pembimbing II yang memberikan arahan, dan bimbingan dalam penyelesaian skripsi ini.
7. Dosen dan Tenaga Kependidikan yang memberikan arahan, dan bimbingan dalam penyelesaian skripsi ini.
8. Ibu Haryani S.Sos selaku Staf Administrasi D-4 Teknik Mesin.
9. Teman-teman D-4 Teknik Mesin Angkatan 2014 atas dukungan moril dan doanya dalam pembuatan skripsi ini

Penulis menyadari bahwa skripsi ini belum sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritikan dan saran yang bersifat membangun demi meningkatkan ilmu pengetahuan khususnya dibidang friction stir welding dan perbaikan pada masa mendatang skripsi ini bermanfaat bagi pembacanya.

Makassar, Agustus 2018

Penyusun

DAFTAR ISI

SAMPUL i

HALAMAN PENGESAHAN ii

HALAMAN PENERIMAAN iii

ABSTRAK iv

ABSTRACT v

KATA PENGANTAR vi

DAFTAR ISI viii

DAFTAR GAMBAR xii

DAFTAR TABEL xvii

DAFTAR LAMPIRAN xx

SURAT PERNYATAAN xxii

BAB I PENDAHULUAN 1

1.1. Latar Belakang 1

1.2. Rumusan Masalah 3

1.3. Batasan Masalah 4

1.4. Tujuan Penelitian 4

1.5. Manfaat Peneltian 4

BAB II TINJAUAN PUSTAKA..... 6

2.1. Pengelasan FSW 6

2.2. Aluminium dan Paduannya 7

2.2.1 Paduan Aluminium AA 5052 (Al-Mg) 11

2.2.2 Paduan Aluminium AA 6061 (Al-Mg-Si) 12

2.3. Sifat Mekanik Bahan..... 12

2.3.1. Pengujian Tarik 13

2.3.2. Pengujian Tekuk..... 16

2.3.3. Pengujian Kekerasan..... 19

2.4. Mikrostruktur 20

2.4.1. Pemotongan (Cutting) 21

2.4.2. Pembingkaian (Mounting)..... 21

2.4.3. Pengamplasan dan Pemolesan..... 21

2.4.4. Pengetsahan (Etching) 22

2.5. Analisi Statistik..... 22

2.5.1. Analisis ANOVA 22

2.5.2. Analisis Korelasi 25

2.5.3. Analisis Regresi..... 23

2.5.4. Penelitian Pendahuluan 26

BAB III METODE PENELITIAN..... 28

3.1. Spesifikasi Bahan Uji..... 28

3.2. Waktu dan Tempat Penelitian..... 29

3.3. Alat dan Bahan..... 29

3.4. Langkah Kerja 30

3.5. Proses Pengujian 34

3.5.1.Pengujian Kekuatan Tarik 35

3.5.2 Pengujian Kekerasan..... 37

3.5.3 Pengujian Mikrostruktur 42

3.6. Teknik Analisis Data..... 43

3.7. Diagram Alir Penelitian 46

BAB IV. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN 47

4.1. Sifat Mekanis Material Logam Induk 47

4.2. proses pengelasan sambungan dissimilar FSW

Aluminium AA dan AA 6061..... 48

4.2.1. Tahap Pertama 49

4.2.2 Tahap Kedua 49

4.2.3. Tahap Ketiga 50

4.3. Hasil Proses Pengujian Sifat Mekanis dan Mikrostruktur

FSW Aluminium AA5052 dan Aluminium AA 6061..... 53

4.4. Pengukuran Temperatur Pengelasan..... 58

4.5. Analisis Sifat Mekanis Hasil Las FSW Aluminium AA 5052 dan Aluminium AA 6061 61

4.5.1 Uji Kekerasan Metode Brinnel 61

4.5.2 Pengujian Kekuatan Tarik (σ_u)..... 74

4.5.3 Pengujian Kekuatan Lentur (σ_b)..... 91

4.6. Mikrostruktur Hasil pengelasan Dissimilar FSW Aluminium AA 5052 dan Aluminium AA 6061..... 109

4.7. Pengaruh Parameter Pengelasan FSW Dissimilar AA 5052 dan AA 6061 Terhadap Temperature, Mikrostruktur, Sifat Mekanis 115

4.8. Cacat Pada Sambungan Pengelasan Dissimilar FSW Aluminium AA 5052 dan Aluminium AA 6061..... 117

4.9. Analisis Varian (ANOVA), Korelasi, dan Regresi 118

4.9.1 Optimasi Pemilihan Putaran, Feeding Pada Tool Silinder Dalam Menentukan Nilai Kekerasan, Tekuk dan Tarik 134

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN..... 136

5.1. Kesimpulan 136

5.2.. Saran..... 137

DATAR PUSTAKA 138

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Skema Pengelasan FSW 7

Gambar 2.2. Klasifikasi Aluminium dan paduannya 8

Gambar 2.3. Diagram Fasa Aluminium AA 5052 11

Gambar 2.4. Diagram Fasa Aluminium AA 6061 12

Gambar 2.5. Kurva uji tarik 13

Gambar 2.6. Titik luluh pada uji tarik 14

Gambar 2.7. Momen Bending pada Bahan 16

Gambar 2.8. Bending 18

Gambar 2.9 Longitudinal Bending 18

Gambar 2.10. Pengujian Brinnel 20

Gambar 3.1 Geometri dan Dimensi *Tool* Silinder 31

Gambar 3.2 Geometri dan Dimensi *Tool* Segitiga 31

Gambar 3.3 Geometri dan Dimensi *Tool* Ulir 32

Gambar 3.4 Benda Kerja Las. 32

Gambar 3.5 Proses Pengelasan Benda Kerja. 33

Gambar 3.6 Spesimen Benda Uji. 34

Gambar 3.7 Universal Testing Machine dan Bagiannya 36

Gambar 3.8 Mesin Uji Kekerasan 38

Gambar 3.9 Skala Beban Uji 39

Gambar 3.10 Penetrator dan Ring Mur. 39

Gambar 3.11 Landasan Spesimen 39

Gambar 3.12 Switch On. 40

Gambar 3.13 Tombol On. 40

Gambar 3.14 Posisi Sampel Salah. 40

Gambar 3.15 *Hardwheel* Berputar Keatas. 41

Gambar 3.16 Hasil Pengujian Kekerasan. 41

Gambar 3.17 Pengamatan Benda Kerja Menggunakan Mikroskop. 42

Gambar 3.18 Menu *Treshold* pada Aplikasi *Imagel* 43

Gambar 3.19 Diagram Alir Penelitian. 46

Gambar 4.1 Hasil Pembuatan 49

Gambar 4.2 Mesin Frais *Minyang* 50

Gambar 4.3 Proses Pengelasan FSW. 51

Gambar 4.4 Hasil Pengelasan FSW Aluminium AA5052 dan AA6061. 51

Gambar 4.5 Cacat Permukaan Hasil Pengelasan. 52

Gambar 4.6 Cacat Permukaan Hasil Pengelasan dengan Foto Makro. 52

Gambar 4.7 Proses Uji Tarik Dan Hasil Uji Tarik..... 53

Gambar 4.8. Jenis - Jenis Patahan Uji Tarik 54

Gambar 4.9 Proses Uji Lentur Dan Hasil Uji Lentur..... 55

Gambar 4.10 Jenis - Jenis Hasil Uji Lentur. 56

Gambar 4.11 Proses Uji Kekerasan dan Hasil Uji Kekerasan. 57

Gambar 4.12 Spesimen Polish Uji Mikrostruktur..... 58

Gambar 4.13 Pengukuran Temperatur. 58

Gambar 4.14 Grafik Distribusi Temperatur Pengelasan. 59

Gambar 4.15 Spesimen Uji Kekerasan. 61

Gambar 4.16 Distribusi Nilai Kekerasan FSW *Tool* 1
Untuk Putaran 1300 Rpm..... 63

Gambar 4.17 Distribusi Nilai Kekerasan FSW *Tool* 1
Untuk Putaran 1950 Rpm..... 63

Gambar 4.18 Distribusi Nilai Kekerasan FSW *Tool* 1
Untuk Putaran 2850 Rpm..... 63

Gambar 4.19 Distribusi Nilai Kekerasan FSW *Tool* 2
Untuk Putaran 1300 Rpm..... 65

Gambar 4.20 Distribusi Nilai Kekerasan FSW *Tool* 2
Untuk Putaran 1950 Rpm..... 65

Gambar 4.21 Distribusi Nilai Kekerasan FSW *Tool* 2
Untuk Putaran 2850 Rpm..... 66

Gambar 4.22 Distribusi Nilai Kekerasan FSW *Tool* 3
Untuk Putaran 1300 Rpm..... 67

Gambar 4.23 Distribusi Nilai Kekerasan FSW *Tool* 3
Untuk Putaran 1950 Rpm..... 67
Gambar 4.24 Distribusi Nilai Kekerasan FSW *Tool* 3
Untuk Putaran 2850 Rpm..... 67
Gambar 4.25 Diagram Nilai Kekuatan Tarik
Hasil Pengelasan FSW *Tool* 1 83
Gambar 4.26 Diagram Nilai Kekuatan Tarik
Hasil Pengelasan FSW *Tool* 2..... 83
Gambar 4.27 Diagram Nilai Kekuatan Tarik
Hasil Pengelasan FSW *Tool* 3 84
Gambar 4.28 Diagram Nilai Kekuatan Lentur (*Face Bend*)
Hasil Pengelasan FSW *Tool* 1 95
Gambar 4.29 Diagram Nilai Kekuatan Lentur (*Face Bend*)
Hasil Pengelasan FSW *Tool* 2 96
Gambar 4.30 Diagram Nilai Kekuatan Lentur (*Face Bend*)
Hasil Pengelasan FSW *Tool* 3 96
Gambar 4.31 Diagram Nilai Kekuatan Lentur (*Root Bend*)
Hasil Pengelasan FSW *Tool* 1..... 102
Gambar 4.32 Diagram Nilai Kekuatan Lentur (*Root Bend*)
Hasil Pengelasan FSW *Tool* 2..... 103
Gambar 4.33 Diagram Nilai Kekuatan Lentur (*Root Bend*)
Hasil Pengelasan FSW *Tool* 3..... 103
Gambar 4.34 Mikrostruktur 108
Gambar 4.35 Diagram Batang Mikrostruktur. 110
Gambar 4.36 Hasil Foto Mikrostruktur Logam Induk..... 112
Gambar 4.37 Foto Hasil Pengelasan, Foto Makro, Hasil Polis dan Foto
Mikrostruktur. 132

Gambar 4.38. Grafik Optimasi Kekerasan Hasil Pengelasan 132

Gambar 4.39 Grafik Optimasi Kekuatan Tarik Hasil Pengelasan. 133

Gambar 4.40 Grafik Optimasi Kekuatan Lentur Hasil Pengelasan. 134

POLITEKNIK NEGERI
UJUNG PANDANG

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi Kimia Alumunium Dan Paduannya..... 10

Tabel 2.2. Sifat Fisik Alumunium 10

Tabel 2.3. Sifat Mekanik Alumunium 10

Tabel 2.4 Pemrograman Pengujian Kekerasan Brinnel. 20

Tabel 3.1 Parameter Percobaan Untuk Eksperimen..... 44

Tabel 3.2 Desain Parameter Percobaan..... 45

Tabel 4.1 Komposisi Kimia Aluminium AA 5052 dan Aluminium AA6061..... 47

Tabel 4.2 Sifat Mekanis Material Logam Induk. 48

Tabel 4.3 Hasil Pengukuran Temperatur Pengelasan 59

Tabel 4.4 Nilai Kekerasan (HB) Hasil Pengelasan Dissimilar FSW Material Alumunium AA 5052 dan AA 6061 Untuk *Tool* 1 (*Pin Shoulder* Silinder) 62

Tabel 4.5 Nilai Kekerasan (HB) Hasil Pengelasan Dissimilar FSW Material Alumunium AA 5052 dan AA 6061 Untuk *Tool* 2 (*Pin Shoulder* Ulir)..... 64

Tabel 4.6 Nilai Kekerasan (HB) Hasil Pengelasan Dissimilar FSW Material Alumunium AA 5052 dan AA 6061 Untuk *Tool* 3 (*Pin Shoulder* Segitiga). 66

Tabel 4.7 Hasil Pengujian Tarik Spesimen Hasil Pengelasan FSW Alumunium AA 5052 dan Aluminium AA 6061 Untuk *Tool 1* (PS: Silinder). 79

Tabel 4.8 Hasil Pengujian Tarik Spesimen Hasil Pengelasan Fsw Alumunium Aa 5052 dan Aluminium Aa6061 Untuk *Tool* 2 (Ps.Segi Tiga). 80
Tabel 4.9 Hasil Pengujian Tarik Spesimen Hasil Pengelasan Fsw Alumunium Aa 5052 dan Aluminium Aa 6061 Untuk *Tool* 3 (Ps.Ulir). 81
Tabel 4.10 Persantase Kekuatan Tarik Rata-Rata Spesimen Hasil Las Fsw Terhadap Kekuatan Tarik Logam Induk. 82
Tabel 4.11 Kekuatan Lentur Dan Kondisi Sisi Lengkungan Hasil Uji Lentur (*Face Bend*) Hasil Pengelasan Dissimilar Fsw Aluminium Aa 5052 dan Aa6061 Untuk *Tool* 1 (Ps. Silinder). 95
Tabel 4.12 Kekuatan Lentur Dan Kondisi Sisi Lengkungan Hasil Uji Lentur (*Face Bend*) Hasil Pengelasan Dissimilar Fsw Aluminium Aa 5052 dan Aa6061 Untuk *Tool* 2 (Ps. Segi Tiga). 95
Tabel 4.13 Kekuatan Lentur Dan Kondisi Sisi Lengkungan Hasil Uji Lentur (*Face Bend*) Hasil Pengelasan Dissimilar Fsw Aluminium Aa 5052 dan Aa6061 Untuk *Tool* 3 (Ps. Ulir). 96
Tabel 4.14 Persentase Kekuatan Lentur Rata-Rata Spesimen Hasil Las Fsw Terhadap Kekuatan Lentur Logam Induk. 96
Tabel 4.15 Kekuatan Lentur Dan Kondisi Sisi Lengkungan Hasil Uji Lentur (*Root Bend*) Hasil Pengelasan Dissimilar Fsw Alumunium Aa5052 dan Aluminium Aa6061 Untuk *Tool* 1 (Ps. Silinder). 102
Tabel 4.16 Kekuatan Lentur Dan Kondisi Sisi Lengkungan Hasil Uji Lentur (*Root Bend*) Hasil Pengelasan Dissimilar Fsw Alumunium Aa5052 Dan Aluminium Aa6061 6061 Untuk *Tool* 2 (Ps. Segi Tiga). 102
Tabel 4.17 Kekuatan Lentur dan Kondisi Sisi Lengkungan Hasil Uji Lentur (*Root Bend*) Hasil Pengelasan Dissimilar Fsw Alumunium Aa5052 Dan Aluminium Aa6061 6061 Untuk *Tool* 3 (Ps. Ulir). 103

Tabel 4.18 Persentase Kekuatan Lentur Rata-Rata Spesimen Hasil Las Fsw Terhadap Ke Kuatan Lentur Logam Induk *(Root Bend)*..... 103
Tabel 4.19 Ukuran Butir Mikrostruktur Hasil Pengelasan Dissimilar Fsw Aluminium Aa5052 Dan Aluminium Aa6061 Untuk Kualitas Sambungan Terbaik Setiap Bentuk Pin Shoulder..... 111
Tabel 4.20 Sifat Mekanis Dan Mikrostruktur Sambungan Dissimilar Hasil Pengelasan Fsw Aluminium Aa 5052 Dan Aa 6061..... 115

POLITEKNIK NEGERI UJUNG PANDANG

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data uji kekerasan Las FSW *Tool* 1 140

Lampiran 2. Data uji kekerasan las FSW *Tool* 2 141

Lampiran 3. Data uji kekerasan las FSW *Tool* 3 142

Lampiran 4. Data Uji Kekuatan Tarik Logam Induk Aluminium AA6061 143

Lampiran 5. Data Uji Kekuatan Tarik Logam Induk Aluminium AA5051 144

Lampiran 6. Data Uji Kekuatan Tarik *Pin* Silinder 145

Lampiran 7. Data Uji Kekuatan Tarik *Pin* Segitiga 146

Lampiran 8. Data Uji Kekuatan Tarik *Pin* Ulir 147

Lampiran 9. Data Uji Kekuatan Tekuk *Pin* Silinder 148

Lampiran 10. Data Uji Kekuatan Tekuk *Pin* Segitiga 149

Lampiran 11. Data Uji Kekuatan Tekuk *Pin* Ulir 150

Lampiran 12. Data Uji Kekuatan Tekuk Aluminium Induk 151

Lampiran 13. Foto – Foto Kegiatan 152

Lampiran 14. Hasil Foto Makro Pengelasan Dissimilar FSW 156

Lampiran 15. Hasil Pengelasan Dissimilar FSW 162

Lampiran 16. Sampel Pengujian 168

Lampiran 17. Hasil Sampel Pengujian 174

Lampiran 18. Sertifikat Material Aluminium AA 5052..... 180

Lampiran 19. Hasil Pengelasan Dissimilar FSW..... 181

Lampiran 20. Hasil Foto Mikrostruktur..... 182

Lampiran 21. Grafik uji tarik specimen hasil pengelasan FSW
Aluminium AA 6061 dan Aluminium AA 5052..... 184

Lampiran 22. Lembar Asistensi..... 190

POLITEKNIK NEGERI
UJUNG PANDANG

SURAT PERNYATAAN

Kami yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Fauzan Adzima A. (44314001)

Abd. Rahim (44314011)

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa segala pernyataan dalam skripsi ini yang berjudul **"Analisis Sifat Mekanis Dan Mikrostruktur Pada Sambungan Pengelasan Dissimilar Friction Stir Welding (FSW) Aluminium AA 6061 Dengan Aluminium AA 5052 "** merupakan gagasan dan hasil karya kami sendiri dengan arahan komisi pembimbing dan belum pernah diajukan dalam bentuk apa pun pada perguruan tinggi dan instansi mana pun.

Semua data dan informasi yang digunakan telah dinyatakan secara jelas dan dapat diperiksa kebenarannya. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya penulis lain telah disebutkan dalam naskah dan dicantumkan dalam skripsi ini.

Jika pernyataan kami tersebut di atas tidak benar, saya siap menanggung risiko yang ditetapkan oleh Politeknik Negeri Ujung Pandang.

Makassar, Agustus 2018

Penulis I

Penulis II

Fauzan Adzima A.
Nim.44314001

Abd. Rahim
Nim. 44314

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Friction Stir Welding (FSW) / Pengelasan adukan gesek merupakan metode pengelasan yang modern dan ramah lingkungan dengan proses yang digunakan untuk menyatukan dua material ringan, terutama Aluminium (rajkumar,2013). Prinsip metode FSW *(Friction Stir Welding)* adalah metode penyambungan dua buah material logam yang dihasilkan dari perubahan energi mekanik kedalam energi panas pada bidang permukaan benda kerja akibat adanya gerak putar kebawah (tekanan) sehingga mengakibakan gesekan (kalpakjian, 2001). Pada pengelasan gesek menghasilkan penyambungan yang baik, namun karena penyambungan ini melibatkan kombinasi temperature siap tempa sehingga berdampak terbentuknya deformasi plastis (upset) diseputar sambungan. Besar kecilnya deformasi plastis ini mengindikasikan kondisi pengelasan, dan hal ini juga akan mempengaruhi kualitas sambungan (Mumin Sahin, 2004).

Metode *Friction Stir Welding* bisa digunakan untuk pengelasan penyambungan logam padat yang sejenis (similar) atau tidak sejenis (dissimilar) seperti aluminium dengan aluminium, baja dengan baja tahan karat (Anwarie dkk, 2015). Pengelasan tidak sejenis (dissimilar) dianggap sebagai tantangan bila dibandingkan dengan proses pengelasan sejenis, karena variasi komposisi kimia dan sifat mekanik bahan dasarnya. Pengelasan dari aluminium yang berbeda sangat tidak mudah sehingga

proses FSW yang banyak digunakan untuk pengelasan material yang berbeda (dissimilar) (Heidarzadeh dkk, 2012). Dengan demikian FSW adalah proses pengelasan yang sangat dinantikan untuk menggabungkan dua material yang berbeda ,sehingga proses ini mempunyai kecocokan untuk diterapkan dalam industry (Li Y dkk, 1999). Sejak tahun 1999 NASA menggunakan proses *Friction Stir Welding (FSW)* untuk menyambung tangki bahan bakar luar yang merupakan aplikasi pertama di bidang penerbangan (Blignault, C dkk , 2008).

Beberapa keuntungan dari *Friction Stir Welding* ini adalah penghematan material dan waktu penyambungan dua material yang sama maupun berbeda (Spinler, 1994). Pengelasan berbeda material banyak di terapkan diberbagai sektor industri seperti industri listrik, industri kimia, industri nuklir, industri pesawat terbang, dan petrokimia, karena manfaat sifat individu diperoleh (Kush P. Mehta, 2016). Parameter pengelasan FSW meliputi kecepatan putaran, kemiringan tool, feed rate, penetrasi shoulder, penetrasi pin, bentuk dan dimensi pin, bentuk dan dimensi shoulder, material tool,dll (Haqqi dan Setyawan,2012).

Pada penelitian ini jenis material yang akan digunakan adalah aluminium AA 6061 dan aluminium AA 5052. Menurut (Rajkumar.V, 2014) yang telah melakukan penelitian tentang pengelasan sambungan material berbeda (dissimilar) Aluminium alloys AA 5052 dengan AA 6061 dengan parameter pin silinder ulir, kecepatan konstan 710 rpm, dan variasi fiding 28 mm/min dan 20 mm/min, bahwa nilai kekerasan akan menurun pada sambungan Aluminium alloys AA 6061 dibandingkan

dengan Aluminium alloys AA 5052, namun akan mendapatkan hasil yang terbaik dengan fiding 20 mm/min dengan pin silinder ulir.

Meskipun penelitian yang membahas tentang pengelasan sambungan dissimilar proses FSW (*Friction Stir Welding)* Aluminium alloys AA 5052 dan Aluminium alloys AA 6061 sudah ada, namun kami ingin mengangkat topik yang sama namun dengan parameter yang bervariasi. Parameter dalam penelitian ini yaitu variasi tools (*tool* dengan *pin shoulder* bentuk segi tiga, *tool* dengan *pin shoulder* bentuk silinder ulir, tool bentuk *pin shoulder* silinder, variasi kecepatan serta variasi feeding., Berdasarkan latar belakang diatas maka kami menganggap perlu untuk melakukan penelitian agar proses penyambungan material berbeda jenis (dissimilar) antara aluminium AA 5052 dan aluminium AA 6061 menjadi lebih efisien dan menjadi metode penyambungan material berbeda (dissimilar) sesuai dengan kebutuhan industri. Maka dalam kesempatan ini kami akan mengangkat sebagai judul tugas akhir kami yang berjudul. **"Analisis Sifat Mekanis Dan Mikrostruktur Pada Sambungan Pengelasan Dissimilar Friction Stir Welding (Fsw) Aluminium AA 6061 Dengan Aluminium AA 5052 "**

1.2 Rumusan Masalah

Mengetahui pengaruh sambungan pengelasan dissimilar Friction Stir Welding (FSW) sambungan Aluminium AA 5052 dengan Aluminium AA 6061 terhadap sifat mekanis dan mikrostruktur .

1.3 Batasan masalah

Adapun batasan masalah penelitian ini ialah :

1. Pengelasan friction stir welding menggunakan dua jenis aluminium yaitu aluminium AA 5052 dan aluminium AA 6061.
2. Menggunakan tiga bentuk pin shoulder yaitu silinder ulir , segitiga, dan silinder.
3. Material pin yang dapat digunakan pada penelitian ini EMS 45.
4. Putaran yang digunakan dalam penelitian ini ialah 1300 Rpm, 1950 Rpm, dan 2850 Rpm.
5. Feed rate yang digunakan pada penelitian ini yaitu 43 mm/min, 130 mm/min, 240 mm/min.

1.4 Tujuan penelitian

Mengetahui pengaruh pengelasan dissimilar Friction Stir Welding (FSW) sambungan Aluminium AA 5052 dengan Aluminium AA 6061 terhadap sifat mekanis dan mikrostruktur.

1.5 Manfaat penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini antara lain :

1. Menerapkan dan mengembangkan ilmu pengetahuan serta teknologi pada pengelasan friction stir welding untuk material aluminium paduan.
2. Memberi informasi mengenai pengelasan material aluminium paduan berbeda jenis (dissimilar) pada proses pengelasan friction stir welding.

3. Menjadi sumber referensi mengenai sifat mekanis dan mikrostruktur pada metode pengelasan friction stir welding dalam dunia industri dan institusi pendidikan.

POLITEKNIK NEGERI UJUNG PANDANG

BAB II

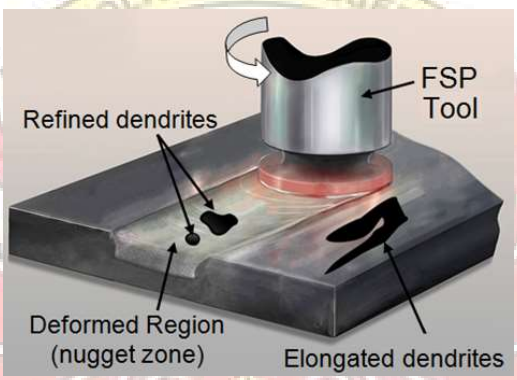
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengelasan *Frictrion Stir Welding* (FSW)

Friction Stir Welding (FSW) adalah proses penyambungan material dengan kondisi solid dengan kata lain logam tidak meleleh saat dilakukan penyambungan pada material. Metode FSW diterapkan agar karakteristik dari logam induk tidak banyak berubah, proses ini banyak digunakan pada material aluminium murni atau aluminium paduan (Andri, 2012). Dalam FSW, tool berputar dan bergerak pada kecepatan konstan yang menyentuh material sepanjang jalur pada sambungan pengelasan dua material yang akan dilas. material harus dicekam dengan menggunakan ragum yang disesuaikan bentuk material agar dapat mempertahankan posisi material saat terjadi gaya gesek pada proses pengelasan (Deden rahayui, 2012).

Dalam metode ini pin yang dig unakan harus memiliki tingkat kekerasan yang lebih tinggi dari material agar tidak ikut meleleh pada saat proses pengelasan. Factor yang mempengaruhi hasil FSW adalah *Welding Tool*, kecepatan putar, kecepatan pengelasan, dan kedalaman pembenaman. Dengan parameter proses pengelasan tersebut dapat meningkatkan kekuatan dan meminimalisir terjadinya kecacatan pada sambungan (Rajkumar dkk 2014).

Prinsip kerja FSW yaitu pin yang berputar dan dibenamkan diantara dua buah material yang akan dilas. Agar tidak mengenai dasar benda kerja ukuran pin harus lebih pendek daripada tebal plat yang akan dilas. Gaya gesek yang terjadi antara tool dan benda kerja mengakibatkan panas dan melunakkan daerah sekitarnya. Dengan kondisi yang lunak ini maka tool dapat digerakkan disepanjang jalur pengelasan sehingga terjadi proses pengelasan. (Dimas prasetya , 2016).

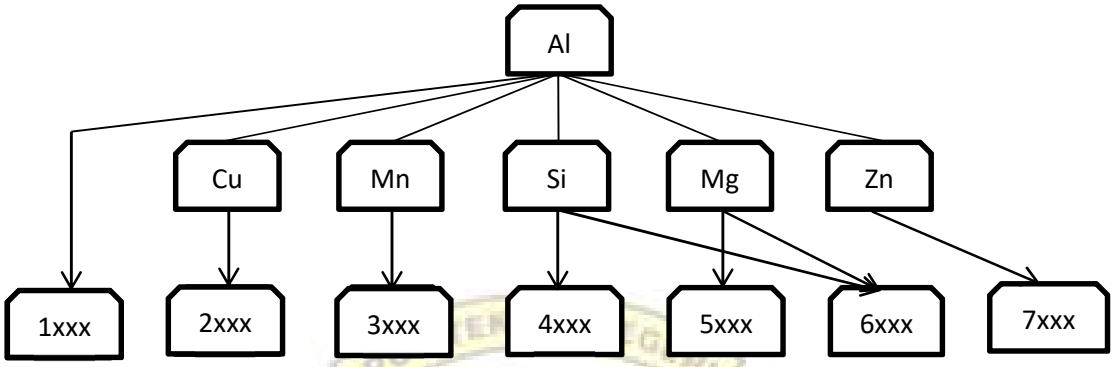


Gambar 2.1 Skema pengelasan FSW

2.2 Aluminium dan paduannya

Aluminium merupakan salah satu jenis logam yang ringan dan memiliki sifat mekanik dan sifat fisik yang baik untuk konstruksi seperti kekuatan tarik, ringan, dan tahan korosi. Aluminium murni relative lunak, dengan adanya penambahan unsur pada aluminium murni dapat meningkatkan sifat mekanisnya. Temperatur rekristalisasi aluminium adalah 150°C (Iskandar, 2011). Material aluminium dikelompokkan berdasarkan jenis paduannya dengan menggunakan system 4 digit angka dimana digit pertama menunjukkan kelompok aluminium, digit kedua

menunjukkan modifikasi dari aluminium aslinya dan dua digit terakhir menunjukkan kemur nian aluminium.



Gambar 2.2 klasifikasi aluminium dan paduannya

Pada klasifikasi Aluminium dan paduannya memiliki jenis yang dapat diperlakukan panas dan ada jenis yang tidak dapat diperlakukan panas. Berdasarkan penggunaannya aluminium dan paduannya memiliiki sifat-sifat sebagai berikut :

- Seri 1xxx (Al murni) merupakan aluminium murni dan bahan ini memiliki sifat yang tahan karat, tidak dapat diperlakukan panas, dan konduksi panas/listrik, sifat mampu mesin
- Seri 2xxx (Al-Cu) merupakan aluminium paduan dengan kandungan unsur Cu (tembaga) memiliki sifat daya tahan rendah terhadap korosi, sifat mampu las yang kurang baik, dan dapat diperlakukan panas
- Seri 3xxx (Al-Mn) merupakan aluminium paduan dengan kandungan unsur Mn (mangan) memilik sifat tahan korosi,tidak dapat diperlakukan panas, sifat

mampu mesin sama seperti aluminium murni, jenis ini biasanya digunakan untuk peralatan dapur dan panel

- Seri 4xxx (Al-Si) merupakan aluminium paduan yang memiki unsur Si (silicon) jenis ini memiliki sifat yang tidak dapat diperlakukan panas dan dalam keadaan cair memiliki sifat alir yang baik
- Seri 5xxx (Al-Mg) merupaka aluminium paduan yang memiliki unsur Mg (magnesium), jenis ini dapat digunakan sebagai material konstruksi namun tidak dapat diperlakukan panas, memiliki sifat tahan korosi dan mampu las yang baik.
- Seri 6xxx (Al-Mg-Si) merupakan aluminium paduan yang memiliki kandungan unsur Mg (magnesium) dan Si (silicon), jenis ini memiliki sifat mampu las yang baik dan dapat diperlakukan panas, sifat mampu potong yang baik, tahan terhadap korosi
- Seri 7xxx (Al-Zn) merupakan aluminium paduan yang memiliki kandungan unsur Zn (seng), memiliki sifat yang dapat diperlakukan panas, sifat mampu las yang baik

Tabel 2.1. Komposisi kimia Alumunium dan paduannya

Unsur	Presentase (%)
Silicon (Si)	8.5-11
Besi (Fe)	Max 0.85
Mangan Mn)	Max 0.3
Magnesium Mg)	Max 0.25
Seng (Zn)	Max 1
Tembaga Cu)	1-1.25

Tabel 2.2. Sifat fisik Alumunium

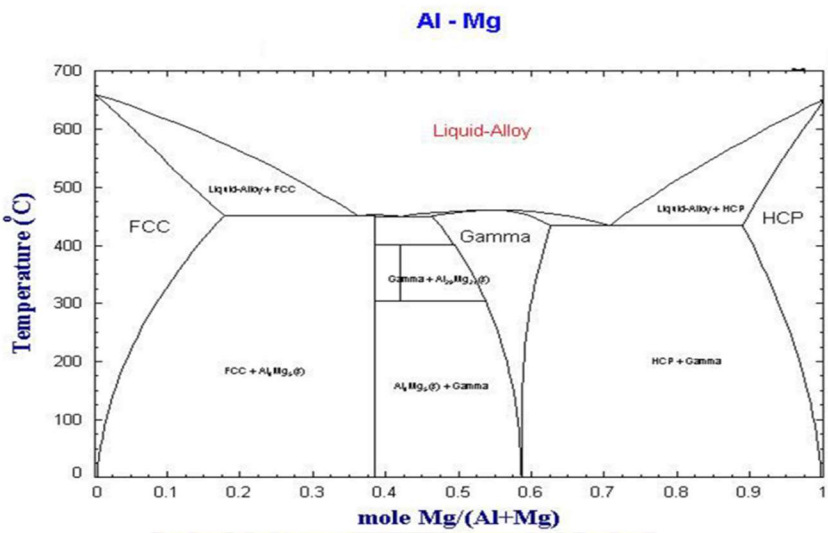
Massa jenis	2,70 gram/cm^3
Massa jenis pada wujud cair	2,375 gram/cm^3
Titik lebur	933,47 K, 660,32 ^{o}C, 1220,58 ^{oF}
Titik didih	2792 K, 2519 ^{o}C, 4566 ^{o}F
Kalor jenis (25 ^{o}C)	24,2 J/mol K
Resistansi listrik (20 ^{o}C)	28.2 nΩ m
Konduktivitas termal (300 K)	237 W/m K
Pemuaian termal (25 ^{o}C)	23.1 µm/m K
Modulus Young	70 Gpa
Modulus geser	26 Gpa
Poisson ratio	0,35
Kekerasan skala Mohs	2,75
Kekerasan skala Vickers	167 Mpa
Kekerasan skala Brinnel	245 Mpa

Table 2.3. Sifat mekanik Alumunium

Sifat	99,996% Al	>99% Al
Kekuatan tarik (kg/mm^2)	4.9	9.3
Kekuatan mulur (kg/mm^2)	1.3	3.5
Perpanjangan (%)	48.8	35
Kekerasan Brinnel	17	23

2.2.1. Paduan Aluminium AA 5052 (Al-Mg)

Keberadaan Magnesium hingga 15,35% dapat menurunkan titik lebur logam paduan yang cukup drastis, dari 660°C hingga 450°C. Namun, hal ini tidak menjadikan Aluminium paduan dapat ditempa menggunakan panas dengan mudah karena korosi akan terjadi pada suhu di atas 60°C. Keberadaan Magnesium juga menjadikan logam paduan dapat bekerja dengan baik pada temperatur yang sangat rendah, di mana kebanyakan logam akan mengalami *failure* pada temperatur tersebut. Gambar diagram fasa Aluminium-Magnesium dapat dilihat pada gambar di bawah ini:

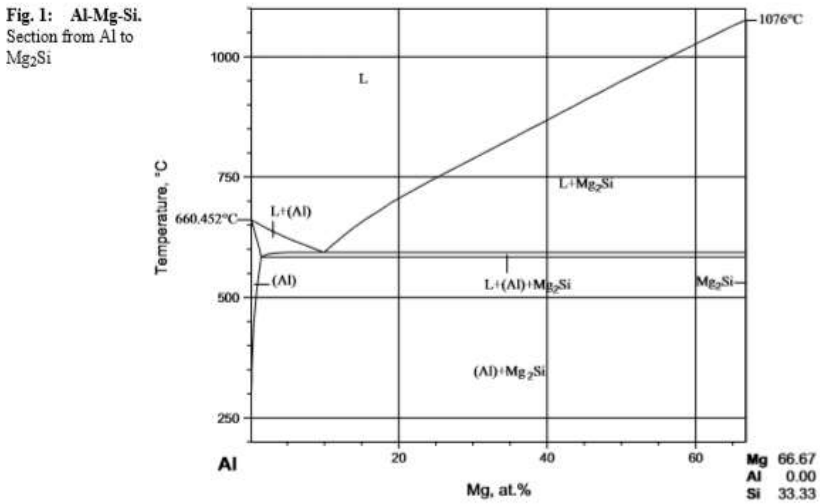


Gambar 2.3 Diagram Fasa Aluminium AA 5052

2.2.2. Paduan Aluminium AA 6061 (Al-Mg-Si)

Paduan dalam system ini mempunyai kekuatan kurang sebagai bahan tempaan dibandingkan dengan paduan-paduan lainnya, tetapi sangat liat, sangat baik mampu bentuknya untuk penempaan dan sangat baik untuk mampu bentuk yang tinggi. Mempunyai mampu bentuk yang baik pada ekstruksi dan tahan korosi, dan sebagai

tambahan dapat diperkuat dengan perlakuan panas setelah pengerjaan. Karena paduan ini mempunyai kekuatan yang cukup baik tanpa mengurai hantaran listrik maka dipergunakan untuk kabel tenaga. Adapun diagram fasa paduan Al-Mg-Si yaitu sebagai berikut (Kumar, 2005):



Gambar 2.4. Diagram fasa Aluminium AA 6061

2.3 Sifat Mekanik Bahan

Sifat mekanik bahan adalah hubungan antara respon atau deformasi bahan terhadap beban yang bekerja. Sifat mekanik bahan berkaitan dengan kekuatan, kekerasan, keuletan, ketangguhan, dan kekakuan. Beberapa definisi dari komponen sifat mekanis bahan sbb:

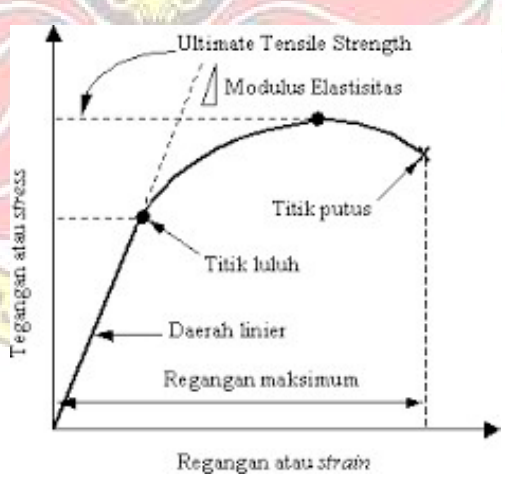
- Kekuatan merupakan ketahanan suatu bahan terhadap perubahan bentuk
- Kekerasan merupakan tahanan bahan terhadap desakan benda lain
- Keuletan merupakan kemampuan bahan untuk berubah bentuk dalam skala yang cukup besar sebelum pecah akibat pembebanan

- Ketangguhan kemampuan suatu bahan untuk menyerap energi tumbukan pada saat diberikan suatu pembebanan kejut

Sifat mekanis bahan dapat diperoleh dengan melakukan suatu pengujian. Pengujian yang dilakukan termasuk dalam pengujian merusak atau destructive test pada bahan. Beberapa proses pengujian tersebut antara lain pengujian tarik, pengujian *bending*, dan pengujian kekerasan.

2.3.1 Pengujian Tarik

Uji tarik adalah salah satu pengujian bahan yang bertujuan untuk mengetahui kekuatan bahan terhadap gaya tarik. Dalam pengujiannya, bahan uji ditarik sampai putus. Hasil dari pengujian ini berupa nilai tegangan dan regangan yang digambarkan dalam sebuah kurva uji tarik.



Gambar 2.5. Kurva uji tarik

Beberapa parameter yang didapatkan dalam kurva uji tarik tersebut antara lain:

- ***Kekuatan tarik maksimum***, adalah nilai tegangan maksimum yang

bekerja pada bahan saat putus. Niali tegangan tarik maksimum dapat diperoleh dengan persamaan:

$$\sigma u = \frac{Fu}{Ao} \quad \text{.....(2.1)}$$

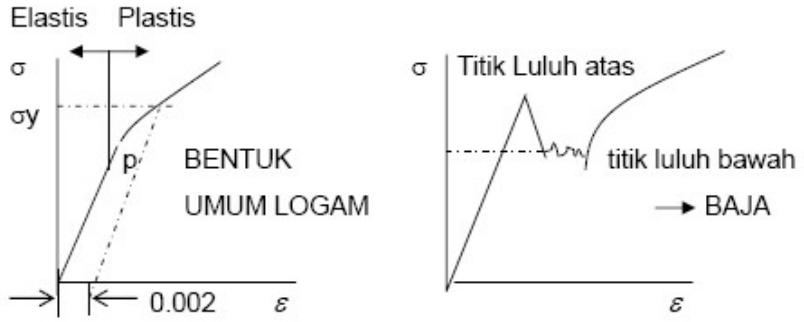
Dimana:

σ_u = Kekuatan tarik maksimum (N/mm^2)

F_u = Beban maksimum (N)

A_0 = Luas penampang mula-mula (mm^2)

- ***Kekuatan luluh***, adalah nilai tegangan yang bekerja pada bahan yang menyebabkan bahan mulai luluh atau mengalami deformasi secara plastis. Pada bahan tertentu seperti baja daerah tegangan luluh dapat ditunjukkan dalam sebuah kurva uji tarik dan nilainya dapat diperoleh dengan sebuah persamaan.



Gambar 2.6. Titik luluh pada kurva uji tarik

Persamaan kekuatan luluh:

$$\sigma y = \frac{Fy}{Ao} \quad \text{.....(2.2)}$$

Dimana:

σ_y = Kekuatan luluh (N/mm^2)

F_y = Beban luluh (N)

A_0 = Luas penampang mula-mula (mm^2)

- ***Regangan***, adalah nilai yang menunjukkan perbandingan antara pertambahan panjang benda saat diuji dengan panjang awal bahan. Nilai ini jika di persenkan diperoleh nilai yang disebut *elongation.* Regangan suatu bahan dapat diperoleh dengan persamaan

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{Lo} \quad \text{.....(2.3)}$$

Dimana:

ε = Regangan

L_1 = Panjang setelah diberi beban (mm)

L_0 = Panjang mula-mula (mm)

- ***Reduction Area,*** adalah presentase pengurangan luas penampang benda uji. Nilai reduction area dapat diperoleh dengan persamaan

$$r = \frac{Ao - A}{Ao}\ x\ 100\% \quad \text{.....(2.4)}$$

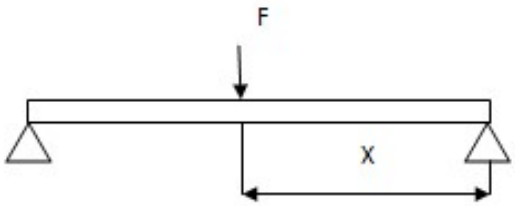
Dimana: *r* = Reduksi penampang (%)

A_0 = Luas penampang mula-mula (mm^2)

A_1 = Luas penampang akhir (mm^2)

2.3.2 Pengujian Tekuk

(Zainuri ,2008) kekuatan tekuk bahan adalah kemampuan suatu bahan menahan beban radial yang menyebabkan lenturan atau tekukan. Beban radial bekerja selalu tegak lurus terhadap arah sumbu. Kekuatan tekuk bahan merupakan nilai tegangan dalam sebuah bahan. Momen tekuk yang bekerja pada suatu bahan dapat menyebabkan tegangan tekuk pada bahan tersebut.



Gambar 2.7. Momen bending pada bahan

Momen tekuk didapatkan dengan mengalikan gaya radial dengan jarak. Persamaan momen tekuk yang digunakan ialah, Mb = F.x, dimana F adalah gaya (N), dan x adalah jarak (m) dari tumpuan. Dari persamaan tersebut didapatkan persamaan untuk tegangan tekuk:

$$\sigma b = \frac{M\,.y}{i} \quad \text{.....(2.5)}$$

Dimana, σb = Tegangan tekuk ($\frac{N}{mm^2}$)

M = Momen *bending* (N.mm)

y = titikt ekuk (mm)

i = Momen inersia penampan g (mm^4)

Kekuatan tekuk suatu bahan dapat diperoleh dalam suatu pengujian tekuk. Pengujian ini merupakan salah satu pengujian yang digunakan untuk mengukur kekuatan material akibat pembebanan dan kekenyalan hasil sambungan las baik di *weld metal* maupun daerah *Hot affactet Zone* (HAZ). Ada beberapa factor yang harus diperhatikan dalam pengujian tekuk, yaitu:

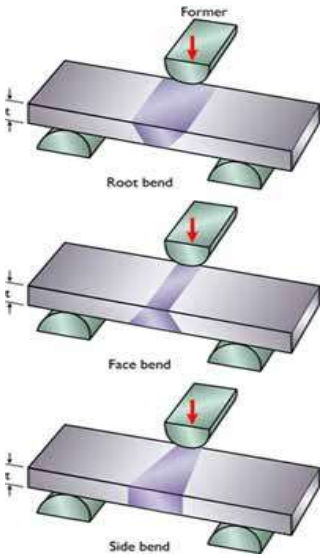
1. Kekuatan tarik
2. Komposisi kimia dan struktur mikro bahan
3. Tegangan luluh

Beberapa macam metode yang terdapat di pengujian tekuk bahan antara lain sebagai berikut:

a. Tranversal *Bending*

Pada transversal *bending* ini, pengambilan spesimen tegak lurus dengan arah pengelasan. Berdasarkan arah pembebanan dan lokasi pengamatan, pengujian transversal bending dibagi menjadi tiga:

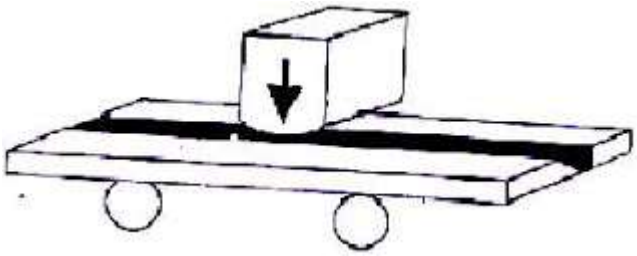
1. *Face bend* (bending permukaan las)
2. *Root bend* (bending pada akar las)
3. *Side bend* (bending pada sisi las)



Gambar 2.8. Bending

b. Longiitudinal *Bending*

Pada longitudinal *bending* ini, pengambilan spesimen searah dengan arah pengelasan berdasarkan arah pembebanan dan lokasi pengamatan.

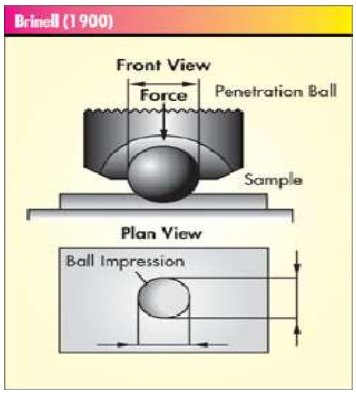


Gambar 2.9. Longitudinal *Bending*

2.3.3 Pengujian Kekerasan

Kekerasan adalah tahanan suatu material terhadap penetrasi atau penekanan benda lain yang lebih keras. Pada umumnya terdapat tiga metode yang digunakan dalam penentuan kekerasan bahan yaitu metode goresan *(sratch test)*, dinamik *(dynamic test)*, dan tekanan *(indentation test)*. Adapun metode penekanan yang sering digunakan dalam pengujian antara lain: metode Vickers, Brinnel, dan Rockwell, sementara metode yang sering digunakan dalam pengujian bahan aluminium adalah Hard Brinnel (HB). Metoda uji kekerasan ini di ajukan oleh J.A Brinell pada tahun 1900an yang merupakan uji kekerasan lekukan yang pertama yang digunakan dan di susun pembakuannya. Uji kekerasan ini berupa pembentukan lekukan pada permukaan logam menggunakan indentor. Indentor untuk brinell berbentuk bola dengan diameter 10 mm, diameter 5 mm, diameter 2,5 mm, dan diameter 1 mm, itu semua adalah diameter bola standar internasional.

Bola Brinell yang standar internasional tersebut ada dua bahan pembuatannya. Ada yang terbuat dari baja yang di keraskan/dilapis chrom, dan ada juga yang terbuat dari *tungsten carbide*. *Tungsten carbide* lebih keras dari baja, jadi *tungsten carbide* biasanya dipakai untuk pengujian benda yang keras yang dikhawatirkan akan merusak bola baja.



Gambar 2.10 . Pengujian Brinnel

Tabel 2.4. Pemrograman pengujian kekerasan Brinnel

HBT 5(1)	Brinell	HBTW 5	Ball Ø 5 mm	10	125	1226,25	Light alloy, bronze copper
HBT 5(2)	Brinell	HBTW 5	Ball Ø 2,5 mm	10	31,25	306,54	Light alloy, bronze copper
HBT10(1)	Brinell	HBTW 10	Ball Ø 2,5 mm	10	62,5	613,12	Light alloy, bronze copper
HBT30(1)	Brinell	HBTWc 30	Ball Ø 2,5 mm	10	187,5	1839,37	Cast Iron
HBT30(2)	Brinell	HBTWcs	Ball Ø 2,5 mm	10	187,5	1839,37	Carbon steel
HBT30(3)	Brinell	30	Ball Ø 2,5 mm	10	187,5	1839,37	Steel
HV30<HRA	Rockwell-Vickers	HBTWs 30 HV30~HRA	Diamond 120°	10	60	588.6	Cemented steel > 0,7 mm

Sumber: *Manual book Instruction for use Affri Hardness Tester Series 206 MX*

2.4. Mikrostruktur

Metalografi merupakan suatu ilmu atau metode yang digunakan dalam menyelidiki dan mengamati struktur material logam, paduan logam, dan material lainnya dengan menggunakan mikroskop optis ataupun mikroskop elektron. Adapun struktur logam yang terlihat pada mikroskop tersebut disebut struktur mikro. Pengamatan ini dilakukan terhadap spesimen yang telah diproses sedemikian rupa sehingga bisa diamati dengan pembesaran tertentu pada mikroskop. Adapun hal-hal

yang terdapat pada material yang diamati, seperti fasa, butir, komposisi kimia, orientasi butir, jarak atom, dislokasi, topografi, partikel dan sebagainya.

Secara garis besar tahapan metalografi yang dilakukan meliputi :

2.4.1 Pemotongan (Cutting)

Proses Pemotongan merupakan pemindahan material logam dari sampel yang besar menjadi spesimen dengan ukuran yang kecil. Pemotongan yang keliru akan mengakibatkan diperoleh struktur mikro yang tidak sebenarnya karena telah mengalami perubahan.

2.4.2 Pembingkaian (Mounting)

Mounting diperlukan pada persiapan spesimen metalografi untuk bentuk yang kecil atau tidak beraturan yang dibingkai guna untuk memudahkan dalam memegang spesimen pada saat proses pngamplasan dan pemolesan. Bingkai haruslah memiliki kekerasan yang cukup dan tahan terhadap distorsi fisik yang disebabkan oleh panas selama pengamplasan, selain itu juga harus dapat melakukan penetrasi ke dalam lubang yang kecil dan bentuk permukaan yang tidak beraturan. Bahan yang biasanya digunakan untuk pembingkaian spesimen adalah resin katalis.

2.4.3 Pengamplasan dan Pemolesan

Pada proses ini dilakukan penggunaan partikel abrasif yang disatukan dalam lembar kertas yang kita kenal sebagai kertas ampelas. Pengamplasan adalah proses untuk mereduksi permukaan spesimen dengan pergerakan permukaan abrasif yang bergerak kontinyu sehingga mengikis permukaan spesimen yang digosok. Dari proses

pengamplasan yang didapat adalah permukaan yang relatif lebih halus atau goresan yang seragam pada permukaan spesimen.

Proses pemolesan menggunakan lembar kain beludru untuk menciptakan permukaan yang sangat halus dan mengkilap seperti kaca sehingga dapat memantulkan cahaya dengan baik. Pada pemolesan biasanya digunakan pasta gigi, karena pasta gigi mengandung Zn dan Ca yang akan dapat mengasilkan permukaan yang sangat halus dan mengkilap.

2.4.4 Pengetsaan (Etching)

Etsa dilakukan dalam proses metalografi untuk melihat dan mengamati struktur mikro dari sebuah spesimen logam dengan menggunakan mikroskop optic atau elektron. Spesimen yang cocok untuk proses etsa harus mencakup daerah poles dengan hati-hati yang bebas dari deformasi plastis karena deformasi plastis akan mengubah struktur mikro spesimen tersebut. Proses etsa untuk mendapatkan mikro struktur kontras suatu spesimen secara jelas pada permukaan spesimen yang telah di poles.

2.5 Analisis Statistik (ANOVA, Korelasi dan Regresi)

2.5.1 Analisis varian (ANOVA)

Analisis Varians *(Analysis of Variance)*, merupakan sebuah teknik inferensial yang digunakan untuk menguji perbedaan rerata nilai. Sebagai sebuah teknik analisis varians atau yang seringkali disebut dengan anava saja mempunyai banyak

keuntungan. *Pertama, a*nova dapat digunakan untuk menentukan apakah rerata nilai dari dua atau lebih sampel berbeda secara signifikan atau.

Kedua, perhitungan anova juga menghasilkan harga F yang secara signifikan menunjukkan kepada peneliti bahwa sampel yang diteliti berasal dari populasi yang berbeda, walaupun anova tidak dapat menunjukkan secara rinci yang manakah di antara rerata nilai dari sampel-sampel tersebut yang berbeda secara signifikan satu sama lain. Uji T lah yang dapat menyempurnakan ini.

Ketiga, anova juga dapat digunakan untuk menganalisis data yang dihasilkan dengan desain *factorial* jamak. Dalam desain *factorial* yang menghasilkan harga F ganda, anova dapat menyelesaikan tugas sekaligus. Dengan anava inilah peneliti dapat mengetahui antarvariabel manakah yang memang mempunyai perbedaan secara signifikan, dan varibel-variabel manakah yang berinteraksi satu sama lain. Pengujian hipotesis dilakukan dalam anova yang biasa disebut *main effect.* Hipotesis yang diuji, yaitu:

H_0 : Tidak terdapat pengaruh variabel *treatment* terhadap variabel kriteria.

H_1 : Terdapat pengaruh variabel *treatment* terhadap variabel kriteria.

Kriteria pengujian:

- Terima H_0 , Jika $F_{hitung} < F_{tabel}$, dan
- Tolak H_0, jika $F_{hitung} > F_{tabel}$,

2.5.2 Analisis Korelasi

Korelasi merupakan istilah yang digunakan untuk mengukur kekuatan hubungan antar variabel. Analisis korelasi adalah cara untuk mengetahui ada atau tidak adanya hubungan antar variabel, misalnya hubungan dua variabel. Apabila terdapat hubungan antar variabel maka perubahan-perubahan yang terjadi pada salah satu variabel akan mengakibatkan terjadinya perubahan pada variabel lainnya. Dari analisis korelasi, dapat diketahui hubungan antar variabel tersebut, yaitu merupakan suatu hubungan kebetulan atau memang hubungan yang sebenarnya. Jenis statistika uji hipotesis korelasi meliputi korelasi sederhana (bivariat), korelasi ganda, dan korelasi parsial. Korelasi yang terjadi antara dua varabel (bivariat) dengan berupa korelasi positif, korelasi negatif, tidak ada korelasi, ataupun korelasi sempurna. Korelasi bivariat ini merupakan korelasi yang paling sederhana karena korelasi tersebut hanya mencari hubungan antar sua variabel dengan berbagai variasi yang ada. Untuk mengetahui tingkat keeratan linear antara kedua variabel yang nilainya dipengaruhi oleh skala atau satuan pengukuran pada X dan Y dengan menggunakan rumus **r** menghasilkan koefisien korelasi akan diperoleh kemungkinan pancaran data yang diwakilinya. Nilai korelasi berkisar antara -1 dan +1 yang menunjukkan korelasi sempurna.

2.5.3 Analisis Regresi

Setiap analisis regresi pasti ada korelasinya, tatapi analisis korelasi belum tentu dilanjutkan dengan analisis regresi. Analisis korelasi yang dilanjutkan dengan analisis regresi yaitu apabila korelasi mempunyai hubungan kausal (sebab-akibat) atau hubungan fungsional. Untuk menetapkan dua variabel mempunyai hubungan kausal atau tidak, harus didasarkan pada teori atau konsep-konsep tentang dua variabel tersebut.

Analisis regresi digunakan untuk mengetahui bagaimana pola variabel dependent (kriteria) dapat diprediksi melalui variabel independent (prediktor) dan dijelaskan dalam sebuah bentuk persamaan matematis yaitu:

$$\hat{Y} = a + bX$$

Dimana,

Y = Prediktor/variable dependent

a = konstanta (harga Y untuk X = 0)

b = angka arah (koefisien regresi)

x = variabel independent.

Hubungan a dn b dapat pula ditentukan dengan rumus;

$$b = r\frac{s_Y}{s_X} \quad dan \quad a = \overline{Y} - b\overline{X}$$

r = koefisien korelasi product moment antara variabel X dengan variabel Y

S_Y = simpangan baku variabel Y

S_X = simpangan baku variabel X

Hubungan antara a dan b dapat pula ditentukan dengan rumus;

$$b = \frac{n\sum XY - \sum Y \sum Y}{n\sum X^2 - (\sum X)^2}$$

$$a = \frac{\sum X \sum X^2 - \sum X \sum XY}{n\sum X^2 - (\sum X)^2}$$

Berdasarkan nilai a dan b tersebut, selanjutnya dapat diketahui model persamaan regresi linear $\hat{Y} = a + b$

2.5.4 Penelitian Pendahuluan

Zargar (2014) telah melakukan penelitian tentang *Friction Stir Welded Joint Aluminum Alloy H20-H20 with Different Type of Tools Mechanical Properties*. Dari penelitian ini diperoleh hasil bahwa parameter yang dapat membantu mengoptimalkan hasil las FSW adalah kecepatan putar, kedalaman pengelasan, kecepatan eretan (*feed rate*), dimensi benda kerja, jenis bahan, geometri *tool.*

Rajkumar (2014) telah melakukan penelitian tentang *Studies on effect of tool design and welding parameters on the friction stir welding of dissimilar aluminium alloys* AA 5052 – AA 6061 mendapatkan bahwa dengan parameter fiding dan bentuk pin dapat mengahasilkan pengelasan FSW yang baik.

Leon, J. dkk (2014) telah melakukan penelitian tentang *Investigation of Mechanical Properties of Aluminium 6061 Alloy Friction Stir Welding*. Dari penelitian tersebut ditemukan bahwa sambungan Aluminium 6061 *Alloy* dari proses

pengelasan FSW menghasilkan sifat kekuatan tarik yang unggul yang berdampak pada kekerasan yang lebih tinggi dan menghasilkan struktur mikro yang baik.

Nurdin dan Imran (2016) telah melakukan penelitian tentang *Sifat Mekanis Alumunium Paduan Pada Pengelasan Gesek Friction Stir Welding (FSW).* Dari penelitian tersebut dijelaskan bahwa variasi terhadap putaran, *feeding* dan diameter *shoulder* memberikan pengaruh terhadap hasil las FSW aluminium AA 5052, dan disarankan untuk melakukan penelitian lanjutan dengan variasi putaran dan *feeding* yang lebih besar serta pada bentuk *pin* dan sudut penetrasi *tool*.

BAB III

METODE PENELITIAN

Metode penelitian adalah suatu cara untuk mempertanggung jawabkan secara ilmiah pelaksanaan dan hasil penelitian. Dalam penelitian ini digunakan metode eksperimen yaitu suatu metode untuk menemukan hubungan antar dua atau lebih fakor yang berpengaruh. Eksperimen dilakukan di laboraturium dengan kondisi dan peralatan yang disesuaikan guna memperoleh data tentang pengaruh putaran tool dan feed rate terhadap sifat mekanik pengelasan FSW.

3.1 Spesifikasi Benda Uji

Spesifikasi benda uji yang digunakan dalam eksperimen ini adalah sebagai berikut:

1. Bahan yang digunakan untuk logam dasar alumunium *alloy 5*052 dengan campuran unsur magnesium (Mg) 2.2 % - 2.8 % , silicon (Si) 0.25 %, Besi (Fe) 0.40%, Tembaga (Cu) 0.10%, Seng (Zn) 0.10% dan Unsur-unsur lain 0.05%-0.15%.
2. Bahan yang digunakan untuk logam dasar alumunium *alloy 6061* dengan campuran unsur magnesium (Mg) 0.8 % - 1.2 % , silicon (Si) 0.4% - 0.8 %, Besi (Fe) 0.70%, Tembaga (Cu) 0.15%- 0.40%, Seng (Zn) 0.25% dan Unsur-unsur lain 0.05%-0.15%.

3. Bahan yang digunakan untuk *too*l ialah baja EMS 45 dengan campuran unsur 2% C, 0.2% Si, 0.3% Mn dan 11.5% Cr.

3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan di kampus Politeknik Negeri Ujung Pandang pada laboraturium pengujian bahan dan bengkel mekanik Teknik Mesin, dan lab teknik geogoli di Universitas Hasanuddin. Waktu pelaksanaan penelitian dimulai pada bulan Februari - Agustus 2018.

3.3 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut

a) Alat :

1. Mesin *Frais/milling*
2. Mesin bubut
3. Universal Testing Machine merek Galdabini PM 100
4. Affri Hardnes Tester Series 206 MX
5. Ragum
6. Kunci ring
7. Pelat pelapis
8. Kunci inggris
9. Kertas grafik

10. Spidol

11. Jangka sorong

b) Bahan:

1. Pelat alumu bnium *alloy* 6061
2. Pelat alumunium *alloy* 5052
3. Baja EMS 45

3.4 Langkah Kerja

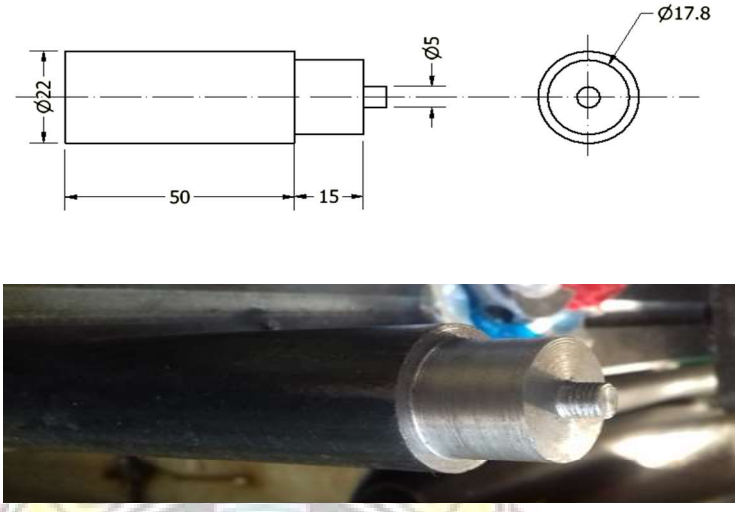
Penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahap, antara lain sebagai berikut:

1. Persiapan alat dan bahan

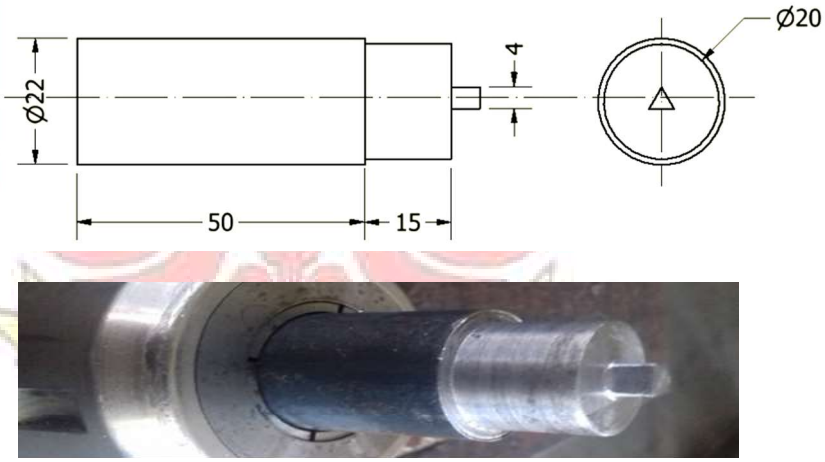
   Alat dan bahan yang disiapkan ialah sesuai yang telah disebutkan sebelumnya dalam penelitian ini.

2. Pembuatan *Tool*

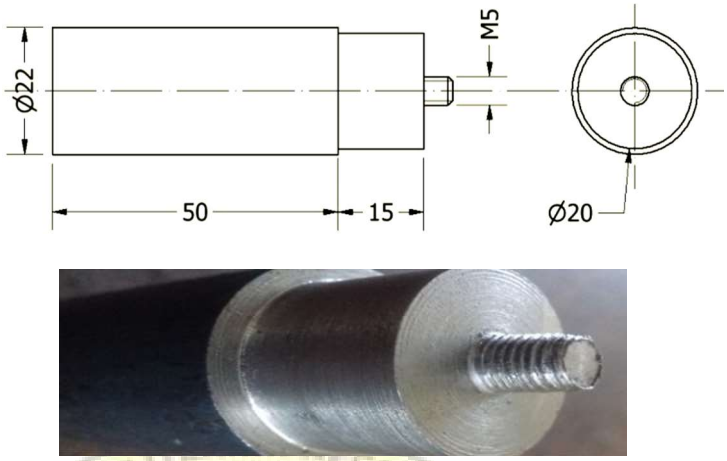
   Tool yang dibuat terdiri dari *pin*, *shoulder*, dan pemegang. *Tool* dibuat dengan beberapa variasi diameter *shoulder* dan dilakukan dengan proses pembubutan dan menggunakan kikir untuk pembentukan pin non silinder. Bentuk dan ukuran dari *tool* ditunjukkan gambar di bawah.



Gambar 3.1. Geometri dan dimensi *tool silinder*



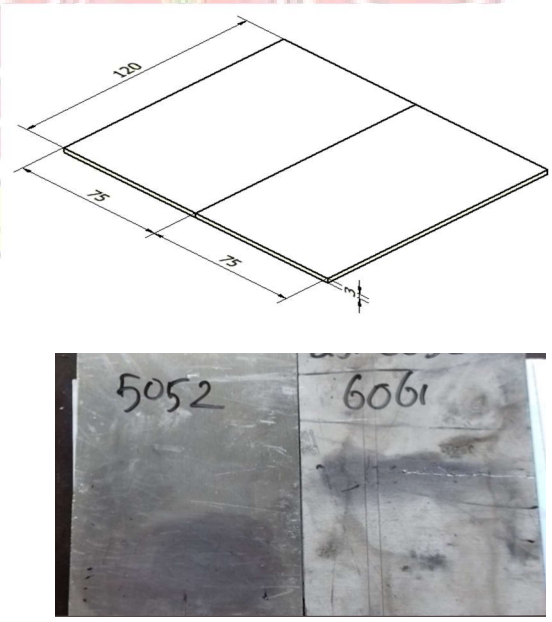
Gambar 3.2. Geometri dan dimensi *tool* Segitiga



Gambar 3.3. Geometri dan dimensi *tool silinder* ulir

3. Persiapan benda kerja las

Benda kerja yang digunakan ialah sepasang alumunium alloy *5052* dan alumunium alloy *6061* dengan bentuk dan ukuran seperti gambar berikut:



Gambar 3.4. Benda kerja las

4. Proses pengelasan benda kerja

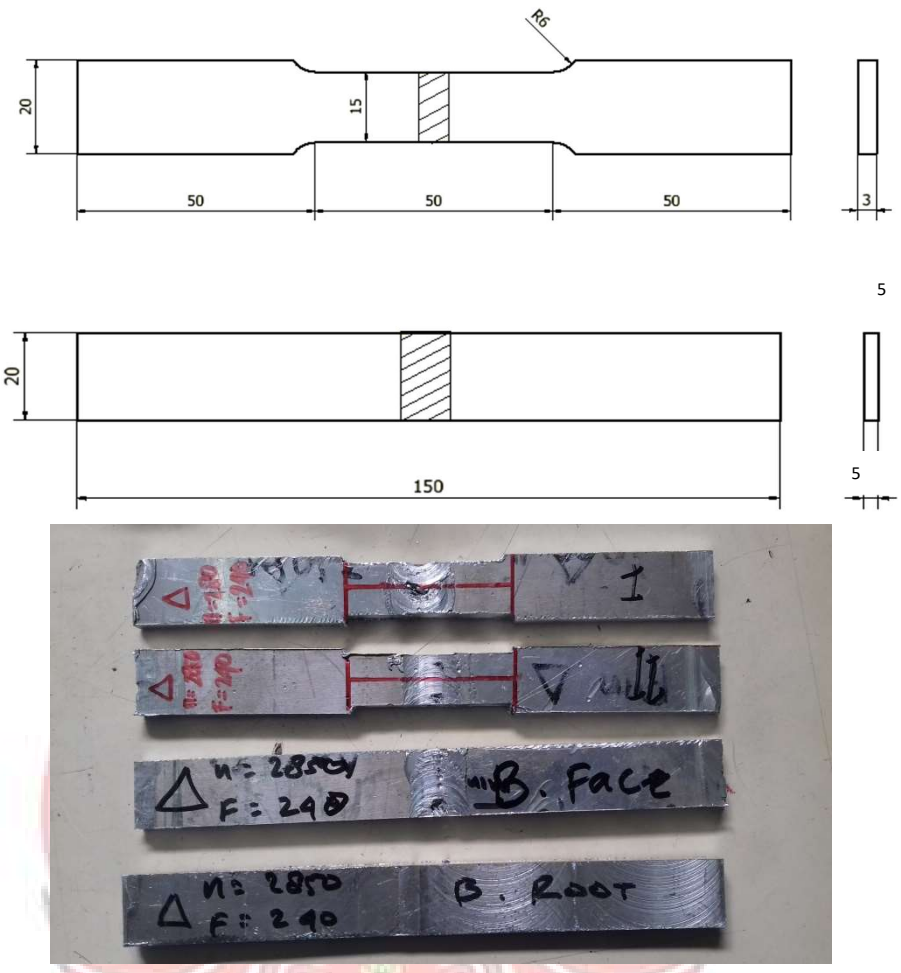
   Pengelasan dilakukan di mesin *milling* dengan *tool* diputar terhadap dua benda kerja yang di satukan dengan ragum atau penjepit. Putaran *tool* yang digunakan 1025 rpm,1550 rpm ,dan 2300 rpm.Untuk feed rate digunakan 90 mm/min, 135 mm/min, dan 208 mm/min.

Gambar 3.5. proses pengelasan benda kerja

5. Pengujian benda kerja

   Yang dilakukan dalam pengujian ini ialah:

   a. Membentuk benda kerja hasil pengelasan menjadi beberapa potongan spesimen untuk uji tarik dan *bending* dengan bentuk dan ukuran seperti gambar berikut:



Gambar 3.6. Spesimen uji

b. Melakukan pengujian pada specimen. Pada proses pengujian data yang diperoleh ialah beban dan pertambahan panjang specimen.

3.5 Proses Pengujian

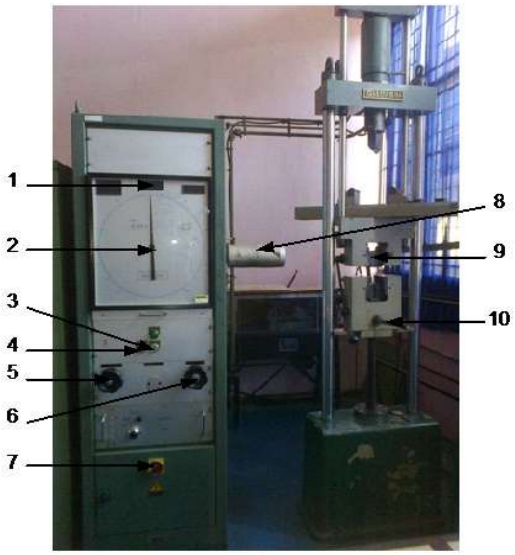
Proses pengujian merupakan tahapan dalam pengumpulan data penelitian. Data hasil pengujian merupakan nilai sifat mekanik hasil pengelasan yaitu kekuatan tarik, kekuatan *bending*, dan nilai kekerasan. Data hasil pengujian akan

dikelompokan berdasarkan nilai variasi putaran tool dan kecepatan pengelasan yang diberikan. Proses pengujian benda kerja diuraikan sebagai berikut:

1. Pengujian tarik dilakukan dengan cara mencekam kedua ujung spesimen uji pada mesin uji tarik
2. Pengujian menggunakan metode face bending dan root bending pada permukaan bidang las, benda uji diletakkan di dudukan dan batang penekan menekan benda uji tegak lurus dengan benda kerja.
3. Pengujian kekerasan dilakukan pada darerah las, daerah HAZ, dan logam induk.
4. Dalam pengujian dilakukan pengelompokan benda kerja berdasarkan besar diameter *shoulder* nilai putaran dan kecepatan pengelasan yang diberikan.
5. Dalam pengujian nilai kekeuatan tarik, kekuatan bending, dan nilai kekerasan yang diambil ialah nilai rata-rata yang diperoleh.
6. Dalam pengujian mikrostruktur yang diambil adalah gambar kristal hasil pemolesan.

3.5.1 Pengujian Kekuatan Tarik

Pada proses pengujian tarik data yang diperoleh ialah gaya tarik dan pertambahan panjang spesimen hingga putus. Uji tarik dilakukan menggunakan mesin uji tarik universal (lihat gambar 3.20).



Gambar 3.7. Universal Testing Machine dan Bagiannya

Keterangan gambar:

1. Pembacaan skala
2. Jarum penunjuk skala
3. *Pump on*
4. *Pump off*
5. Katup turun *loading*
6. Katup naik *loading*
6. Katup naik loading
7. *Switch panel*
8. Tromol dudukan kertas grafik
9. *Clamping*
10. *Cross Head*

Proses dan pengambilan data pengujian tarik adalah sebagai berikut:

a. Menyiapkan kertas block dan letakkan kertas tersebut di atas plotter.

b. Benda uji mulai ditarik dengan menggunakan beban dari tenaga hidrolik diawali dengan nilai 0 kg dan terus meningkat hingga putus pada beban maksimum yang dapat ditahan.
c. Benda uji yang sudah putus lalu diukur panjang setelah putus (Li) dan tebal setelah putus (Ti).
d. Gaya maksimum yang terbaca pada layar monitor diamati dan dicatat setelah specimen uji tarik putus.
e. Hasil kurva uji tarik terdapat pada kertas millimeter block yang ada pada meja plotter.
f. Amati tipe dan lokasi patahan yang terjadi setelah dilakukan uji tarik
g. Menghitung nilai kekuatan tarik berdasarkan data hasil uji tarik yang diperoleh.

Adapun foto kegiatan pengujian tarik yang dilakukan pada penelitian ini dapat dilihat pada lampiran 8.

3.5.2 Pengujian Kekuatan Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mendapatkan nilai kekerasan pada beberapa daerah hasil pengelasan. Uji kekerasan ini dilakukan menggunakan mesin *Affri Hardnes Tester Series 206 MX* (lihat Gambar 3.12).

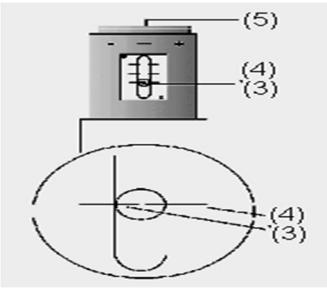
Gambar 3.8. Mesin Uji Kekerasan

Sebelum melakukan pengujian kekerasan terlebih dahulu menentukan metode pengujian dan beban penetrasi pengujian yang akan digunakan. Langkah pengujian kekerasan sebagai berikut:

a. Kenali jenis material yang akan diuji kekerasannya.
b. Metode pengujian kekerasan yang akan digunakan ialah metode Rockwell B (HRB).
c. Jenis penetrator yang akan dugunakan berdasarkan tabel pemrograman ball 1/16”.
d. Beban pengujian yang akan digunakan berdasarkan tabel pemrograman ialah 100 kgf.

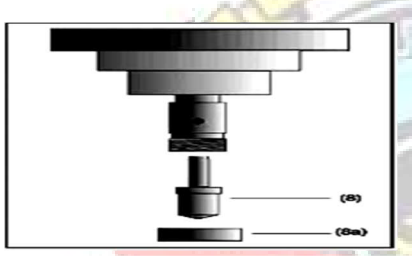
Adapun proses penyettingan pengujian kekerasan adalah sebagai berikut:

a. Setting Beban yang telah dipilih dengan menggunakan kanci L (5) pada bagian skala beban uji (3). Skala beban uji dapat dilihat pada gambar 3.12 berikut:



Gambar 3.9. Skala Beban Uji

b. Pasang Penetrator Ball 1/16”



Gambar 3.10. Penetrator dan Ring Mur

- Siapkan penertaror (gambar 3.10) yang akan digunakan
- Lepaskan ring mur (gambar 3.10 a)
- Pasang penetrator yang akan digunakan
- Pasang ring mur dan kencangkan dengan tangan

Gambar 3.11. Landasan Spesimen

d. Pemrograman Mesin Affri Hardness Tester

Adapun langkah-langka pemrograman mesin uji kekerasan Affri hardness tester sebagai berikut:

1) Hubungkan kabel power listrik ke power listrik PLN

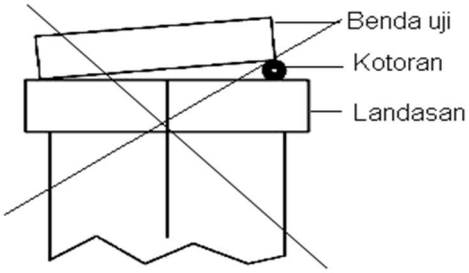
2) Tekan switch in (lihat gambar 3.15) pada posisi 1 (switch in akan menyala)

Gambar 3.12 *Switch in*

3) Memulai pemrograman tekan tombol ON (lihat Gambar 3.11)

Gambar 3.13 Tombol ON

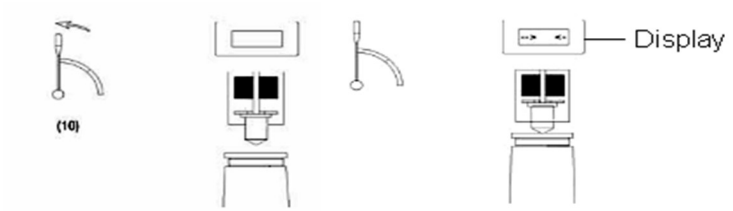
4) Letakkan spesimen diatas landasan.



Gambar 3.14 Posisi Sampel Salah

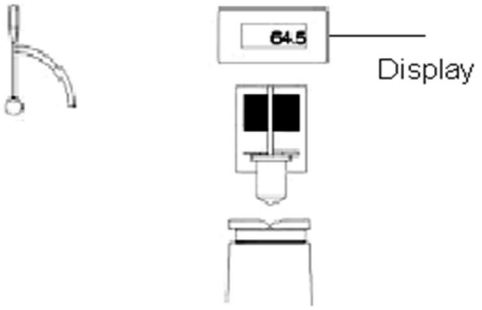
Hindari permukaan spesimen yang tidak paralel dengan permukaan landasan akibat adanya debu dan kotoran lainnya pada permukaan landasan (lihat Gambar 3.12)

5) Putar keatas handwheel hingga spesimen benda uji bersentuhan dengan penetrator. Perhatikan layar display terlihat tanda ➔ 🡐 (lihat Gambar 3.13)



Gambar 3.15 (a)*Handwheel* berputar keatas; (b) Permukaan spesimen bersentuhan penetrator

6) Setelah spesimen bersentuhan dengan penetrator putar pelan-pelan sampai tanda panah bersentuhan ➔← Setelah bersentuhan stop memutar handwheel dan tunggu hasil yang dikeluarkan pada layar display.
7) Jika yang terbaca pada display ***over*** maka bebaskan spesimen dari sentuhan penetrator dengan cara memutar handwheel ke bawah. Dan geser spesimen beberapa millimeter kemudian ulangi pengoperasian pada langka 2 & 3 secara perlahan-lahan.
8) Apabila pengukuran dilakukan dengan metode Rockwell dan Brinell maka catat pada tabel pengamatan kekerasan hasil pengujian yang ditunjukkan pada layar display (lihat Gambar 3.19).



Gambar 3.16 Hasil Pengujian Kekerasan

9) Setelah semua pengujian selesai tekan tombol switch off

Adapun foto kegiatan pengujian kekerasan yang dilakukan pada penelitian ini dapat dilihat pada lampiran 7.

3.5.3 Mikrostruktur

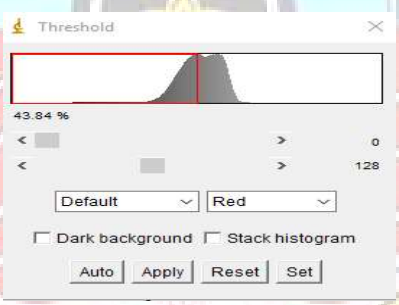
Sebelum melakukan pengujian Mikrostruktur diperlukan perlakuan tertentu pada bahan, yaitu pemolesan untuk mendapatkan bentuk butir pada bahan. Dalam pengujian ini kualitas bahan ditentukan dengan mengamati struktur dibawah mikroskop (lihat Gambar 3.21). Gambar foto Mikrostrukturdari tiga variasi suhu dan putaran dapat dilihat pada lampiran 9.

Gambar 3.17 Pengamatan Benda Kerja Menggunakan Mikroskop

Tujuan dari pengamatan Mikrostruktur adalah mengetahui perbandingan besar butir dari logam yang telah mengalami pengecoran. Untuk mengukur besar butir,

pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan program *Imagel*. Adapun langkah kerja pengukuran besar butir dengan program *Imagel* yaitu sebagai berikut:

1. Buka program *Imagel*
2. Buka *file* dari gambar yang akan diketahui ukuran butirnya dengan cara pilih *file – open*, lalu pilih gambar yang diinginkan.
3. Selanjutnya pilih dan ukur skala pada gambar.
4. Pilih *Analyze – Set Scale* lalu atur skala sesuai dengan skala gambar.
5. Atur jenis gambar dengan cara pilih *Image – Type – 8 bit.*
6. Setelah itu pilih *Image – Adjust – Threshold,* lalu muncul menu seperti gambar 3.22 dan pilih *Apply*.



Gambar 3.18 Menu *Threshold* pada Aplikasi *Imagel*

7. Langkah terakhir yaitu pilih *Analyze – Analyze Particles – OK.*

3.6. Teknik Analisis Data

Teknik analisa data ialah tahapan dalam mengolah dan menganalisa data pengujian yang diperoleh. Data pengujian yang diperoleh akan diolah dan dianalisis menggunakan metode *Design of Experiment* (DOE). Desain Eksperimen adalah

metode yang berguna dalam mengidentifikasi parameter yang signifikan dan dalam mempelajari efek yang mungkin terjadi dari variabel selama pengujian. Metode ini juga dapat dikembangkan percobaan antara berkisar dari faktor tak terkendali, yang diperkenalkan parameter acak untuk dikontrol dengan hati-hati. Faktor harus bersifat kuantitatif atau kualitatif. Rentang nilai untuk faktor kuantitatif harus memutuskan bagaimana mereka akan diukur dan tingkat dimana mereka dikendalikan selama pengujian. Sementara itu, faktor-faktor kualitatif adalah parameter yang ditentukan secara terbuka.

Dengan demikian teknik DOE dimanfaatkan dalam penelitian ini untuk merancang percobaan dengan menggunakan metodologi *factorial* untuk mengeksplorasi hubungan antara beberapa variabel *factor* dan variabel respon secara serempak. Desain melibatkan tiga faktor termasuk putaran dan suhu penuangan dalam rangka mengoptimalkan parameter yang berpengaruh terhadap sifat mekanik hasil pengelasan. Software *Design Expert* versi 6.0.5 diaplikasikan untuk membuat rencana eksperimental dan menganalisis data yang diamati. Tabel 3.1 kombinasi paremeter percobaan.

Tabel 3.1. Parameter percobaan untuk eksperimen

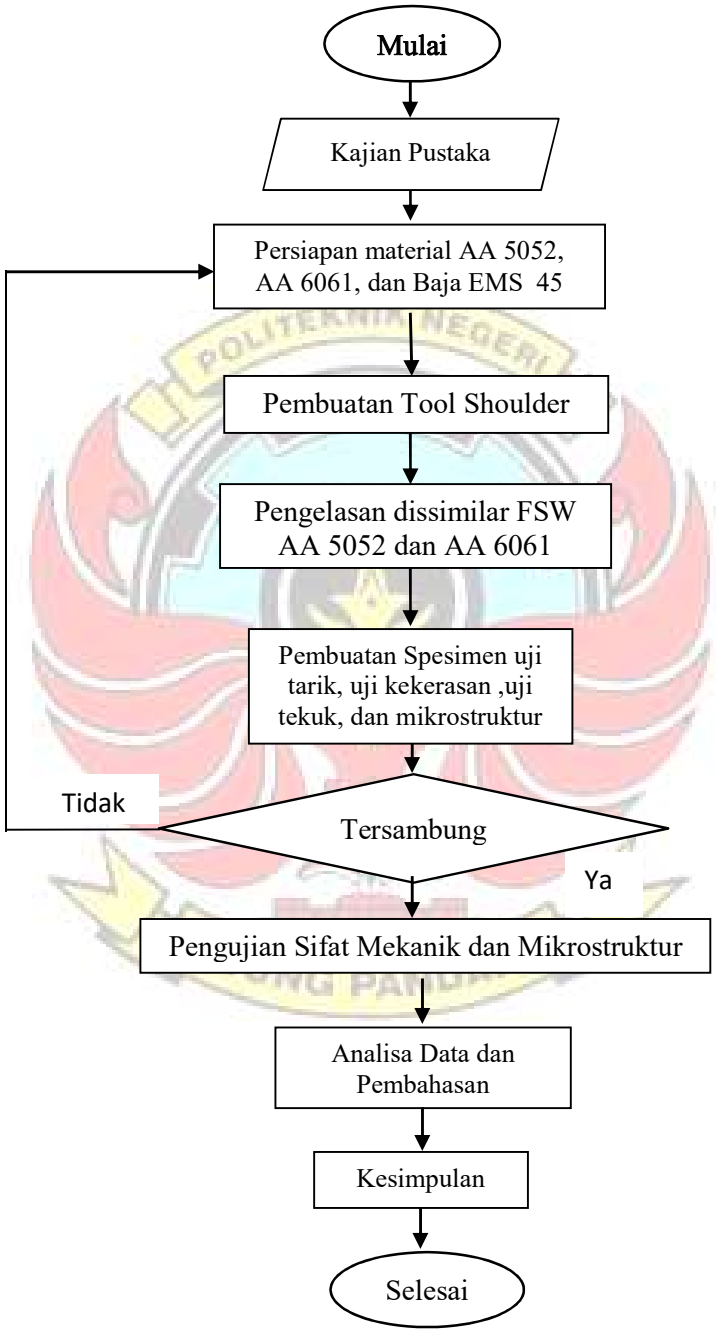
Parameter Pengelasan	**level Parameter**			**Hasil Respon**
	Low (-1)	**Centre (0)**	**High (+1)**	
Putaran Tool, n (Rpm)	1300	1950	2850	Kekuatan tarik sambungan, Kekuatan lentur sambungan, Kekerasan di *nugget zone*, HAZ, dan logam induk
Feeding, F (mm/min)	43	130	240	

Tabel 3.2. Desain parameter percobaan

No	N (Rpm)	F (mm/min)	Bentuk Pin	Respon		
				HB	σ_u (MPa)	σ_b (MPa)
1	1300	43	Segi tiga			
2	1950	43	Segi tiga			
3	2850	43	Segi tiga			
4	1300	130	Segi tiga			
5	1950	130	Segi tiga			
6	2850	130	Segi tiga			
7	1300	240	Segi tiga			
8	1950	240	Segi tiga			
9	2850	240	Segi tiga			
10	1300	43	Ulir			
11	1950	43	Ulir			
12	2850	43	Ulir			
13	1300	130	Ulir			
14	1950	130	Ulir			
15	2850	130	Ulir			
16	1300	240	Ulir			
17	1950	240	Ulir			
18	2850	240	Ulir			
19	1300	43	Silinder			
20	1950	43	Silinder			
21	2850	43	Silinder			
22	1300	130	Silinder			
23	1950	130	Silinder			
24	2850	130	Silinder			
25	1300	240	Silinder			
26	1950	240	Silinder			
27	2850	240	Silinder			

3.7. Diagram alir penelitian

Uraian langkah penelitian diatas dapat dijabarkan dalam bentuk diagram alir berikut:



Gambar 3.19. Diagram alir penelitian

BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1. Sifat Mekanis Material Logam Induk

Untuk memastikan bahwa logam induk yang digunakan dalam pengelasan FSW adalah material jenis aluminium paduan AA 5052 dan AA 6061 dengan memperhatikan komposisi kimia dan sifat mekanisnya. Berikut pada table 4.1 dan 4. 2 menunjukan hasil pengujian komposisi kimia dan sifat mekanis.

Tabel 4.1 Komposisi kimia Aluminium AA 5052 dan Aluminium AA6061

Komposisi Kimia (%)										
Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Zr
AA5052	0,35	0,40	0,10	0,10	2,2-2,8	0,15 – 0, 35	-	0,10	-	-
AA6061	0,64	0,2	0,19	0,06	1,0	0,15	-	0,05	0,07	

Sumber: Sertifikat pabrik

Dari tabel tersebut didapatkan komposisi unsur utama paduan aluminium logam induk yang dominan yang terdiri dari Magnesium (Mg), Silika (Si) yang sesuai dengan paduan utama aluminium seri 6xxx (Al-Mg-Si) dan Seri 5xxx yang terdiri atas Magnesium (2,2-2,8 %)

Sedangkan sifat mekanis material aluminium AA6061 berdasrkan hasil uji tarik, uji lentur, uji kekerasan dan sertifikat pabrik dapat dilihat pada table 4.2 berikut:

Tabel 4.2. Sifat mekanis material logam induk

Material	Parameter Sifat Mekanis	Nilai Sifat Mekanis	
		Hasil Pengujian	Sertifikat Pabrik
AA 5052	Kekerasan	45 HB	- HB
	Kekuatan tarik (σ_u)	172.49 MPa	170 MPa
	Regangan (ε)	13.8 %	>10 %
	Kekuatan Lentur (σ_b)	191.67 MPa	-
AA 6061	Kekerasan	114 HB	100 HB
	Kekuatan tarik (σ_u)	301,68 MPa	290-315 MPa
	Regangan (ε)	10.95 %	9-13 %
	Kekuatan Lentur (σ_b)	520.56 MPa	-

Sumber: Hasil eksperimen pengujian dan sertifikat pabrik

Dari hasil pengujian laboratorium pada table 4.2. tersebut diatas menunjukkan bahwa sifat mekanis material aluminium memenuhi standar spesifikasi material aluminium AA 5052 dan AA 6061.

4.2. Proses Pengelasan Sambungan Dissimilar FSW Aluminium AA 5052 dan Aluminium AA 6061

Pengelasan dengan metode *friction stir welding* merupakan pengelasan yang terjadi dalam kondisi padat *(solid state)* dengan memanfaatkan panas dari gesekan benda yang berputar (*tool*) dengan benda kerja yang diam sehingga mampu melelehkan benda kerja tersebut dan akhirnya tersambung menjadi satu. Proses pengelasan FSW *dissimilar* alumuniun AA 5052 dan alumuniun AA 6061 ini dilakukan dengan menggunakan mesin Frais merek *minyang*. Berikut ini uraian penjelasan urutan tahapan proses dan hasil pengelasan FSW *dissimilar* alumuniun AA 5052 dan alumuniun AA 6061

4.2.1. Tahap pertama

Mempersiapkan material logam induk dan *tool*. Bahan logam induk dari material alumuniun AA 5052 dan alumuniun AA 6061 yang terlebih dahulu diratakan permukaannya menggunakan mesin frais sesuai ukuran. Sedangkan *tool* yang digunakan terbuat dari material baja EMS 45 yang dibentuk melalui proses pembubutan. *Pin tool* terdiri dari tiga bentuk geometri yaitu bentuk selinder, segi tiga dan ulir. Dimana pin segi tiga dibentuk menggunakan kikir, pin selinder menggunakan bubut dan pin ulir mengguna tap luar. Adapun hasil pembuatan benda kerja FSW dan tool tersebut dapat dilihat pada gambar 4.1 berikut ini:

a. (b)

Gambar 4.1. Hasil pembuatan a).benda kerja FSW, b).t*ool* FSW

4.2.2. Tahap kedua

Pencekaman benda kerja dan pemasangan *tool*. Pada tahap ini benda kerja dicekam menggunakan ragum dan klem penjepit pada meja mesin. Setelah benda kerja terpasang, selanjutnya memasang *tool* di *spindle* mesin frais. Adapun mesin

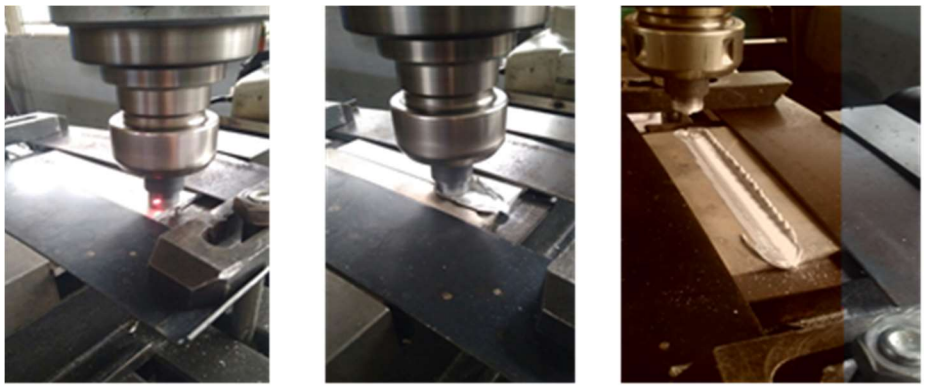
yang digunakan, proses pencekaman benda kerja dan pemasangan tool terlihat pada gambar 4.2 berikut:

(a) (b) (c)

Gambar 4.2. a) Mesin frais *minyang*, b) proses pencekaman benda kerja, c) pemasangan *tool* pada *spindle*

4.2.3. Tahap ketiga

proses pengelasan FSW. Setelah tahap pemasangan benda kerja dan *tool* selanjutnya adalah tahap proses penyambungan menggunakan metode FSW. Pada tahap ini terbagi menjadi 3 proses yaitu proses penetrasi awal, proses penyambungan dan proses pengangkatan *tool*. Proses awal dalam tahapan ini adalah penetrasi *tool* ke benda kerja hingga *shoulder* bergesekan dengan permukaan benda kerja lasan kemudian *tool* ditahan sekitar 60 detik hingga terbentuk lumeran cair di permukaan gesek benda kerja. Setelah benda kerja melumer maka meja digerakkan linear dan konstan secara otomatis dimana arah eretannya berlawanan dengan arah putaran tool. Proses penetrasi untuk pelumeran, pegelasan dan pengangkatan *tool* ini terlihat pada gambar 4.3 berikut:



(a) (b) (c)

Gambar 4.3. Proses pengelasan FSW a). Proses penetrasi dan pelumeran benda kerja, b). proses penyambungan benda kerja, c). pengangkatan *tool* dari benda kerja

Adapun hasil dari proses pengelasan FSW tersebut diatas diperlihatkan pada gambar 4.4 berikut:

(a) (b)

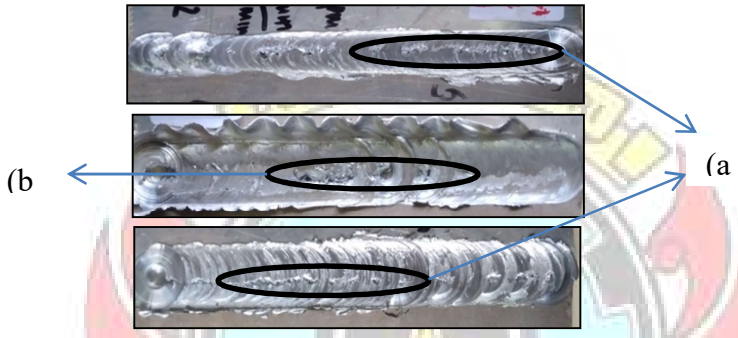
Gambar 4.4. Hasil pengelasan FSW Alumunium AA 6061 dan AA 5052

: (a). *Face*, (b). *Root*

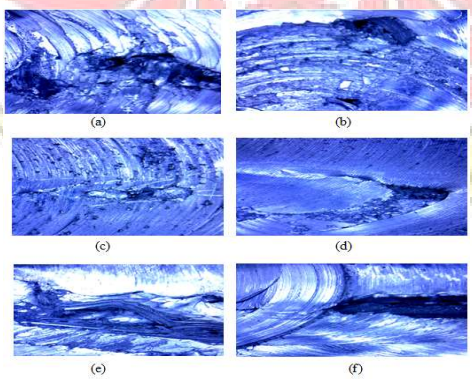
Hasil pengelasan pada gambar 4.4 untuk putaran 1300 Rpm, feeding 43 mm/min, dengan *tool* silinder terlihat bahwa permukaan hasil lasan menyambung

dengan baik dan permukaan yang halus sedangkan untuk penetrasi lasan pada *root* (akar) juga terlihat tersambung dengan baik. Adapun hasil pengelasan dengan variasi putaran, *feeding* dan *tool* secara keseluruhan dapat dilihat pada lampiran 15.

Dari hasil pengelasan dengan variasi putaran, *feeding* dan *tool* terdapat beberapa cacat permukaan hasil pengelasan seperti yang terlihat pada gambar berikut:



Gambar 4.5. Cacat permukaan hasil pengelasan a) Permukaan berongga panjang (surface tunnel) b) lubang/kekosongan (voids)



Gambar 4.6 Cacat Permukaan Hasil Pengelasan dengan Foto Makro

Berdasarkan gambar diatas yang menampilkan beberapa cacat permukaan pengelasan. Dimana cacat ini rata-rata sering terjadi pada *feeding* pengelasan yang cepat sehingga proses pengadukan dan penyambungan yang berlangsung kurang

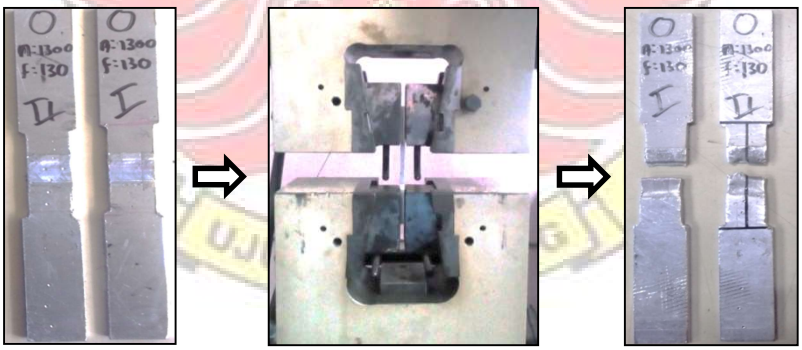
optimal. Adapun gambar foto makro diatas dari semua tool, putaran, dan feeding terdapat pada lampiran 14.

4.3. Hasil Proses Pengujian Sifat Mekanis dan Mikrostruktur FSW Aluminium AA 5052 dan aluminium AA 6061

Setelah proses pengelasan selesai maka hasil pengelasan FSW selanjutnya adalah tahapan pengujian sifat mekanis material dan mikrostruktur. Adapun proses dan hasil pengujian sifat mekanis dan mikrostrukturtersebut dapat dijelaskan sebagai berikut:

a. Pengujian Tarik

Proses dan hasil pengujian tarik sambungan pengelasan FSW adalah sebagai berikut:



(a) (b) (c)

Gambar 4.7 a). spesimen uji tarik b). proses pengujian tarik c). hasil pengujian tarik

Dari hasil pengujian tarik dapat diketahui posisi patahan yang terjadi. Gambar 4.7 berikut ini menunjukkan salah satu contoh patahan yang terjadi pada hasil pengujian tarik untuk putaran 1300 dengan *tool* Ulir. Dimana jenis patahan yang terjadi berbeda disetiap *feeding.* Pada *feeding* kecil 43 mm/min spesimen dua patahannya terjadi di HAZ dekat logam induk, pada *feeding* tengah 130 mm/min patahannya terjadi di daerah HAZ dekat *nugget zone*, sedangkan untuk *feeding* yang besar 240 mm/min patahannya terjadi di daerah *nugget zone*.

(a) (b (c)

Gambar 4.8 Jenis jenis patahan uji tarik. a) HAZ dekat logam induk. b) Bagian HAZ. c) Nugget Zone

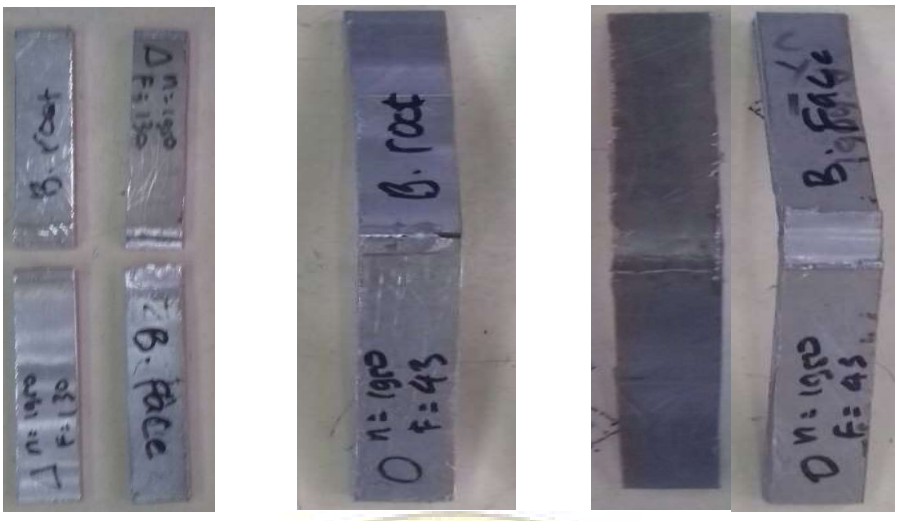
b. Pengujian Lentur

Selanjutnya proses dan hasil pengujian lentur sambungan pengelasan FSW adalah sebagai berikut:

(a) (b) (c)

Gambar 4.9 a) spesimen uji lentur *face* dan *root* b) proses pengujian lentur, c) hasil pengujian lentur *face* dan *root*

Dari hasil pengujian lentur pada gambar diatas menunjukan kelenturan atau sifat elastis hasil sambungan pengelasan FSW berbeda-beda pada setiap variasi parameter pengelasan FSW. Hasil uji lentur yang patah mungkin terjadi akibat cacat yang ditimbulkan dari *feeding* yang cepat (240 mm/min) yang menghasilkan rongga mudah patah. Sedangkan untuk hasil uji lentur yang retak (*crack*) mungkin terjadi akibat masukan panas yang tidak merata pada permukaan hasil lasan. Sedangkan hasil uji lentur yang tidak retak maupun patah baik pada daerah *face* (*bending face*) maupun daerah *root* (*bending root*) mungkin terjadi karena proses penyambungan logam induk terjadi secara optimal akibat distribusi panas merata. Gambar berikut ini menunjukkan beberapa kondisi hasil uji lentur pada sambungan FSW:



(a) (b) (c)

Gambar 4.10 Jenis-jenis hasil uji lentur a) patah, b) retak, c) baik

c. Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan dengan terlebih dahulu membentuk spesimen uji dari setiap variasi parameter pengelasan benda kerja. Kemudian tahap selanjutnya melakukan pengujian spesimen yang telah dibentuk pada mesin uji kekerasan menggunakan metode Brinnel (HB) dengan *indentor* bola baja Ø 2,5 mm. Dari pengujian yang telah dilakukan akan muncul nilai pada display mesin uji yang merupakan hasil kekerasan spesimen yang di uji tersebut. Untuk lebih jelasanya proses dan hasil uji kekerasan dapat dilihat pada gambar 4.10:

(a) (b) (c)

Gambar 4.11 a) settingan spesimen, b) proses pengujian kekerasan, c) hasil pengujian kekerasan

d. Analisis Mikrostruktur

Dalam analisis mikrostruktur dilakukan dengan terlebih dahulu mempolis spesimen sampai mengkilap dan tidak ada goresan. Selanjutnya dilakukan dilakukan foto mikrostruktursebelum dan setelah dietsa dengan perbesaran 5-50 µm. Adapun tahapan dan hasil uji mikrostrukturdapat dilihat pada gambar dibawah ini.

(a) (b) (c)

Gambar 4.12. a) spesimen polis uji struktur mikro, b) proses pengujian struktur mikro, c) hasil pengujian lentur mikrostruktur

4.4. Pengukuran Temperatur Pengelasan

Pada saat proses pengelasan FSW berlangsung parameter putaran, *feeding*, bentuk *pin* dapat mempengharui kondisi temperatur pengelasan. Untuk mengetahui pengaruh parameter-parameter pengelasan tersebut terhadap temperatur proses pengelasan maka dilakukan pengukuran temperatur. Adapaun pengukuran proses pengelasan dapat dilihat pada gambar berikut ini:

Gambar 4.13 Pengukuran temperature Pengelasan Sambungan Dissimilar

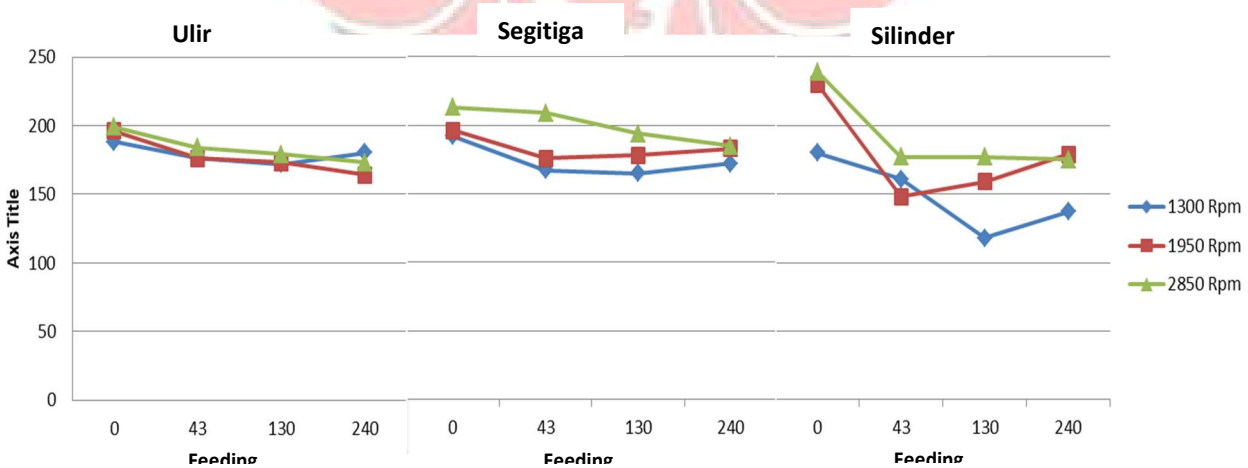
Hasil pengukuran temperatur pengelasan untuk variasi putaran *tool*, *feeding* serta bentuk *tool pin shoulder* dapat dilihat pada tabel 4.3 berikut.

Tabel 4.3. Hasil Pengukuran Temperatur Pengelasan (◦C)

Tool	Putaran (Rpm)	Temperatur (◦C)			
		Feeding (mm/min)			
		0	43	130	240
Silinder	1300	175	161	118	137
	1950	127	148	159	179
	2850	180	177	177	175
Segi tiga	1300	180	167	165	172
	1950	230	176	178	183
	2850	203	209	194	185
Ulir	1300	239	176	172	180
	1950	191	176	173	164
	2850	235	184	179	173

Sumber: Data Pengujian

Berdasarkan data temperature pada tabel diatas maka dapat diperoleh grafik distribusi temperatur pengelasan seperti pada gambar 4.14 berikut ini:



Gambar 4.14. Grafik distribusi temperatur pengelasan

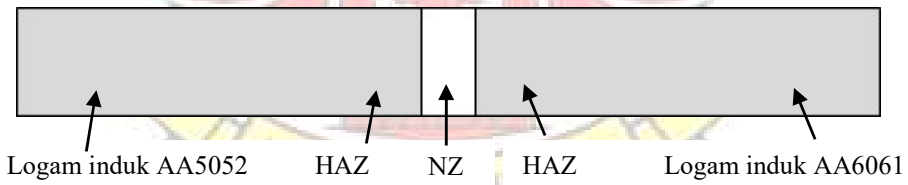
Berdasarkan grafik distribusi temperatur pengelasan pada gambar 4.14 diperoleh bahwa temperatur pengelasan mengalami penurunan dengan naiknya nilai putaran dan pada *feeding* tertentu. Pada posisi waktu tunggu *tool* (*holding time*) temperatur mencapai nilai maksimal pada tool silinder dengan putaran 1300 rpm dan feeding 240 mm/min sedangkan temperatur terendah pada posisi ini terdapat pada feeding lambat yaitu 43 mm/min putaran 1300 rpm. Pada posisi pengelasan temperatur maksimal terdapat pada tool segi tiga putaran 2850 rpm dengan *feeding* 43 mm/min, sedangkan temperatur terendah terdapat pada tool silinder putaran 1300 rpm dengan *feeding* 130 mm/min. Pada grafik tersebut terlihat perbedaan dari ketiga *tool*, dimana *tool* ulir temperaturnya cenderung konstan dan perubahan tidak terlalu signifikan. Berbeda dengan *tool* silinder yang temperatur pengelasannya tidak konstan dan cenderung naik turun, lain lagi untuk *tool* segitiga dari ketiga putaran dimana terlihat terjadi tren penurunan temperatur seiring dengan peningkatan *feeding*-nya. Hal tersebut terjadi karena *pin shoulder* sangat berpengaruh terhadap gesekan yang berdampak pada temperatur pengelasan. *Pin shoulder* segitiga yang mempunyai sudut sehingga terjadi gesekan besar diawal (*Holding Time*) pada saat pengelasan sudut-sudutnya menjadi hilang. Sedangkan *pin shoulder* ulir tetap dengan temperature yang konstan. Sehingga temperature sangat dipengaruhi oleh bentuk geometri dari tool yang digunakan.

4.5. Analisis Sifat Mekanis Hasil Las FSW Alumunium AA 5052 dan AA 6061

4.5.1. Uji Kekerasan Metode Brinnel

Kekerasan adalah ketahanan suatu material terhadap desakan atau penetrasi dari material lain yang lebih keras. Nilai kekerasan suatu material didapatkan dari pengujian kekerasan dengan menggunakan salah satu dari ketiga metode dan nilai pengujian yang ada antara lain meto de Rockwell (HRC/HRB), Brinnel (HB), dan Vickers (HV).

Dalam penelitian kali ini metode yang digunkan untuk mendapatkan nilai kekerasan sambungan pengelasan ialah dengan metode Brinnel (HB). Dalam proses pengujian ini penekanan di mulai dari titik pusat sambungan yaitu logam las (n*ugget zone*) dan selanjutnya di pindahkan pada daerah HAZ (*Heat Afected Zone*) sisi kiri dan sisi kanan, kemudian dilanjutkan pada logam induk sisi kiri dan sisi kanan. Spesimen yang digunakan seperti yang ditunjukkan gambar 4.15 berikut:.



Gambar 4.15. Spesimen uji kekerasan

Data hasil pengujian diperoleh dari tiga variasi putaran *tool* 1300 rpm, 1950 rpm, 2850 rpm dan tiga variasi *feeding* 43 mm/min, 130 mm/min, 240 mm/min dengan menggunkan tiga jenis *tool* yang memiliki variasi geometri *pin shoulder* silinder, segi tiga, dan ulir. Adapun nilai kekerasan pada setiap spesimen dapat dilihat pada tabel data kekerasan pada lampiran 1, 2, dan 3.

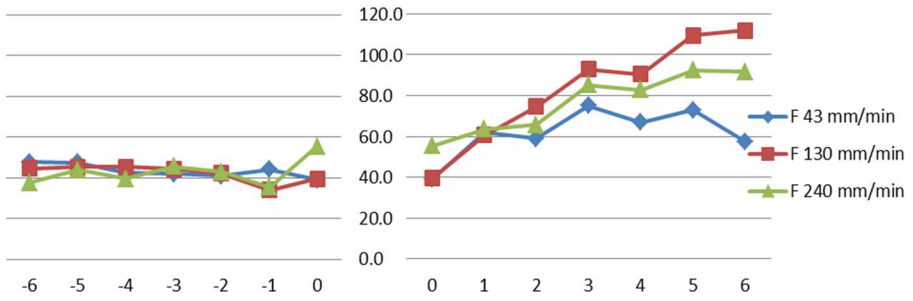
Nilai kekerasan sebagaimana terdapat pada lampiran tersebut selanjutnya diperoleh nilai rata-rata kekerasan pada setiap variasai putaran, *feeding*, dan jenis *tool* yang dapat dilihat pada tabel 4.4, 4.5, dan 4.6 berikut.

Tabel 4.4. Nilai kekerasan (HB) hasil pengelasan dissimilar FSW material Alumunium AA 5052 dan AA 6061 untuk *Tool* 1 (*Pin Shoulder* silinder)

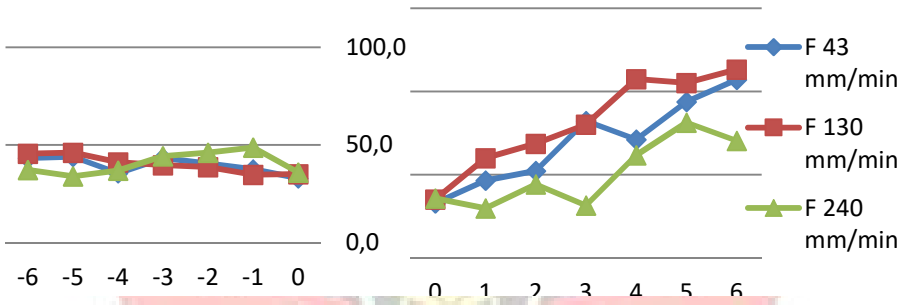
Daerah Las	Posisi dari titik nol	n (1300 Rpm)			n (1950 Rpm)			n (2850 Rpm)		
		Feeding (mm/min)			Feeding (mm/min)			Feeding (mm/min)		
		43	130	240	43	130	240	43	130	240
Logam Induk AA6061	6	57.4	112.0	91.7	107.1	113.2	70.4	76.4	61.1	107.3
	5	72.9	109.6	92.5	93.7	105.2	81.3	86.0	87.2	99.3
	4	66.9	90.5	82.7	71.0	107.4	61.6	91.2	90.1	96.6
	Rata-rata	65.7	104.0	89.0	90.6	108.6	71.1	84.5	79.5	101.1
HAZ	3	75.1	93.0	85.2	82.3	80.1	31.5	73.3	88.2	83.1
	2	58.9	74.7	65.7	52.2	68.5	44.1	80.9	78.2	63.5
	1	61.8	60.6	63.5	46.5	59.9	29.8	56.3	73.6	65.1
	Rata-rata	65.3	76.1	71.5	60.3	69.5	35.1	70.2	80.0	70.6
Nugget Zone	0	33.1	47.5	52.6	32.6	33.0	35.2	53.4	35.9	39.0
	0	39.0	33.6	60	34.1	35.1	37.0	52.3	33.2	42.5
	0	44.9	37.0	53.4	31.9	37.2	35.1	53.3	30.9	43.5
	Rata-rata	39.0	39.4	55.3	32.9	35.1	35.8	53.0	33.3	41.7
HAZ	-1	44.1	33.9	35.5	37.5	34.8	48.7	46.6	34.4	37.5
	-2	40.9	42.2	42.8	40.5	38.6	46.1	43.0	41.7	40.8
	-3	41.9	44.2	45.5	43.2	39.7	44.2	41.8	40.4	39.3
	Rata-rata	42.3	40.1	41.3	40.4	37.7	46.3	43.8	38.8	39.2
Logam Induk AA5052	-4	42.6	45.2	39.6	35.6	41.2	36.9	37.2	44.5	43.2
	-5	47.5	45.2	43.7	43.9	46.0	33.9	45.7	45.4	46.0
	-6	47.7	44.6	37.6	43.2	45.6	37.2	44.5	46.0	46.0
	Rata-rata	45.9	45.0	40.3	40.9	44.3	36.0	42.5	45.3	45.1

Sumber: Data Pengujian

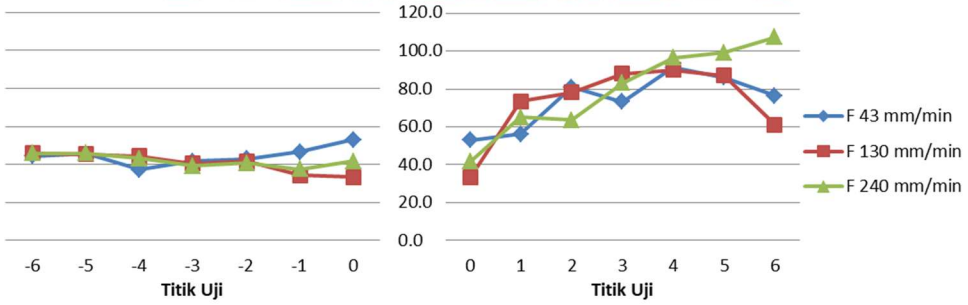
Adapun penyajian distribusi nilai kekerasan hasil pengelasan FSW material Aluminium AA5052 dan Alumunium AA 6061 untuk *tool* silinder dalam bentuk grafik didapatkan seperti gambar 4.16, 4.17 dan 4.18 berikut.



Gambar 4.16. Distribusi nilai kekerasan FSW *tool* 1 untuk putaran 1300 Rpm



Gambar 4.17 Distribusi Nilai Kekerasan FSW *Tool* 1 untuk Putaran 1950 Rpm



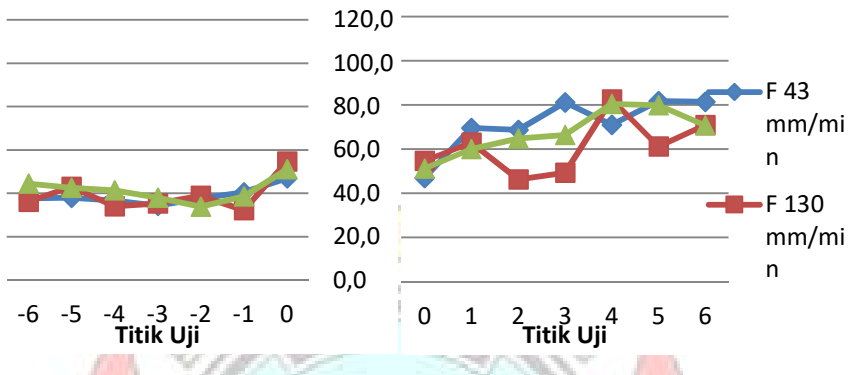
Gambar 4.18 Distribusi Nilai Kekerasan FSW *Tool* 1 untuk Putaran 2850 Rpm

Tabel 4.5. Nilai Kekerasan (HB) Hasil Pengelasan Dissimilar FSW Material Alumunium AA 5052 dan AA 6061 untuk *Tool* 2 (*Pin Shoulder* Ulir)

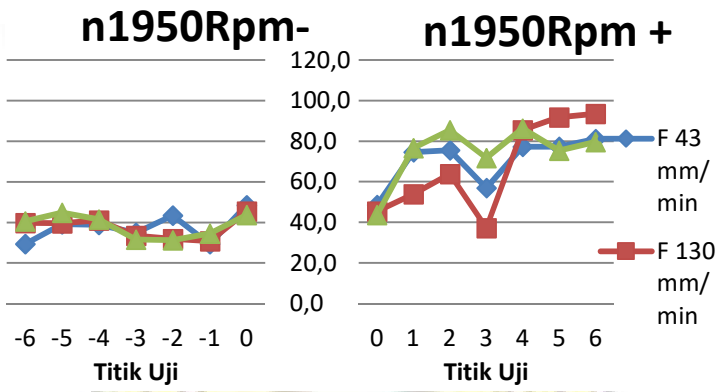
Daerah Las	Posisi dari titik nol	n (1300 Rpm)			n (1950 Rpm)			n (2850 Rpm)		
		Feeding (mm/min)			Feeding (mm/min)			Feeding (mm/min)		
		43	130	240	43	130	240	43	130	240
Logam Induk AA6061	6	81.5	70.8	70.7	81.1	93.5	79.6	77.9	99.0	80.5
	5	81.7	61.2	79.9	77.3	91.7	75.4	74.3	98.7	83.3
	4	71	82.5	80.5	77.3	85.5	86.2	81.2	105.3	73.4
	Rata-rata	78.1	71.5	77.0	78.6	90.2	80.4	77.8	101.0	79.1
HAZ	3	81.1	49.3	66.4	56.9	37.3	71.8	69.6	66.4	82.1
	2	68.7	46.3	64.8	75.6	63.9	85.5	70.7	56.2	75.9
	1	69.6	62.9	60.0	74.6	53.9	76.6	71.8	69.0	61.8
	Rata-rata	73.1	52.8	63.7	69.0	51.7	78.0	70.7	63.9	73.3
Nugget Zone	0	45.7	48.0	41.7	46.9	44.9	37.6	58.3	45.2	43.7
	0	47.7	60.4	60.5	50.3	45.6	44.7	49.1	39.7	46.9
	0	47.6	55.5	51	48.4	45.7	48.7	39.0	48.9	30.7
	Rata-rata	47.0	54.6	51.1	48.5	45.4	43.7	48.8	44.6	40.4
HAZ	-1	40.5	32.2	38.5	29.3	30.8	34.5	70.0	31.7	38.8
	-2	37.6	38.9	33.9	43.4	31.9	31.3	64.8	51.1	34.3
	-3	34.3	35.3	38.0	34.9	33.4	31.6	33.7	39.2	37.5
	Rata-rata	37.5	35.5	36.8	35.9	32.0	32.5	56.2	40.7	36.9
Logam Induk AA5052	-4	36.6	34.0	41.3	38.9	41.1	41.5	41.4	44.8	38.3
	-5	37.9	43.0	42.6	39.2	39.7	44.9	44.4	42.6	42.9
	-6	37.6	36.1	44.5	29.3	39.8	40.5	43.8	40.6	42.2
	Rata-rata	37.4	37.7	42.8	35.8	40.2	42.3	43.2	42.7	41.1

Sumber: Data Pengujian

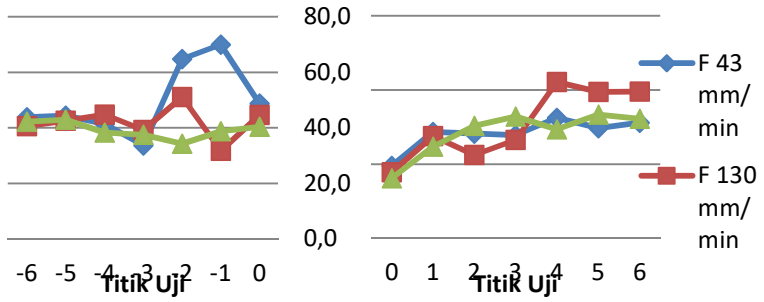
Adapun penyajian distribusi nilai kekerasan hasil pengelasan FSW material Alumunium AA 6061 untuk *tool* 2 dalam bentuk grafik didapatkan seperti gambar 4.19, 4.20, dan 4.21 berikut:



Gambar 4.19 Distribusi Nilai Kekerasan FSW *Tool* 2 untuk Putaran 1300 Rpm



Gambar 4.20 Distribusi Nilai Kekerasan FSW *Tool* 2 untuk Putaran 1950 Rpm



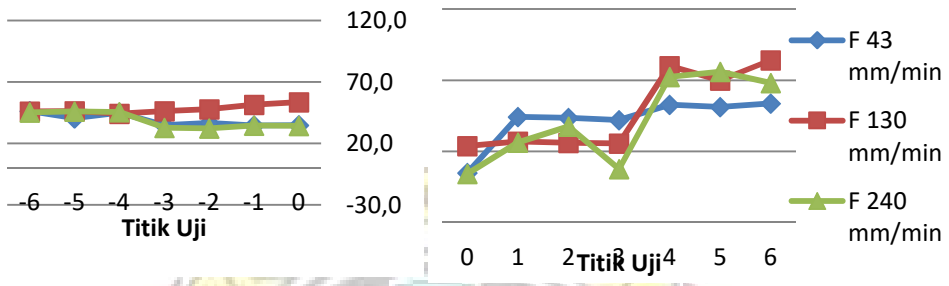
Gambar 4.21 Distribusi Nilai Kekerasan FSW *Tool* 2 untuk Putaran 1950 Rpm

Tabel 4.6. Nilai kekerasa n (HB) hasil pengelasan FSW material Alumunium AA 5052 dan AA 6061 untuk *Tool* 3 (*Pin Shoulder* Segitiga)

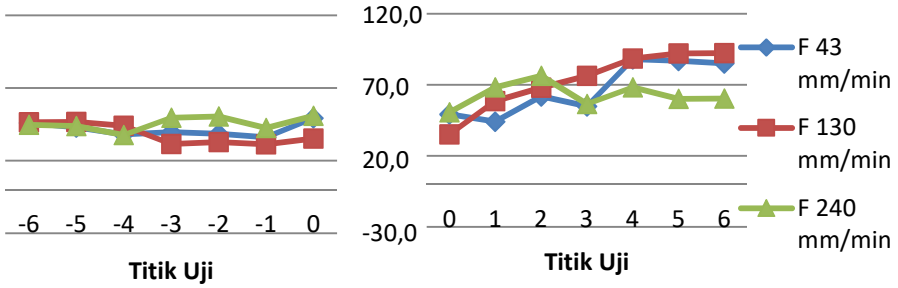
Daerah Las	Posisi dari titik nol	n (1300 Rpm)			n (1950 Rpm)			n (2850 Rpm)		
		Feeding (mm/min)			Feeding (mm/min)			Feeding (mm/min)		
		43	130	240	43	130	240	43	130	240
Logam Induk AA6061	6	83.7	114.0	98.1	85.0	92.2	60.3	85.0	84.7	90.0
	5	81.3	99.9	105.9	87.0	92.0	60.1	88.5	87.2	93.2
	4	82.9	110.0	102.3	88.0	88.5	68.2	82.1	80.9	92.1
	Rata-rata	82.6	108.0	102.1	86.7	90.9	62.9	85.2	84.3	91.8
HAZ	3	72.1	55.5	37.7	55.0	76.4	56.5	70.4	80.0	82.1
	2	73.5	56.0	67.5	62.0	68.0	76.4	60.4	67.9	79.0
	1	74.3	57.0	56.2	44.2	58.5	68.3	68.9	79.6	85.2
	Rata-rata	73.3	56.2	53.8	53.7	67.6	67.1	66.6	75.8	82.1
Nugget Zone	0	37.5	48.7	33.3	45.6	39.7	50.7	48.4	53.6	51.5
	0	33.7	55.0	33.5	52.3	34.9	51.1	36.8	55.0	56.4
	0	33.5	57.3	36.2	50.0	30.7	50.2	40.2	49.9	44.7
	Rata-rata	34.9	53.7	34.3	49.3	35.1	50.7	41.8	52.8	50.9
HAZ	-1	34.5	51.6	34.7	36.1	31.2	42.4	30.2	34.7	40.5
	-2	36.8	47.9	32.3	38.5	32.7	50.4	35.6	33.4	43.6
	-3	34.9	46.4	32.7	39.5	31.5	49.4	32.4	39.6	38.6
	Rata-rata	35.4	48.6	33.2	38.0	31.8	47.4	32.7	35.9	40.9
Logam Induk AA5052	-4	45.1	44.2	45.6	38.0	44.0	37.6	44.0	38.0	43.2
	-5	40.6	46.3	46.0	42.9	46.6	43.8	44.2	43.6	44.3
	-6	46.3	46.1	45.4	46.0	46.4	44.6	42.9	43.0	47.0
	Rata-rata	44.0	45.5	45.7	42.3	45.7	42.0	43.7	41.5	44.8

Sumber: Data Pengujian

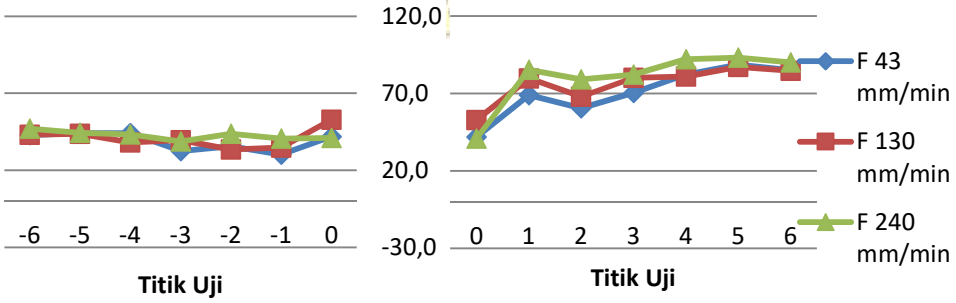
Adapun penyajian distribusi nilai kekerasan hasil pengelasan FSW material Alumunium AA 6061 untuk *tool* 3 dalam bentuk grafik didapatkan seperti gambar 4.22, 4.23, dan 4.24 berikut.



Gambar 4.22. Distribusi nilai kekerasan FSW *tool* 3 untuk putaran 1300 Rpm



Gambar 4.23. Distribusi nilai kekerasan FSW *tool* 3 untuk putaran 1950 Rpm



Gambar 4.24. Distribusi nilai kekerasan FSW *tool* 3 untuk putaran 2850 Rpm

Berdasarkan data pada tabel 4.4 4.5 dan 4.6 serta grafik pada gambar 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23, dan 4.24 distribusi kekerasan tiap spesimen dengan jarak titik pengujian ± 2 mm dari kiri dan dari kanan menuju pusat las dihasilkan kekerasan yang berbeda-beda.

1. Uji kekerasan dengan putaran 1300 Rpm, 1950 Rpm, 2850 Rpm dan *feeding* 43 mm/min, 130 mm/min, 240 mm/min dengan *tool pin shoulder* Silinder

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan spesimen pengelasan FSW dengan putaran, *feeding*, dengan *tool* pada tabel 4.3. dan grafik 4.16, 4.17, dan 4.18 menunjukan bahwa:

a. Kekerasan tertinggi untuk putaran 1300 Rpm terdapat pada *feeding* 130 mm/min terletak di logam induk (AA 6061) sebelah kanan logam las sebesar 112,0 HB. Kemudian untuk putaran 1950 Rpm kekerasan tertinggi terdapat pada *feeding* 130 mm/min terletak di logam induk (AA6061) sebelah kanan logam las sebesar 113.2 HB. Dan untuk putaran 2850 Rpm kekerasan tertinggi terdapat pada *feeding* 240 mm/min terletak di logam induk (AA6061) sebelah kanan logam las sebesar 107.3 HB. Jadi kekerasan tertinggi terjadi pada putaran 1950 Rpm dengan *feeding* 130 mm/min.

b. Kekerasan terendah untuk putaran 1300 Rpm terdapat pada *feeding* 43 mm/min terletak di *Nugget Zone* sebesar 33,1 HB. Kemudian untuk putaran 1950 Rpm kekerasan terendah terdapat pada *feeding* 43 mm/min terletak di *nugget zone* logam las sebesar 31.9 HB. Dan untuk putaran 2850 Rpm kekerasan terendah

terdapat pada *feeding* 240 mm/min terletak di *Nugget Zone* sebesar 30.9 HB. Jadi kekerasan terendah terjadi pada putaran 2850 Rpm dengan *feeding* 240 mm/min.

c. Pada daerah masing-masing HAZ AA 5052 dan AA6061 memiliki kekerasan tertinggi masing-masing putaran 1300 Rpm = 45, 5 HB dan 93,0 HB (F 240 dan 130 mm/min) masing masing bagian HAZ terjauh dari logam las (titik 3 dan titik -3) , 1950 Rpm = 48,7 HB dan 82,3 HB (F 240 dan 43 mm/min) bagian terjauh dari logam las (masing masing titik -1 dan 3) , 2850 Rpm = 46 ,6 HB dan 88,2 HB (F 43 dan 130 mm/min) bagian paling dekat dengan logam las dan bagian terjauh dengan logam las (titik -1 dan 3). Jadi kekerasan tertinggi pada daerah logam HAZ AA5052 terjadi pada putaran 1950 Rpm dengan *feeding 2*40 mm/min dan kekerasan tertinggi pada logam HAZ AA6061 terjadi pada putaran 1300 Rpm dan *feeding* 43 mm/min

Dari hasil analisa data tersebut di atas memperlihatkan bahwa kekerasan spesimen pengelasan *dissimilar FSW* alumunium AA 5052 dan aluminium AA6061 dengan putaran 1300 Rpm, 1950 Rpm, 2850 Rpm, dan *feeding* 45 mm/min, 90 mm/min, 135 mm/min dengan menggunakan *Tool* 2 (*Pin Shoulder* Ulir) yang tertinggi terletak di logam induk AA6061. Sedangkan kekerasan terendah terletak di HAZ AA5052, adapun kekerasan antara Nugget zone dengan dari HAZ AA5052 itu lebih keras nugget zone . Penurunan kekerasan di daerah HAZ AA5052 disebabkan karena karakteristik material itu sendiri juga disebabkan karena proses pengerasan daerah nugget zone sudah bercampur dengan kekerasa dari AA6061 makanya nugget zone lebih kerasa dari HAZ5052 yang tidak mengalami pengadukan dengan material

AA6061. Sedangkan distribusi kekerasan yang terjadi cenderung tidak merata baik pada logam las, daerah HAZ, dan logam induk yang kekerasannya tergantung pada panas yang didapatkan di masing-masing daerah saat proses pengelasan.

Dari semua variasi putaran dan *feeding* untuk *tool* 1 dapat diperoleh bahwa pada pengelasan FSW dissimilar alumunium AA 6061 dan aluminium AA 5052 distribusi kekerasannya relatif tidak merata di daerah logam las, daerah HAZ, dan logam induk. Dan yang memberikan kualitas kekerasan terbaik pada logam las terletak pada putaran 1300 Rpm dengan menggunakan *feeding* 130 mm/min dengan kekerasan 57.3HB.

2. Uji Kekerasan dengan putaran 1300 Rpm, 1950 Rpm, 2850 Rpm, dan *feeding* 43 mm/min, 130 mm/min, 240 mm/min dengan *Tool Pin Shouler* Ulir.

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan spesimen pengelasan FSW dengan putaran, *feeding*, dengan *tool Pin Shouler* Ulir pada tabel 4.4. dan grafik 4.19, 4.20, dan 4.21 menunjukan bahwa:

a. Kekerasan tertinggi untuk putaran 1300 Rpm terdapat pada *feeding* 130 mm/min terletak di logam induk AA6061 sebelah kanan logam las sebesar 82.5 HB. Kemudian untuk putaran 1950 Rpm kekerasan tertinggi terdapat pada *feeding* 130 mm/min terletak di logam induk AA6061 sebelah kiri logam las sebesar 93,5 HB. Dan untuk putaran 2850 Rpm kekerasan tertinggi terdapat pada *feeding* 130 mm/min terletak di logam induk AA6061 sebelah kiri logam las sebesar 105,3 HB. Jadi kekerasan tertinggi terjadi pada putaran 2850 Rpm dengan *feeding* 130 mm/min.

b. Kekerasan terendah untuk putaran 1300 Rpm terdapat pada *feeding* 43 mm/min terletak di *HAZ* AA5052 sebesar 34,3 HB. Kemudian untuk putaran 1950 Rpm kekerasan terendah terdapat pada *feeding* 43 mm/min terletak di HAZ AA5052 sebesar 29,3 HB. Dan untuk putaran 2850 Rpm kekerasan terendah terdapat pada *feeding* 240 mm/min terletak di *Nugget Zone* logam las sebesar 30,7 HB. Jadi kekerasan terendah terjadi pada putaran 1950 Rpm dengan *feeding* 43 mm/min.

c. Pada daerah masing-masing HAZ AA 5052 dan AA6061 memiliki kekerasan tertinggi masing-masing putaran 1300 Rpm = 40, 5 HB dan 81,1 HB (masing F 43 mm/min) bagian HAZ terjauh dari logam las dan yang terdekat (titik 3 dan titik -1) , 1950 Rpm = 43,4 HB dan 85,5 HB (F 43 dan 240 mm/min) bagian menengah dari logam las (masing masing titik 2 dan -2) , 2850 Rpm = 70 ,0 HB dan 82,1 HB (F 43 dan 240 mm/min) bagian paling dekat dengan logam las dan bagian terjauh dengan logam las (titik -1 dan 3). Jadi kekerasan tertinggi pada daerah logam HAZ AA5052 terjadi pada putaran 2850 Rpm dengan *feeding* 43 mm/min dan kekerasan tertinggi pada logam HAZ AA6061 terjadi pada putaran 1950 Rpm dan *feeding* 240 mm/min

Dari hasil analisa data tersebut di atas memperlihatkan bahwa kekerasan spesimen pengelasan *dissimilar FSW* alumunium AA 5052 dan aluminium AA6061 dengan putaran 1300 Rpm, 1950 Rpm, 2850 Rpm, dan *feeding* 45 mm/min, 90 mm/min, 135 mm/min dengan menggunakan *Tool* 2 (*Pin Shoulder* Ulir) yang tertinggi terletak di logam induk AA6061. Sedangkan kekerasan terendah terletak di HAZ AA5052, adapun kekerasan antara Nugget zone dengan

dari HAZ AA5052 itu lebih keras nugget zone . Penurunan kekerasan di daerah HAZ AA5052 disebabkan karena karakteristik material itu sendiri juga disebabkan karena proses pengerasan daerah nugget zone sudah bercampur dengan kekerasa dari AA6061 makanya nugget zone lebih kerasa dari HAZ5052 yang tidak mengalami pengadukan dengan material AA6061. Sedangkan distribusi kekerasan yang terjadi cenderung tidak merata baik pada logam las, daerah HAZ, dan logam induk yang kekerasannya tergantung pada panas yang didapatkan di masing-masing daerah saat proses pengelasan.

Dari semua variasi putaran dan *feeding* untuk *tool Pin* SegiTiga dapat diperoleh bahwa pada pengelasan dissimilar FSW alumunium AA 6061 dan Aluminium AA5052 distribusi kekerasannya relatif tidak merata di daerah logam las, daerah HAZ, dan logam induk. Dan yang memberikan kualitas kekerasan terbaik pada logam las terletak pada putaran 1300 Rpm dengan menggunakan *feeding* 240 mm/min.

3. Uji Kekerasan dengan putaran 1300 Rpm, 1950 Rpm, 2850 Rpm, dan *feeding* 43 mm/min, 130 mm/min, 240 mm/min dengan *Tool* 3 (*Pin Shouler* Segi Tiga)

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan spesimen pengelasan FSW dengan putaran, *feeding*, dengan *tool* 3 pada tabel 4.5. dan grafik 4.22, 4.23, dan 4.24 menunjukan bahwa:

a. Kekerasan tertinggi untuk putaran 1300 Rpm terdapat pada *feeding* 130 mm/min terletak di logam induk AA6061 sebelah kanan logam las sebesar 114,0 HB. Kemudian untuk putaran 1950 Rpm kekerasan tertinggi terdapat

pada *feeding* 130 mm/min terl etak di logam induk AA6061 sebelah kiri logam las sebesar 92,2 HB. Dan untuk putaran 2850 Rpm kekerasan tertinggi terdapat pada *feeding* 240 mm/min terletak di logam induk AA6061 sebelah kiri logam las sebesar 93,2 HB. Jadi kekerasan tertinggi terjadi pada putaran 2850 Rpm dengan *feeding* 130 mm/min.

b. Kekerasan terendah untuk putaran 1300 Rpm terdapat pada *feeding* 43 mm/min terletak di *HAZ* AA5052 sebesar 32,3 HB. Kemudian untuk putaran 1950 Rpm kekerasan terendah terdapat pada *feeding* 130 mm/min terletak di Nugget zone sebesar 30,7 HB. Dan untuk putaran 2850 Rpm kekerasan terendah terdapat pada *feeding* 43 mm/min terletak di *HAZ* AA5052 sebesar 30,2 HB. Jadi kekerasan terendah terjadi pada putaran 2850 Rpm dengan *feeding* 43 mm/min.

c. Pada daerah masing-masing HAZ AA 5052 dan AA6061 memiliki kekerasan tertinggi masing-masing putaran 1300 Rpm = 47,9 HB dan 74,3 HB (F 130 dan 43 mm/min) bagian HAZ menengah dan terdekat dari logam las dan yang terdekat (titik -2 dan titik 1) , 1950 Rpm = 50,4 HB dan 76,4 HB (F 240 dan 130 mm/min) bagian menengah dan terjauh dari logam las (masing masing titik -2 dan 3) , 2850 Rpm = 43,6 HB dan 85,2 HB (F 240 dan 240 mm/min) bagian menengah dengan logam las dan bagian terdekat dengan logam las (titik -2 dan 1). Jadi kekerasan tertinggi pada daerah logam HAZ AA5052 terjadi pada putaran 1950 Rpm dengan *feeding 2*40 mm/min dan kekerasan

tertinggi pada logam HAZ AA6061 terjadi pada putaran 2850 Rpm dan *feeding* 240 mm/min

Dari hasil analisa data tersebut di atas memperlihatkan bahwa kekerasan spesimen pengelasan *dissimilar FSW* alumunium AA 5052 dan aluminium AA6061 dengan putaran 1300 Rpm, 1950 Rpm, 2850 Rpm, dan *feeding* 45 mm/min, 90 mm/min, 135 mm/min dengan menggunakan *Tool* 2 (*Pin Shoulder* Ulir) yang tertinggi terletak di logam induk AA6061. Sedangkan kekerasan terendah terletak di HAZ AA5052, adapun kekerasan antara Nugget zone dengan dari HAZ AA5052 itu lebih keras nugget zone . Penurunan kekerasan di daerah HAZ AA5052 disebabkan karena karakteristik material itu sendiri juga disebabkan karena proses pengerasan daerah nugget zone sudah bercampur dengan kekerasa dari AA6061 makanya nugget zone lebih kerasa dari HAZ5052 yang tidak mengalami pengadukan dengan material AA6061. Sedangkan distribusi kekerasan yang terjadi cenderung tidak merata baik pada logam las, daerah HAZ, dan logam induk yang kekerasannya tergantung pada panas yang didapatkan di masing-masing daerah saat proses pengelasan.

Dari semua variasi putaran dan *feeding* untuk *tool* 2 (*Pin Shoulder* Segi Tiga) dapat diperoleh bahwa pada pengelasan dissimilar FSW alumunium AA 6061 dan Aluminium AA5052 distribusi kekerasannya relatif tidak merata di daerah logam las, daerah HAZ, dan logam induk. Dan yang memberikan kualitas kekerasan terbaik pada logam las terletak pada putaran 1300 Rpm dengan menggunakan *feeding* 130 mm/min.

4.5.2. Pengujian Kekuatan Tarik (σ_u)

Pengujian dilakukan dengan penggunaan spesimen, peralatan dan mesin *Universal Testing Machine* (UTM) dimana spesimen uji dilakukan pengujian merusak dengan menarik benda uji sampai putus. Proses pengujian tarik bertujuan untuk mengetahui sifat mekanis bahan diantaranya: kekuatan tarik, regangan, persentase pengecilan luas permukaan dan modulus elastis. Selain itu melalui pengujian tarik diketahui lokasi patah dan jenis patahan sambungan hasil pengelasan FSW material alumunium AA 5051 dan Aluminium AA 6061.

Pada saat pengujian berlangsung data-data seperti batas proposional, batas maksimum dan titik patah dapat terbaca pada jarum jam pengukur sedangkan grafik tegangan dan regangan didapatkan pada *plotter* mesin uji tarik UTM. Dalam pengujian tarik ini juga dilakukan pengamatan terhadap jenis patahan yang terjadi. Salah satu data pengujian tarik yang terdapat pada lampiran 4 untuk putaran 1950 Rpm, feeding 130 mm /min (1) dengan *tool* Ulir didapatkan data berikut:

- Gaya tarik maksimum (Fu) = 9000 N
- Lebar awal spesimen (Wo) = 14, 05 mm
- Tebal spesimen (To) = 5,4 mm
- Lebar spesimen setelah putus (Wi) = 13.9 mm
- Tebal spesimen setelah putus (Ti) = 5,35 mm
- Panjang awal (Lo) = 50 mm

- Panjang setelah putus (Li) = 51,3 mm

Berdasarkan data hasil pengujian diatas maka diperoleh sifat mekanis bahan sebagai berikut:

1. Kekuatan tarik pengelasan

Kekuatan tarik adalah kemampuan suatu material untuk tidak mengalami deformasi atau perubahan bentuk dari beban atau gaya tarik yang diberikan. Nilai kekuatan tarik dapat diperoleh dengan melakukan pengujian menggunakan mesin uji tarik.

Pada batas ini menunjukan beban yang mampu ditahan oleh benda uji sebelum patah. Kekuatan tarik adalah besarnya beban maksimun dibagi dengan luas permukaan awal benda uji.

$$\sigma_u = \frac{Fu}{Ao} \text{ (MPa)}$$

Dimana :

$A_o = w_o \times t_o$ (mm^2)

$A_o = 14,05 \times 5,4 = 75,87$ mm^2

Dari data pengujian tarik didapat:

$$\sigma_u = 9000 / 75,87 = 118,6 \text{ MPa}$$

2. **Regangan hasil pengelasan**

Regangan adalah persentase pertambahan panjang yang diperoleh dengan membagi pertambahan panjang setelah putus dengan panjang ukur mula-mula benda uji .

$$\varepsilon = \frac{\mathrm{Li}}{\mathrm{Lo}} x\ 100\%$$

=((51,3-50) ÷ 50) 100 % = 2,6 %

3. **Presentase pengecilan luas permukaan**

Pembebanan tarik dilakukan secara terus-menerus dengan menambahkan beban sehingga akan mengakibatkan perubahan bentuk pada benda uji berupa pertambahan panjang dan pengecilan permukaan benda uji dan akan mengakibatkan perpatahan. Persentase pengecilan yang terjadi dinyatakan dengan rumus sebagai berikut:

$$\mathrm{r} = \frac{\mathrm{A_0 - A_1}}{\mathrm{A_0}} x\ 100\%$$

Dimana,

Ao = Wo x To = 14,05 x 5,4 = 75,87 mm^2

Ai = Wi x Ti = 13,9 x 5,35 =74,365 mm^2

Sehingga,

r= ((75,87 – 74,365) ÷75,87) 100 %

= 1,98 %

4. **Modulus elastis (E)**

Pada batas ini menunjukan nilai kekakuan suatu material dan tingkat beban yang mampu ditahan oleh benda uji dengan deformasi yang elastis. Modulus elastis adalah besarnya kekuatan tarik maksimun dibagi regangan benda uji.

$$E = \frac{\sigma u}{\varepsilon} \quad \text{(MPa)}$$

Dari pengujian tarik didapatkan σ_u = 118,6 MPa dan regangan ε = 0,026, sehingga nilai modulus elastis dapat di peroleh dengan menggunakan persamaan diatas yaitu:

$$E = 118{,}6/0{,}026 = 4561{,}53 \text{ MPa}$$

Dengan menggunakan cara perhitungan yang sama. Hasil analisis selengkapnya untuk kekuatan tarik, regangan, *reduction area* dan modulus elastis dapat dilihat pada tabel 4.6, 4.7, dan 4.8 berikut ini.

Tabel 4.7. Hasil pengujian tarik spesimen hasil pengelasan FSW Alumunium AA 6061 untuk *Tool 1* (PS: silinder)

Putaran (Rpm)	Feeding (mm/min)	Sifat Mekanis				Jenis dan lokasi patah
		σ_u (MPa)	ε (%)	r (%)	E (MPa)	
1300	43 (1)	6.91	4.9	13.29	141.01	Patah getas & Nugget Zone
	43 (2)	85.19	4.4	4.47	1936.03	Patah getas & Nugget Zone
	Rata-rata	46.05	4.65	8.88	1038.52	
	130 (1)	122.02	8.3	26.5	1470.17	Patah getas & Nugget Zone
	130 (2)	125	13.6	29.23	919.12	Patah getas & Nugget Zone
	Rata-rata	123.51	10.95	27.86	1194.64	
	240 (1)					patah sebelum diuji
	240 (2)					patah sebelum diuji
	Rata-rata					
1950	43 (1)	45.37	16	3.51	283.59	Patah getas & Nugget Zone
	43 (2)	39.45	2.4	11.3	1643.66	Patah getas & Nugget Zone
	Rata-rata	42.41	9.2	7.41	963.62	
	130 (1)					patah sebelum diuji
	130 (2)	47.91	2.8	2.19	1711.14	HAZ
	Rata-rata	47.91	2.8	2.19	1711.14	
	240 (1)					patah sebelum diuji
	240 (2)	45.58	2	3.4	2278.91	HAZ
	Rata-rata	45.58	2	3.4	2278.91	
2850	43 (1)	61.64	4.9	13.66	1257.86	Patah getas & Nugget Zone
	43 (2)	77.66	7.6	7.48	1021.9	Patah getas & Nugget Zone
	Rata-rata	69.65	6.25	10.57	1139.88	
	130 (1)	70.6	1	4.39	7060.256	Patah getas & Nugget Zone
	130 (2)	53.72	2.4	3.11	2238.38	HAZ
	Rata-rata	62.16	1.7	3.75	4649.32	
	240 (1)	107.92	6.2	6.21	1740.62	HAZ
	240 (2)	127.38	5.8	9.04	2196.28	Patah getas & Nugget Zone
	Rata-rata	117.65	6	7.62	1968.45	

Sumber: Data Pengujian

Tabel 4.8. Hasil pengujian tarik spesimen hasil pengelasan FSW Alumunium AA 5052 dan Aluminium AA6061 untuk *Tool* 2 (Ps.Segi tiga)

Putaran (Rpm)	Feeding (mm/min)	Sifat Mekanis				Jenis dan lokasi patah
		σ_u (MPa)	ε (%)	r (%)	E (MPa)	
1300	43 (1)	44.93	1.4	10.71	3209.35	Patah Getas & bagian HAZ
	43 (2)	64.94	2.9	4.82	2239.14	Patah Getas & nugget zone
	Rata-rata	54.94	2.15	7.77	2724.25	
	130 (1)	112.09	2.4	8.06	4670.28	Patah Getas & bagian HAZ
	130 (2)	111.44	3.8	6.18	2932.7	Patah Getas & bagian HAZ
	Rata-rata	111.77	3.1	7.12	3801.49	
	240 (1)	121.53	3.4	3.44	3574.35	Patah Getas & bagian HAZ
	240 (2)	0	0	0	0	patah sebelum diuji
	Rata-rata	121.53	3.4	3.44	3574.35	
1950	43 (1)	65.88	3.8	3.56	1752.07	Patah Getas & bagian HAZ
	43 (2)	35.16	1. 8	6.34	1953.06	Patah Getas & nugget zone
	Rata-rata	50.52	2.8	4.95	1852.57	
	130 (1)	27.09	4	5.16	673.8	Patah Getas & bagian HAZ
	130 (2)	29.7	0.6	7.24	5304.21	Patah Getas & b agian HAZ
	Rata-rata	28.4	2.3	6.2	2989.01	
	240 (1)	112.22	2.8	4.4	4007.89	Patah Getas & bagian HAZ
	240 (2)	102.22	3.4	2.56	3006.57	Patah Getas & nugget zone
	Rata-rata	107.22	3.1	3.48	3507.23	
2850	43 (1)	88	9.8	3.06	897.96	Patah Getas & nugget zone
	43 (2)	44.89	3.6	1.31	1246.87	Patah Getas & nugget zone
	Rata-rata	66.45	6.7	2.19	1072.42	
	130 (1)	38.75	3.4	7.11	1139.79	Patah Getas & nugget zone
	130 (2)	38.38	3.2	5.97	1199.27	Patah Getas & bagian HAZ
	Rata-rata	38.57	3.3	6.54	1169.53	
	240 (1)	24.22	4.4	5.84	550.39	Patah Getas & nugget zone
	240 (2)	42.52	3.1	4.1	1371.74	Patah Getas & bagian HAZ
	Rata-rata	33.37	3.75	4.97	961.07	

Sumber: Data Pengujian

Tabel 4.9. Hasil pengujian tarik spesimen hasil pengelasan FSW Alumunium AA 6061 untuk *Tool* 3 (Ps.Ulir)

Putaran (Rpm)	Feeding (mm/min)	Sifat Mekanis				Jenis dan lokasi patah
		σ_u (MPa)	ε (%)	r (%)	E (MPa)	
1300	43 (1)	96.97	2.6	6.86	3729.6	Patah Getas & bagian HAZ
	43 (2)	111.81	2.4	3.77	4658.75	Patah Getas & bagian HAZ
	Rata-rata	104.39	2.5	5.32	4194.18	
	130 (1)	50.57	1	1.38	5074.82	Patah Getas & bagian HAZ
	130 (2)					Patah Sebelum Diuji
	Rata-rata	50.57	1	1.38	5074.82	
	240 (1)	88.91	1.4	3.14	6351.06	Patah Getas & bagian HAZ
	240 (2)	52.83	3	7.14	1761.04	Patah Getas & bagian HAZ
	Rata-rata	70.87	2.2	5.14	4056.05	
1950	43 (1)	84.03	3.8	8.83	2211.41	Patah Getas & nugget zone
	43 (2)					Patah Sebelum Diuji
	Rata-rata	84.03	3.8	8.83	2211.41	
	130 (1)	118.62	2.6	1.98	4562.46	Patah Getas & bagian HAZ
	130 (2)	111.75	2.8	2.07	3991.06	Patah Getas & bagian HAZ
	Rata-rata	115.19	2.7	2.03	4276.76	
	240 (1)	93.09	3.2	4.17	2909.06	Patah Getas & bagian HAZ
	240 (2)	130.04	7	4	1857.69	Patah Getas & bagian Logam induk AA5052
	Rata-rata	111.57	5.1	4.09	2383.38	
2850	43 (1)	44.6	2.2	2.96	2027.13	Patah Getas & nugget zone
	43 (2)	90.92	2	2.6	4546.08	Patah Getas & nugget zone
	Rata-rata	67.76	2.1	2.78	3286.61	
	130 (1)					Patah Sebelum Diuji
	130 (2)					Patah Sebelum Diuji
	Rata-rata					
	240 (1)	44.45	2.4	6.12	1852.18	Patah Getas & nugget zone
	240 (2)	58.82	2.6	7.64	2262.18	Patah Getas & bagian HAZ
	Rata-rata	51.64	2.5	6.88	2057.18	

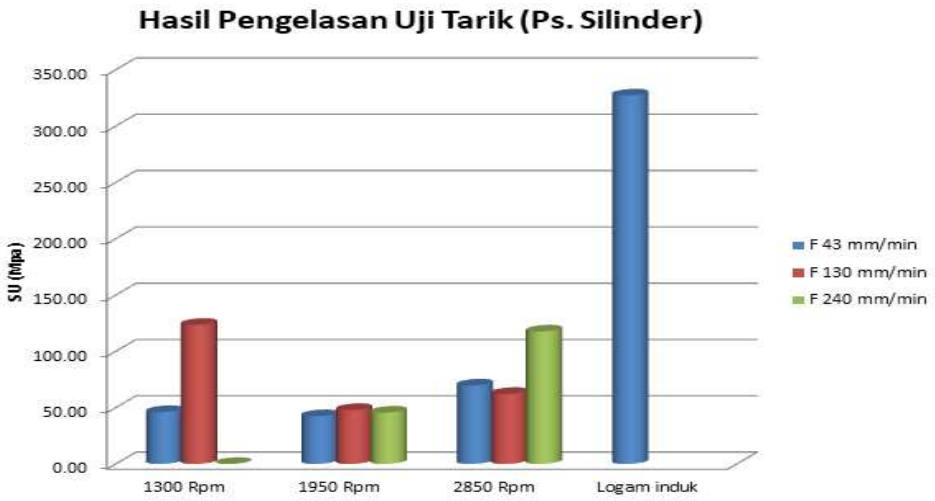
Sumber: Data Pengujian

Tabel 4.10. Persantase kekuatan tarik rata-rata spesimen hasil las FSW terhadap kekuatan tarik logam induk

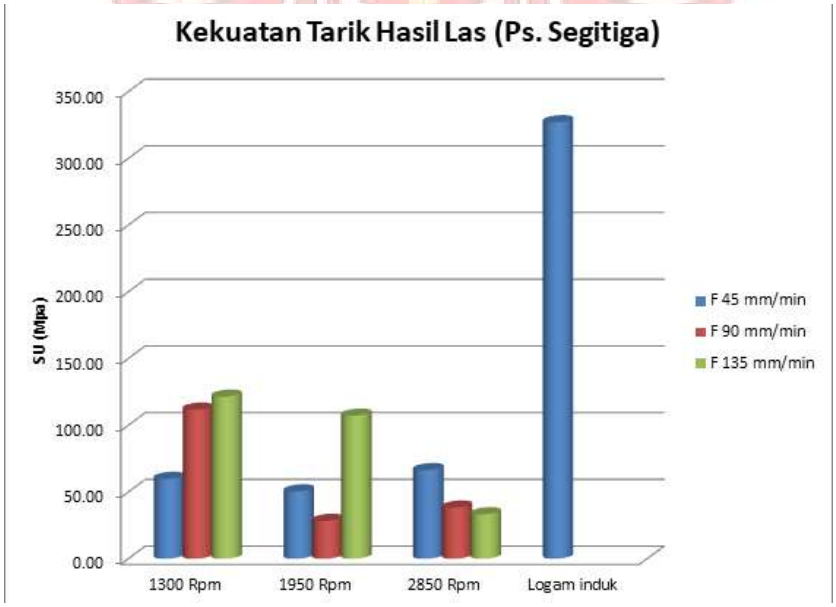
Tool	Putaran (Rpm)	Feeding (mm/min)	σu (MPa) Spesimen	σu (MPa) Logam Induk AA5052	Persentase (%)	σu (MPa) Logam Induk AA6061	Persentase (%)
Tool 1 (Silinder)	1300	43	147	172.49	85.22	301.68	48.73
		130	243.7	172.49	141.28	301.68	80.78
		240	55.1	172.49	31.94	301.68	18.26
	1950	43	183.6	172.49	106.44	301.68	60.86
		130	21.7	172.49	12.58	301.68	7.19
		240	78.9	172.49	45.74	301.68	26.15
	2850	43	115.2	172.49	66.79	301.68	38.19
		130	157.8	172.49	91.48	301.68	52.31
		240	159.3	172.49	92.35	301.68	52.80
Tool 2 (Segi Tiga)	1300	43	52.6	172.49	30.49	301.68	17.44
		130	165.1	172.49	95.72	301.68	54.73
		240	32.4	172.49	18.78	301.68	10.74
	1950	43	41.4	172.49	24.00	301.68	13.72
		130	0	172.49	0.00	301.68	0.00
		240	143.6	172.49	83.25	301.68	47.60
	2850	43	141.2	172.49	81.86	301.68	46.80
		130	152.8	172.49	88.58	301.68	50.65
		240	84.8	172.49	49.16	301.68	28.11
Tool 3 (Ulir)	1300	43	98.4	172.49	57.05	301.68	32.62
		130	178.6	172.49	103.54	301.68	59.20
		240	69	172.49	40.00	301.68	22.87
	1950	43	110.5	172.49	64.06	301.68	36.63
		130	128.5	172.49	74.50	301.68	42.59
		240	118.6	172.49	68.76	301.68	39.31
	2850	43	63.8	172.49	36.99	301.68	21.15
		130	94.6	172.49	54.84	301.68	31.36
		240	12	172.49	6.96	301.68	3.98

Sumber: Data Pengujian

Adapun penyajian nilai kekuatan tarik hasil pengelasan dissimilar FSW material Alumunium AA 5052 dan Aluminium AA6061 untuk *tool* 1, *tool* 2, dan *tool* 3 dalam bentuk diagram batang didapatkan seperti gambar 4.25,4.26,4.27 berikut ini.



Gambar 4.25. Diagram nilai kekuatan tarik hasil pengelasan FSW *tool* 1



Gambar 4.26. Diagram nilai kekuatan tarik hasil pengelasan FSW *tool* 2

Gambar 4.27. Diagram nilai kekuatan tarik hasil pengelasan FSW *tool* 3

Berdasarkan hasil pengujian tarik yang terdapat pada tabel 4.5, 4.6, dan 4.7 serta diagram pada gambar 4.25, 4.26, dan 4.27 dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Pengujian tarik dengan putaran 1300 Rpm, 1950 Rpm, 2850 Rpm, dan *feeding* 43 mm/min, 130 mm/min, 240 mm/min dengan menggunakan *Tool* 1 (Ps: silinder).

a. Kekuatan tarik rata-rata tertinggi untuk putaran 1300 Rpm terdapat pada *feeding* 130 mm/min sebesar 123,31 MPa dengan regangan sebesar 10.95 %, reduksi permukaan sebesar 27,86 %, modulus elastis sebesar 1194,64 MPa, dan patah yang terjadi ialah *spesimen* pertama patah getas di logam las sedangkan *spesimen* kedua patah di HAZ dekat logam induk. Kemudian untuk putaran 1950 Rpm kekuatan tarik rata-rata tertinggi terdapat pada *feeding* 130 mm/min sebesar 47,91 MPa dengan regangan sebesar 2,8%, reduksi permukaan sebesar 2,19%, modulus

elastis sebesar 1711,14 MPa, dan jenis patahan ialah *spesimen* pertama patah getas di di bagian HAZ bgitupun speimen kedua. Untuk putaran 2850 Rpm kekuatan tarik rata-rata tertinggi terdapat pada *feeding* 240 mm/min sebesar 117,65 MPa dengan regangan sebesar 6%, reduksi permukaan sebesar 7,65 %, modulus elastis sebesar 1968,45 MPa, dan jenis patahan ialah ialah *spesimen* pertama patah getas di daerah logam HAZ sedangkan *spesimen* kedua patah di logam las. Jadi kekuatan tarik rata-rata terbesar terdapat pada putaran 1300 Rpm dengan *feeding* 130 mm/min dengan presentase nilai kekuatan tarik sebesar 48,9% dari kekuatan tarik logam induk.

h. Kekuatan tarik rata-rata terendah untuk putaran 1300 Rpm terdapat pada *feeding* 43 mm/min sebesar 46 MPa dengan regangan sebesar 4,65 %, reduksi permukaan sebesar 8,88 %, modulus elastis sebesar 1038,52 MPa, dan patah yang terjadi ialah patah getas di logam las untuk kedua *spesimen* percobaan. Kemudian untuk putaran 1950 Rpm kekuatan tarik rata-rata terendah terdapat pada *feeding* 43 mm/min sebesar 42,41 MPa dengan regangan sebesar 9,20 %, reduksi permukaan sebesar 7,41 %, modulus elastis sebesar 963,62 MPa, dan jenis patahan ialah patah getas di logam las untuk kedua *spesimen* percobaan. Untuk putaran 2850 Rpm kekuatan tarik rata-rata terendah terdapat pada *feeding* 130 mm/min sebesar 62,16 MPa dengan regangan sebesar 1,70 %, reduksi permukaan sebesar 3,75 %, modulus elastis sebesar 4649,45 MPa, dan jenis patahan ialah patah getas di logam las. Jadi kekuatan tarik rata-rata terendah terdapat pada putaran 1950 Rpm dengan

feeding 43 mm/min dengan presentase kekuatan tarik sebesar 82,47 % darikekuatan tarik logam induk.

Dari hasil analisa data tersebut di atas dapat diketahui bahwa pengelasan dissimilar FSW alumunium AA 5052 dan Aluminium AA6061 dengan variasi putaran 1300 Rpm, 1950 Rpm, 2850 Rpm, dan *feeding* 43 mm/min, 130 mm/min, 240 mm/min dengan menggunakan *tool* 1 (Ps: silinder) memiliki nilai kekuatan tarik rata-rata maksimum yang berbeda tiap putaran dan *feeding*, dimana kekuatan tarik mengalami penurunan kekuatan dari kekuatan tarik logam induk. Kekuatan tarik terendah terdapat pada putaran 1950 Rpm dengan *feeding* 43 mm/min. Penururunan kekuatan terjadi dengan cenderung pada kecepatan pengelasan dan *feeding* yang rendah, karena pada putaran dan *feeding* yang rendah pengadukan dan penyatuan material yang disambung tidak menyatu secara optimal akibat pergerakan *tool* yang terlalu lambat, sehingga mengakibatkan kedua logam tidak dapat tersambung dengan sempurna. Selain itu dengan kecepatan pengelasan yang lambat menghasilkan cacat las di permukaan logam las berupa retakan dan lubang kecil sehingga luas permukaan daerah pengelasan berkurang yang menyebabkan kekuatan tarik menurun hampir setengah dari kekuatan tarik logam induk.

Dari hasil analisa data dapat disimpulkan berdasarkan nilai kekuatan tarik dan regangan hasil pengujian tidak terdapat nilai putaran dan *feeding* yang baik digunakan untuk pengelasan dissimilar FSW pada alumunium AA5052 dan Aluminium AA6061 karena semua hasil percobaan, kekuatan tariknya mengalami penurunan dari logam induk. Namun untuk nilai putaran dan *feeding*

yang dapat memberikan nilai kekuatan tarik tebesar dan patahan berada di logam induk *pin shouder* silinder dapat digunakan putaran 1300 Rpm dengan *feeding* 130 mm/min.

2. Pengujian tarik dengan putaran 1300 Rpm, 1950 Rpm, 2850 Rpm, dan *feeding* 43 mm/min, 130 mm/min, 240 mm/min dengan menggunakan *Tool* 2 (Ps: Segi tiga).

a. Kekuatan tarik rata-rata tertinggi untuk putaran 1300 Rpm terdapat pada *feeding* 130 mm/min sebesar 111,77 MPa dengan regangan sebesar 3,10 %, reduksi permukaan sebesar 7,12 %, modulus elastis sebesar 3801,49 MPa, dan patah yang terjadi ialah kedua *spesimen* patah di logam HAZ. Kemudian untuk putaran 1950 Rpm kekuatan tarik rata-rata tertinggi terdapat pada *feeding* 240 mm/min sebesar 107,22 MPa dengan regangan sebesar 3,10 %, reduksi permukaan sebesar 3,48 %, modulus elastis sebesar 3507,23 MPa, dan jenis patahan ialah keduan *spesimen* patah getas di logam HAZ dan di logam las. Untuk putaran 2850 Rpm kekuatan tarik rata-rata tertinggi terdapat pada *feeding* 43 mm/min sebesar 66,45 MPa dengan regangan sebesar 6,70 %, reduksi permukaan sebesar 2,19 %, modulus elastis sebesar 1072,42 MPa, dan jenis patahan ialah ialah kedua *spesimen* patah getas di daerah logam las. Jadi kekuatan tarik rata-rata terbesar terdapat pada putaran 1300 Rpm dengan *feeding* 43 mm/min dengan presentase nilai kekuatan tarik sebesar 56,85 % dari kekuatan tarik logam induk.

b. Kekuatan tarik rata-rata terendah untuk putaran 1300 Rpm terdapat pada *feeding* 43 mm/min sebesar 54,34 MPa dengan regangan sebesar 2,15 %, reduksi

permukaan sebesar 7,77 %, modulus elastis sebesar 2724,25 MPa, dan patah yang terjadi ialah patah getas di logam HAZ untuk kedua *spesimen* percobaan. Kemudian untuk putaran 1950 Rpm kekuatan tarik rata-rata terendah terdapat pada *feeding* 130 mm/min sebesar 28,40 MPa dengan regangan sebesar 2,30 %, reduksi permukaan sebesar 6,20 %, modulus elastis sebesar 2989, 01 MPa, dan jenis patahan ialah patah getas di logam HAZ untuk kedua *spesimen* percobaan. Untuk putaran 2850 Rpm kekuatan tarik rata-rata terendah terdapat pada *feeding 240* mm/min sebesar 33,37 MPa dengan regangan sebesar 3,75 %, reduksi permukaan sebesar 4,97 %, modulus elastis sebesar 961,07 MPa, dan jenis patahan ialah patah getas di logam las untuk kedua *spesimen* percobaan. Jadi kekuatan tarik rata-rata terendah terdapat pada putaran 1950 Rpm dengan *feeding* 130 mm/min dengan presentase kekuatan tarik sebesar 52,38 % darikekuatan tarik logam induk.

Dari hasil analisa data tersebut di atas dapat diketahui bahwa pengelasan *friction stir welding* alumunium AA 6061 dengan variasi putaran 1300 Rpm, 1950 Rpm, 2850 Rpm, dan *feeding* 43 mm/min, 130 mm/min, 240 mm/min dengan menggunakan *tool* 2 (Ps: Segi Tiga) memiliki nilai kekuatan tarik rata-rata maksimum yang berbeda tiap putaran dan *feeding*, dimana kekuatan tarik mengalami penurunan kekuatan dari kekuatan tarik logam induk. Kekuatan tarik terendah terdapat pada putaran 1950 Rpm dengan *feeding* 130 mm/min. Penururunan kekuatan terjadi dengan cenderung pada kecepatan pengelasan dan *feeding* yang tinggi, karena pada putaran dan *feeding* yang tinggi pengadukan dan penyatuan material yang

disambung tidak menyatu secara optimal akibat pergerakan *tool* yang terlalu cepat, sehingga mengakibatkan kedua logam tidak dapat tersambung dengan sempurna. Selain itu dengan kecepatan pengelasan yang tinggi menghasilkan cacat las di permukaan logam las berupa retakan dan lubang kecil sehingga luas permukaan daerah pengelasan berkurang yang menyebabkan kekuatan tarik menurun hamper setengah dari kekuatan tarik logam induk.

Dari hasil analisa data dapat disimpulkan berdasarkan nilai kekuatan tarik dan regangan hasil pengujian tidak terdapat nilai putaran dan *feeding* yang baik digunakan untuk pengelasan dissimilar FSW pada alumunium AA5052 dan Aluminium AA6061 karena semua hasil percobaan kekuatan tariknya mengalami penurunan dari logam induk. Namun untuk nilai putaran dan *feeding* yang dapat memberikan nilai kekuatan tarik tebesar dan patahan berada di logam induk *pin shouder* Segi Tiga dapat digunakan putaran 1300 Rpm dengan *feeding* 43 mm/min.

3. Pengujian tarik dengan putaran 1300 Rpm, 1950 Rpm, 2850 Rpm, dan *feeding* 43 mm/min, 130 mm/min, 240 mm/min dengan menggunakan *Tool* 3 (Ps: Ulir).

a. Kekuatan tarik rata-rata tertinggi untuk putaran 1300 Rpm terdapat pada *feeding* 43 mm/min sebesar 104,39 MPa dengan regangan sebesar 2,50 %, reduksi permukaan sebesar 5,32 %, modulus elastis sebesar 4194,18 MPa, dan patah yang terjadi ialah kedua *spesimen* patah getas di logam HAZ. Kemudian untuk putaran 1950 Rpm kekuatan tarik rata-rata tertinggi terdapat pada *feeding* 130 mm/min sebesar 115,19 MPa dengan regangan sebesar 2,70 %, reduksi permukaan sebesar 2,03 %, modulus elastis sebesar 4276,76 MPa, dan jenis

patahan ialah kedua *spesimen* patah getas di logam HAZ. Untuk putaran 2850 Rpm kekuatan tarik rata-rata tertinggi terdapat pada *feeding* 43 mm/min sebesar 67,26 MPa dengan regangan sebesar 2,10 %, reduksi permukaan sebesar 2,78 %, modulus elastis sebesar 3286,61 MPa, dan jenis patahan ialah ialah kedua *spesimen* patah getas di daerah logam las. Jadi kekuatan tarik rata-rata terbesar terdapat pada putaran 1950 Rpm dengan *feeding* 130 mm/min dengan presentase nilai kekuatan tarik sebesar 88,26 % dari kekuatan tarik logam induk.

b. Kekuatan tarik rata-rata terendah untuk putaran 1300 Rpm terdapat pada *feeding* 130 mm/min sebesar 50,57 MPa dengan regangan sebesar 1 %, reduksi permukaan sebesar 1,38 %, modulus elastis sebesar 5074,82 MPa, dan patah yang terjadi ialah patah getas di logam HAZ untuk kedua *spesimen* percobaan. Kemudian untuk putaran 1950 Rpm kekuatan tarik rata-rata terendah terdapat pada *feeding* 43 mm/min sebesar 84,03 MPa dengan regangan sebesar 3,80 %, reduksi permukaan sebesar 8,83 %, modulus elastis sebesar 2211,41 MPa, dan jenis patahan ialah patah getas di logam las untuk kedua *spesimen* percobaan. Untuk putaran 2850 Rpm kekuatan tarik rata-rata terendah terdapat pada *feeding* 130 mm/min karena kedua spesimen patah sebelum diuji maka nilai datanya 0. jenis patahan ialah patah getas di logam las. Jadi kekuatan tarik rata-rata terendah terdapat pada putaran 2850 Rpm dengan *feeding* 130 mm/min dengan presentase kekuatan tarik sebesar 84,06% darikekuatan tarik logam induk.

Dari hasil analisa data tersebut di atas dapat diketahui bahwa pengelasan *dissimilar friction stir welding* alumunium AA5052 dan Aluminium AA6061 dengan

variasi putaran 1300 Rpm, 1950 Rpm, 2850 Rpm, dan *feeding* 43 mm/min, 130 mm/min, 240 mm/min dengan menggunakan *tool* 3 (Ps: Ulir) memiliki nilai kekuatan tarik rata-rata maksimum yang berbeda putaran dan *feeding*, dimana kekuatan tarik mengalami penurunan kekuatan dari kekuatan tarik logam induk. Kekuatan tarik terendah terdapat pada putaran 2850 Rpm dengan *feeding* 130 mm/min. Penururunan kekuatan terjadi dengan cenderung pada kecepatan pengelasan dan *feeding* yang tinggi, karena pada putaran dan *feeding* yang tinggi pengadukan dan penyatuan material yang disambung tidak menyatu secara optimal akibat pergerakan *tool* yang terlalu cepat sehingga mengakibatkan kedua logam tidak dapat tersambung dengan sempurna. Selain itu dengan kecepatan pengelasan yang tinggi menghasilkan cacat las di permukaan logam las berupa retakan dan lubang kecil sehingga luas permukaan daerah pengelasan berkurang yang menyebabkan kekuatan tarik menurun setengah dari kekuatan tarik logam induk.

Dari hasil analisa data dapat disimpulkan berdasarkan nilai kekuatan tarik dan regangan hasil pengujian tidak terdapat nilai putaran dan *feeding* yang baik digunakan untuk pengelasan dissimilar FSW pada alumunium AA5052 dan Aluminium AA6061 karena semua hasil percobaan, kekuatan tariknya mengalami penurunan dari logam induk. Namun untuk nilai putaran dan *feeding* yang dapat memberikan nilai kekuatan tarik tebesar *pin shouder* Diameter dapat digunakan putaran 1950 Rpm dengan *feeding* 130 mm/min.

4.5.3 Pengujian Kekuatan Lentur (σ_b)

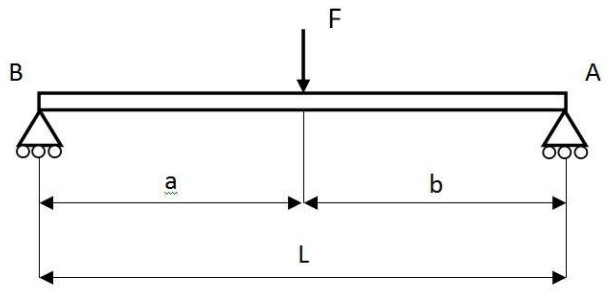
Uji lentur merupakan salah satu bentuk pengujian untuk menentukan mutu suatu material secara visual. Selain itu uji lentur juga digunakan untuk mengukur kekuatan material akibat pembebanan dan kekenyalan hasil sambungan las baik di logam las maupun HAZ.

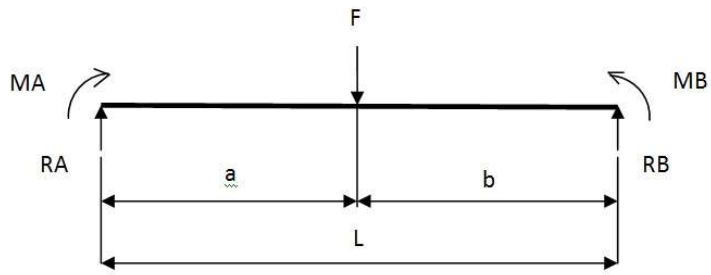
Pelengkungan (*bending*) merupakan proses pembebanan terhadap suatu bahan pada suatu titik ditengah-tengah dari bahan yang ditahan diatas dua tumpuan. Dengan pembebanan ini bahan akan mengalami deformasi dengan dua buah gaya yang berlawanan bekerja pada saat yang bersamaan. Pada saat batang uji diberi beban sampai sebelum batang uji itu patah maka akan terjadi tegangan pada batang uji. Tegangan yang terjadi disebut dengan tegangan lentur, yaitu perbandingan antara momen lentur dengan luas momen tahanan lentur benda uji (spesimen).

$$\sigma b = \frac{Mb}{W} \text{ (MPa)}$$

Dari tabel hasil pengujian lentur sampel hasil pengelasan FSW Alumunium AA 5052 yang terdapat pada lampiran 5 untuk spesimen n: 855 Rpm, F: 50 mm/min (1) *face Bend* dengan *tool* 1 (Ds 17.8 mm) dapat di peroleh besar tegangan lentur (σb) sebagai berikut :

a. Reaksi Tumpuan





Σ MA = 0

RB.L – F.a = 0

RB.L = F.a

$$RB = \frac{F.a}{L}$$

RB

$$= \frac{800 \text{ x } 43.87}{87.74}$$

= 400 N

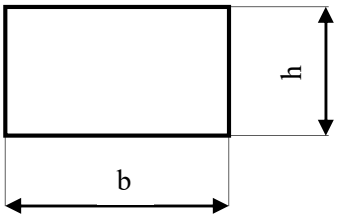
Karena pembebanan sentries maka RA = RB = 400 N

b. Momen Lentur (Mb)

Mb= RB x b

= 400 x 43.5 = 17400 N.mm

c. Momen Tahanan (W)



$$W = \frac{b\ x\ h^2}{6}$$

$$= \frac{20.27\ x\ 5.37^2}{6} = 97.4\ \text{mm}^3$$

d. Tegangan Lentur

$$\sigma b = \frac{Mb}{W} = \frac{17400}{97.4} = 178.64\ \text{MPa}$$

Dengan menggunakan cara perhitungan yang sama. Hasil analisis selengkapnya untuk kekuatan lentur *face* dan root *bending* dapat dilihat pada tabel 4.10, 4.11, 4.12 dan 4.13 berikut ini.

Tabel 4.11. Kekuatan lentur dan kondisi sisi lengkungan hasil uji lentur (*face bend*) hasil pengelasan dissimilar FSW alumunium AA 5052 dan AA6061 untuk *Tool* 1 (Ps. silinder)

Putaran (Rpm)	Feeding (mm/min)	σb (MPa) Spesimen	Sisi luar Lengkungan	Hasil
1300	43	147	Tidak Patah	Baik
	130	243.7	Tidak Patah	Baik
	240	55.1	Patah	Tidak Baik
1950	43	183.6	Crack	Tidak Baik
	130	21.7	Patah	Tidak Baik
	240	78.9	Patah	Tidak Baik
2850	43	115.2	Patah	Tidak Baik
	130	157.8	Crack	Tidak Baik
	240	159.3	Tidak Patah	Baik

Sumber: Data Pengujian

Tabel 4.12. Kekuatan lentur dan kondisi sisi lengkungan hasil uji lentur (*face bend*) hasil pengelasan dissimilar FSW alumunium AA 5052 dan AA6061 untuk *Tool* 2 (Ps. Segi Tiga)

Putaran (Rpm)	Feeding (mm/min)	σb (MPa) Spesimen	Sisi luar Lengkungan	Hasil
1300	43	52.6	Patah	Tidak Baik
	130	165.1	Tidak Patah	Baik
	240	32.4	Patah	Tidak Baik
1950	43	41.4	Patah	Tidak Baik
	130	0	Patah	Tidak Baik
	240	143.6	Tidak Patah	Baik
2850	43	141.2	Patah	Tidak Baik
	130	152.8	Crack	Tidak Baik
	240	84.8	Crack	Tidak Baik

Sumber: Data Pengujian

Tabel 4.13. Kekuatan lentur dan kondisi sisi lengkungan hasil uji lentur (*face bend*) hasil pengelasan dissimilar FSW alumunium AA 5052 dan AA6061 untuk *Tool* 3 (Ps. Ulir)

Putaran (Rpm)	Feeding (mm/min)	σb (MPa) Spesimen	Sisi luar Lengkungan	Hasil
1300	43	98.4	Patah	Baik
	130	178.6	Tidak Patah	Tidak Baik
	240	69	Patah	Tidak Baik
1950	43	110.5	Patah	Tidak Baik
	130	128.5	Patah	Tidak Baik
	240	118.6	Patah	Tidak Baik
2850	43	63.8	Patah	Tidak Baik
	130	94.6	Patah	Tidak Baik
	240	12	Patah	Tidak Baik

Sumber: Data Pengujian

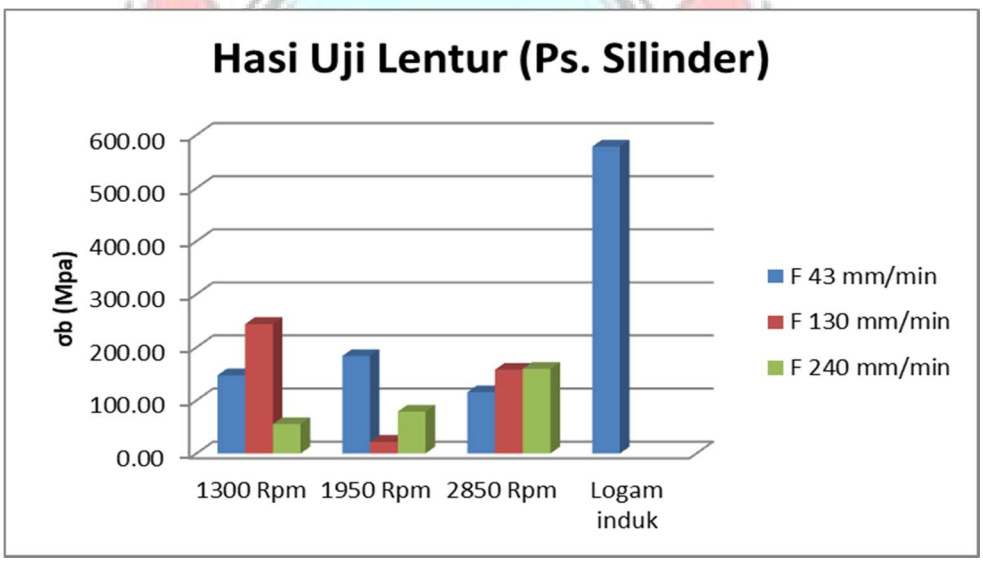
Tabel 4.14. Persentase kekuatan lentur rata-rata spesimen hasil las FSW terhadap kekuatan lentur logam induk

Tool	Putaran (Rpm)	Feeding (mm/min)	σb (MPa) Spesimen	σb (MPa) Logam Induk	Persentase (%)
Tool 1 (Silinder)	1300	43	147	356.11	41.28
		130	243.7	356.11	68.43
		240	55.1	356.11	15.47
	1950	43	183.6	356.11	51.56
		130	21.7	356.11	6.09
		240	78.9	356.11	22.16
	2850	43	115.2	356.11	32.35
		130	157.8	356.11	44.31
		240	159.3	356.11	44.73
Tool 2 (Segi Tiga)	1300	43	52.6	356.11	14.77
		130	165.1	356.11	46.36
		240	32.4	356.11	9.1
	1950	43	41.4	356.11	11.63
		130	0	356.11	0
		240	143.6	356.11	40.32
	2850	43	141.2	356.11	39.65
		130	152.8	356.11	42.91
		240	84.8	356.11	23.81

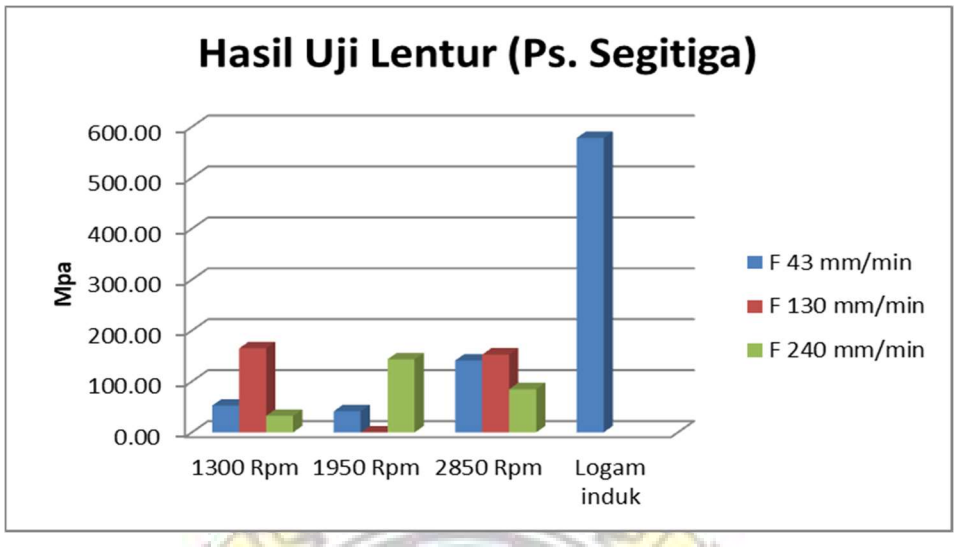
Tool 3 (Ulir)	1300	43	98.4	356.11	27.63
		130	178.6	356.11	50.15
		240	69	356.11	19.38
	1950	43	110.5	356.11	31.03
		130	128.5	356.11	36.08
		240	118.6	356.11	33.3
	2850	43	63.8	356.11	17.92
		130	94.6	356.11	26.56
		240	12	356.11	3.37

Sumber: Data Pengujian

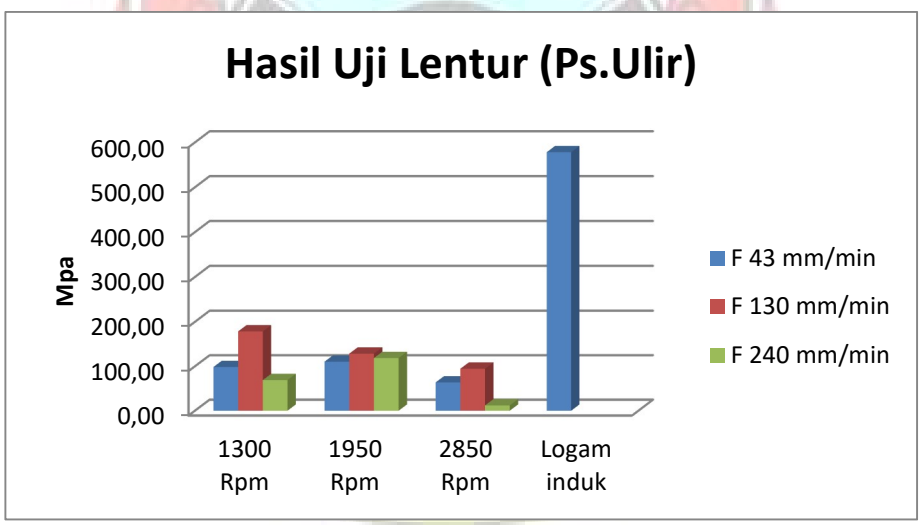
Adapun pennyajian nilai kekuatan lentur (*fece bend*) hasil pengelasan dissimilar FSW material Alumunium AA5052 dan Aluminium AA6061 dalam bentuk diagram batang didapatkan seperti gambar 4.28, 4.29, dan 4.30 berikut.



Gambar 4.28. Diagram nilai kekuatan lentur (*face bend*) hasil pengelasan FSW *tool* 1



Gambar 4.29. Diagram nilai kekuatan lentur (*face bend*) hasil pengelasan FSW *tool* 2



Gambar 4.30. Diagram nilai kekuatan lentur (*face bend*) hasil pengelasan FSW *tool* 3

Berdasarkan hasil pengujian lentur (*face bend*) yang terdapat pada tabel 4.11, 4.12, dan 4.13 serta grafik pada gambar 4.28, 4.29, dan 4.30 untuk pengelasan FSW *Tool* 1, *Tool* 2, dan *Tool* 3 menunjukan bahwa:

1. Pengujian lentur pada posisi *face bend* untuk putaran 1300 Rpm, 1950 Rpm, 2850 Rpm, dan *feeding* 43 mm/min, 130 mm/min, dan 1240 mm/min dengan menggunakan *tool* 1 (Ps: silinder).

   Pada pengujian lentur dengan *face bend* yang dilakukan dengan jarak tumpuan 87 mm dan sudut tekukan 180°, menunjukan semua spesimen yang telah diuji ada yang mengalami keretakan dan tidak mengalami keretakan pada bagian logam las. Dengan tiga variasi putaran dan *feeding* yang diberikan, putaran 1300 Rpm dengan *feeding* 130 mm/min memiliki nilai tegangan lentur tertinggi sebesar 243.00 MPa dengan tidak terjadi patahan di logam las dan terendah terdapat pada *feeding* 240 mm/min sebesar 55.10 MPa dengan terjadi patahan di logam las. Kemudian putaran 1950 Rpm nilai tegangan lentur tertinggi terdapat pada *feeding* 43 mm/min sebesar 183.60 MPa dengan tidak terjadi patahan di logam las dan terendah terdapat pada *feeding* 130 mm/min sebesar 21.70 MPa dengan terjadi retakan di logam las. Untuk putaran 2850 Rpm memiliki nilai tegangan lentur tertinggi terdapat pada *feeding* 240 mm/min sebesar 1159.30 MPa dengan terjadi patahan di logam las dan terendah terdapat pada *feeding 240* mm/min sebesar 115.20 MPa dengan patahan terjadi di logam las.

   Jadi, dapat diambil kesimpulan bahwa untuk *tool* 1 (Ps: silinder) putaran 1300 Rpm dengan *feeding* 130 mm/min memiliki nilai tegangan lentur terbesar, karena dapat menahan beban reaksi tumpuan yang lebih besar terhadap gaya yang diberikan, dibandingkan dengan putaran 43 Rpm dan 240 Rpm.

2. Pengujian lentur pada posisi *face bend* untuk putaran 1300 Rpm, 1950 Rpm, 2850 Rpm, dan *feeding* 43 mm/min, 130 mm/min, dan 240 mm/min dengan menggunakan *Tool* 2 (Ps: Segi Tiga).

Pada pengujian lentur dengan *face bend* yang dilakukan dengan jarak tumpuan 87 mm dan sudut tekukan 180°, menunjukan semua spesimen yang telah diuji ada yang mengalami dan tidak mengalami keretakan/patah pada bagian logam las. Dengan tiga variasi putaran dan *feeding* yang diberikan, putaran 1300 Rpm dengan *feeding 130* mm/min memiliki nilai tegangan lentur tertinggi sebesar 165 MPa dengan tidak terjadi perpatahan di logam las dan terendah terdapat pada *feeding* 240 mm/min sebesar 32.40 MPa dengan terjadi perpatahan di logam las. Kemudian putaran 1950 Rpm nilai tegangan lentur tertinggi terdapat pada *feeding* 240 mm/min sebesar 143,60 MPa dengan tidak terjadi perpatahan di logam las dan terendah terdapat pada *feeding* 43 mm/min sebesar 41,40 MPa dengan terjadi perpatahan di logam las. Untuk putaran 2850 Rpm memiliki nilai tegangan lentur tertinggi terdapat pada *feeding* 130 mm/min sebesar 152.80 MPa dengan terjadi perpatahan di logam las dan terendah terdapat pada *feeding* 240 mm/min sebesar 84,80 MPa dengan perpatahan terjadi di logam las.

Sehingga disimpulkan bahwa hasil pengelasan dissimilar FSW Aluminium AA5052 dan Aluminium AA6061 menggunakan tool 2 (Ps. Segi Tiga) yang memiliki kekuatan lentur tertinggi yaitu terdapat pada putaran 1300 Rpm dengan feeding 130 mm/min dibandingkan putaran dan feeding lainnya.

3. Pengujian lentur pada posisi *face bend* untuk putaran 1300 Rpm, 1950 Rpm, 2850 Rpm, dan *feeding* 43 mm/min, 130 mm/min, dan 240 mm/min dengan menggunakan *Tool* 3 (Ps: Ulir).

Pada pengujian lentur dengan *face bend* yang dilakukan dengan jarak tumpuan 87 mm dan sudut tekukan 180°, menunjukan semua spesimen yang telah diuji ada yang mengalami dan tidak mengalami keretakan/patah pada bagian logam las. Dengan tiga variasi putaran dan *feeding* yang diberikan, putaran 1300 Rpm dengan *feeding* 130 mm/min memiliki nilai tegangan lentur tertinggi sebesar 178.60 MPa dengan tidak terjadi perpatahan di logam las dan terendah terdapat pada *feeding* 240 mm/min sebesar 69,00 MPa dengan terjadi perpatahan di logam las. Kemudian putaran 1950 Rpm nilai tegangan lentur tertinggi terdapat pada *feeding* 130 mm/min sebesar 128.50 MPa dengan terjadi perpatahan di logam las dan terendah terdapat pada *feeding* 43 mm/min sebesar 110,50 MPa dengan terjadi perpatahan di logam las. Untuk putaran 2850 Rpm memiliki nilai tegangan lentur tertinggi terdapat pada *feeding* 130 mm/min sebesar 94,60 MPa dengan terjadi perpatahan di logam las dan terendah terdapat pada *feeding* 240 mm/min sebesar 12,00 MPa dengan perpatahan terjadi di logam las.

Jadi, dapat diambil kesimpulan untuk *tool* 3 (Ps: Ulir) bahwa putaran 1300 Rpm dengan *feeding* 130 mm/min memiliki nilai tegangan lentur terbesar, karena dapat menahan beban reaksi tumpuan yang lebih besar terhadap gaya yang diberikan, dibandingkan dengan putaran 1950 Rpm dan 2850 Rpm serta tidak mengalami retakan/patahan saat mengalami beban lentur.

Adapun hasil pengujian lentur pada posisi *root bending* terdapat pada tabel 4.15, 4.16, 4.17, dan 4.18 berikut ini.

Tabel 4.15. Kekuatan lentur dan kondisi sisi lengkungan hasil uji lentur (*root bend*) hasil pengelasan dissimilar FSW alumunium AA5052 dan Aluminium AA6061 untuk *Tool* 1 (Ps. silinder)

Putaran (Rpm)	Feeding (mm/min)	σb (MPa) Spesimen	Sisi luar Lengkungan	Hasil
1300	43	36.5	Patah	Tidak Baik
	130	176	Patah	Tidak Baik
	240	111.7	Patah	Tidak Baik
1950	43	134.2	Patah	Tidak Baik
	130	41.5	Patah	Tidak Baik
	240	74.7	Patah	Tidak Baik
2850	43	97.9	Patah	Tidak Baik
	130	130.3	Patah	Tidak Baik
	240	158.8	Tidak Patah	Baik

Sumber: Data Pengujian

Tabel 4.16. Kekuatan lentur dan kondisi sisi lengkungan hasil uji lentur (*root bend*) hasil pengelasan dissimilar FSW alumunium AA5052 dan Aluminium AA6061 6061 untuk *Tool* 2 (Ps. Segi Tiga)

Putaran (Rpm)	Feeding (mm/min)	σb (MPa) Spesimen	Sisi luar Lengkungan	Hasil
1300	43	91.6	Patah	Tidak Baik
	130	61.8	Patah	Tidak Baik
	240	125.2	Tidak Patah	Baik
1950	43	125.6	Patah	Tidak Baik
	130	37.8	Patah	Tidak Baik
	240	143.7	Crack	Tidak Baik
2850	43	56	Patah	Tidak Baik
	130	83.2	Patah	Tidak Baik
	240	49.3	Patah	Tidak Baik

Sumber: Data Pengujian

Tabel 4.17. Kekuatan lentur dan kondisi permukaan lengkungan (*root bend*) hasil pengelasan dissimilar FSW alumunium AA5052 dan Aluminium AA6061 untuk *Tool* 3 (Ps. Ulir)

Putaran (Rpm)	Feeding (mm/min)	σb (MPa) Spesimen	Sisi luar Lengkungan	Hasil
1300	43	174.9	Tidak Patah	Baik
	130	78.7	Patah	Tidak Baik
	240	41.4	Patah	Tidak Baik
1950	43	25.9	Patah	Tidak Baik
	130	135.3	Crack	Tidak Baik
	240	185.2	Tidak Patah	Baik
2850	43	89.2	Crack	Tidak Baik
	130	58.8	Patah	Tidak Baik
	240	97.3	Patah	Tidak Baik

Sumber: Data Pengujian

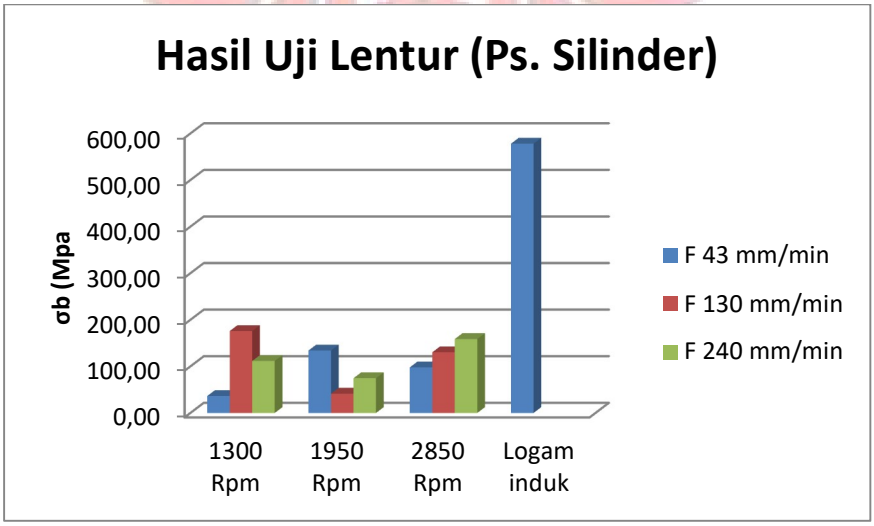
Tabel 4.18. Persentase kekuatan lentur rata-rata spesimen hasil las FSW terhadap kekuatan lentur logam induk

Tool	Putaran (Rpm)	Feeding (mm/min)	σb (MPa) Spesimen	σb (MPa) Logam Induk AA5052	Persentase (%)	σb (MPa) Logam Induk AA6061	Persentase (%)
Tool 1 (Silinder)	1300	43	147	191.67	76.69	520.56	28.24
		130	243.7	191.67	127.15	520.56	46.81
		240	55.1	191.67	28.75	520.56	10.58
	1950	43	183.6	191.67	95.79	520.56	35.27
		130	21.7	191.67	11.32	520.56	4.17
		240	78.9	191.67	41.16	520.56	15.16
	2850	43	115.2	191.67	60.10	520.56	22.13
		130	157.8	191.67	82.33	520.56	30.31
		240	159.3	191.67	83.11	520.56	30.60
Tool 2 (Segi Tiga)	1300	43	52.6	191.67	27.44	520.56	10.10
		130	165.1	191.67	86.14	520.56	31.72
		240	32.4	191.67	16.90	520.56	6.22
	1950	43	41.4	191.67	21.60	520.56	7.95
		130	0	191.67	0.00	520.56	0.00

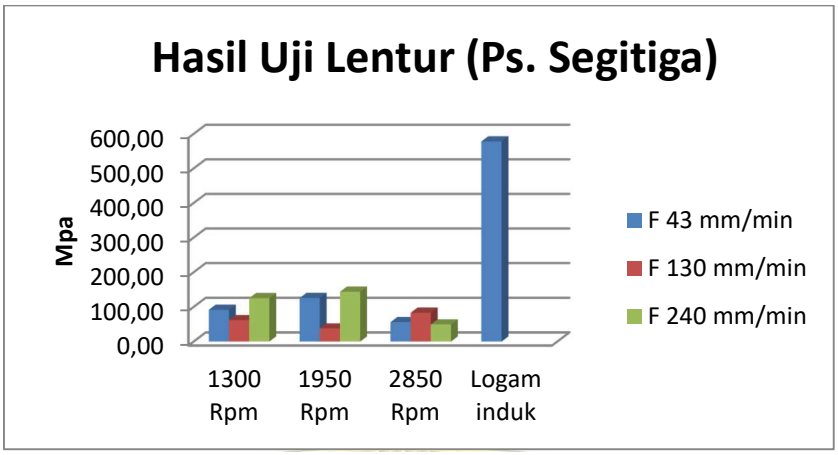
		240	143.6	191.67	74.92	520.56	27.59
	2850	43	141.2	191.67	73.67	520.56	27.12
		130	152.8	191.67	79.72	520.56	29.35
		240	84.8	191.67	44.24	520.56	16.29
Tool 3 (Ulir)	1300	43	98.4	191.67	51.34	520.56	18.90
		130	178.6	191.67	93.18	520.56	34.31
		240	69	191.67	36.00	520.56	13.25
	1950	43	110.5	191.67	57.65	520.56	21.23
		130	128.5	191.67	67.04	520.56	24.68
		240	118.6	191.67	61.88	520.56	22.78
	2850	43	63.8	191.67	33.29	520.56	12.26
		130	94.6	191.67	49.36	520.56	18.17
		240	12	191.67	6.26	520.56	2.31

Sumber: Data Pengujian

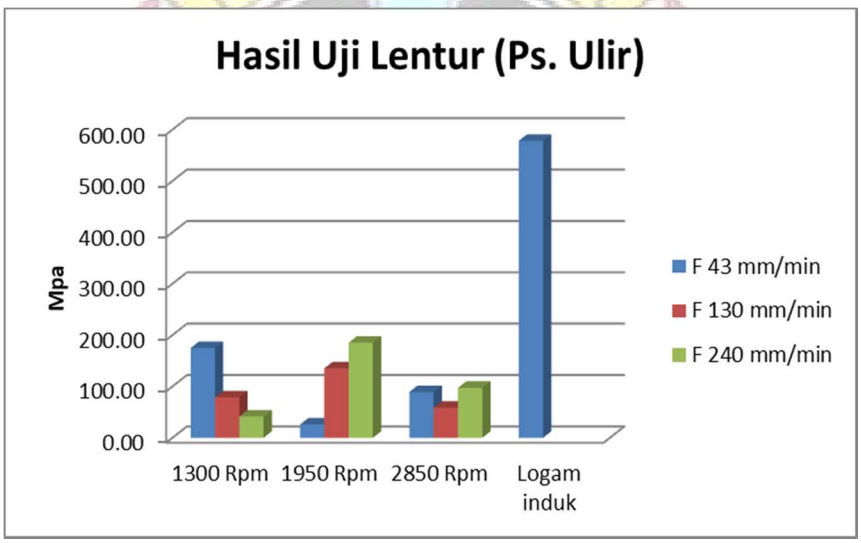
Adapun pennyajian nilai kekuatan lentur (*root bend*) hasil pengelasan dissimilar FSW Alumunium AA 6061 dalam bentuk diagram batang didapatkan seperti gambar 4.31, 4.32, dan 4.33.



Gambar 4.31. Diagram nilai kekuatan lentur (*root bend*) hasil pengelasan FSW *tool* 1



Gambar 4.32. Diagram nilai kekuatan lentur (*root bend*) hasil pengelasan FSW *tool* 2



Gambar 4.33. Diagram nilai kekuatan lentur (*root bend*) hasil pengelasan FSW *tool* 3

Berdasarkan hasil pengujian lentur (*root bend*) yang terdapat pada tabel 4.15, 4.16, dan 4.17 serta grafik pada gambar 4.31, 4.32 dan 4.33 untuk pengelasan dissimilar FSW *Tool* 1, *Tool* 2, dan *Tool* 3 menunjukan bahwa:

1. Pengujian lentur pada posisi *root bend* untuk putaran 1300 Rpm, 1950 Rpm, 2850 Rpm, dan *feeding* 43 mm/min, 130 mm/min, dan 240 mm/min dengan menggunakan *Tool* 1 (Ps: silinder).

   Pada pengujian lentur dengan *root bend* yang dilakukan dengan jarak tumpuan 87 mm dan sudut tekukan 180°, menunjukan semua spesimen yang telah diuji ada yang mengalami dan tidak mengalami keretakan/patah pada bagian logam las. Dengan tiga variasi putaran dan *feeding* yang diberikan, putaran 1300 Rpm dengan *feeding* 130 mm/min memiliki nilai tegangan lentur tertinggi sebesar 176,00 MPa dengan terjadi perpatahan di logam las dan terendah terdapat pada *feeding* 43 mm/min sebesar 36,50 MPa dengan terjadi perpatahan di logam las. Kemudian putaran 1950 Rpm nilai tegangan lentur tertinggi terdapat pada *feeding* 43 mm/min sebesar 134,20 MPa dengan terjadi perpatahan di logam las dan terendah terdapat pada *feeding* 130 mm/min sebesar 41,50 MPa dengan terjadi perpatahan di logam las. Untuk putaran 2850 Rpm memiliki nilai tegangan lentur tertinggi terdapat pada *feeding* 240 mm/min sebesar 158.80 MPa dengan terjadi perpatahan di logam las dan terendah terdapat pada *feeding* 43 mm/min sebesar 97,30 MPa dengan perpatahan terjadi di logam las.

   Jadi, dapat diambil kesimpulan bahwa untuk *tool* 1 (Ps: silinder) putaran 1300 Rpm dengan *feeding* 130 mm/min memiliki nilai tegangan lentur terbesar, karena dapat menahan beban reaksi tumpuan yang lebih besar terhadap gaya yang diberikan, dibandingkan dengan putaran 1950 Rpm dan 2850 Rpm.

2. Pengujian lentur pada posisi *root bend* untuk putaran 1300 Rpm, 1950 Rpm, 2850 Rpm, dan *feeding* 43 mm/min, 130 mm/min, dan 240 mm/min dengan menggunakan *Tool* 2 (Ps: Segi Tiga).

Pada pengujian lentur dengan *root bend* yang dilakukan dengan jarak tumpuan 87 mm dan sudut tekukan 180°, menunjukan semua spesimen yang telah diuji ada yang mengalami dan tidak mengalami keretakan/patah pada bagian logam las. Dengan tiga variasi putaran dan *feeding* yang diberikan, putaran 1300 Rpm dengan *feeding 24*0 mm/min memiliki nilai tegangan lentur tertinggi sebesar 125,60 MPa dengan tidak terjadi perpatahan di logam las dan terendah terdapat pada *feeding* 130 mm/min sebesar 61,80 MPa dengan terjadi perpatahan di logam las. Kemudian putaran 1950 Rpm nilai tegangan lentur tertinggi terdapat pada *feeding* 240 mm/min sebesar 143,70 MPa dengan terjadi perpatahan di logam las dan terendah terdapat pada *feeding* 130 mm/min sebesar 37,8 MPa dengan terjadi perpatahan di logam las. Untuk putaran 2850 Rpm memiliki nilai tegangan lentur tertinggi terdapat pada *feeding* 130 mm/min sebesar 83,20 MPa dengan terjadi perpatahan di logam las dan terendah terdapat pada *feeding* 240 mm/min sebesar 49,30 MPa dengan perpatahan terjadi di logam las.

Jadi, dapat diambil kesimpulan bahwa untuk *tool* 2 (Ps: Segi Tiga) putaran 1950 Rpm dengan *feeding* 240 mm/min memiliki nilai tegangan lentur terbesar, karena dapat menahan beban reaksi tumpuan yang lebih besar terhadap gaya yang diberikan, dibandingkan dengan putaran 1300 Rpm dan 2850 Rpm.

3. Pengujian lentur pada posisi *root bend* untuk putaran 1300 Rpm, 1950 Rpm, 2850 Rpm, dan *feeding* 43 mm/min, 130 mm/min, dan 240 mm/min dengan menggunakan *Tool* 3 (Ps: Ulir).

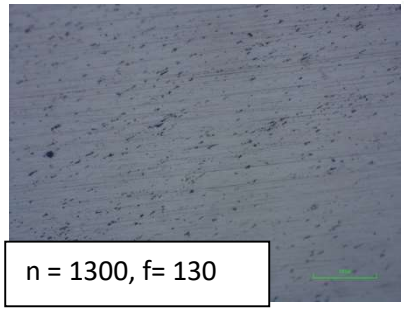
Pada pengujian lentur dengan *root bend* yang dilakukan dengan jarak tumpuan 87 mm dan sudut tekukan 180°, menunjukan semua spesimen yang telah diuji ada yang mengalami dan tidak mengalami keretakan/patah pada bagian logam las. Dengan tiga variasi putaran dan *feeding* yang diberikan, putaran 1300 Rpm dengan *feeding* 43 mm/min memiliki nilai tegangan lentur tertinggi sebesar 174,90 MPa dengan tidak terjadi perpatahan di logam las dan terendah terdapat pada *feeding* 240 mm/min sebesar 41,40 MPa dengan terjadi perpatahan di logam las. Kemudian putaran 1950 Rpm nilai tegangan lentur tertinggi terdapat pada *feeding* 240 mm/min sebesar 185,20 MPa dengan tidak terjadi perpatahan di logam las dan terendah terdapat pada *feeding* 43 mm/min sebesar 25,90 MPa dengan terjadi perpatahan di logam las. Untuk putaran 2850 Rpm memiliki nilai tegangan lentur tertinggi terdapat pada *feeding* 240 mm/min sebesar 97,30 MPa dengan terjadi perpatahan di logam las dan terendah terdapat pada *feeding* 130 mm/min sebesar 58,80 MPa dengan terjadi perpatahan di logam las.

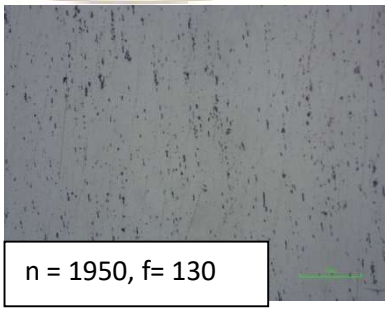
Jadi, dapat diambil kesimpulan bahwa untuk *tool* 3 (Ps: Ulir) putaran 1950 Rpm dengan *feeding* 240 mm/min memiliki nilai tegangan lentur terbesar, karena dapat menahan beban reaksi tumpuan yang lebih besar terhadap gaya yang diberikan, dibandingkan dengan putaran 1300 Rpm dan 2850 Rpm.

Kekuatan lentur yang berbeda pada setiap *tool* dan *feeding* disebabkan karena bentuk geometri *pin tool* sangat berpengaruh terhadap adukan dan gesekan terehadap *spesimen* las. Dimana ada *pin tool* tertentu cocok untuk feeding rendah tapi tidak cocok untuk *feeding* tinggi begitupun sebaliknya dengan *pin tool* lainnya. Adapun nilai kekuatan lentur *spesimen* hasil las yang semuanya lebih kecil dari logam induk disebabkan karena terbentuknya penyambungan yang tidak optimal saat proses pengelasan.

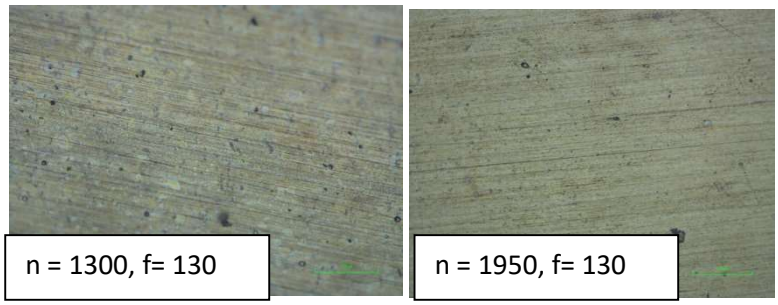
4.6. Mikrostruktur Hasil Pengelasan Dissimilar FSW Alumunium AA 6061 dan Aluminium AA5052

Pengujian mikrostruktur yang dilakukan bertujuan untuk mengetahui mikrostruktur yang terbentuk pada tiap–tiap spesimen. Pembesaran yang digunakan adalah 50X, 100X, 200X, 500X dan 1.000X. Pengukuran rata-rata ukuran butir menggunakan foto mikrostrukturdengan perbesaran 100X. Adapun foto mikrostruktur dapat dilihat berikut ini:

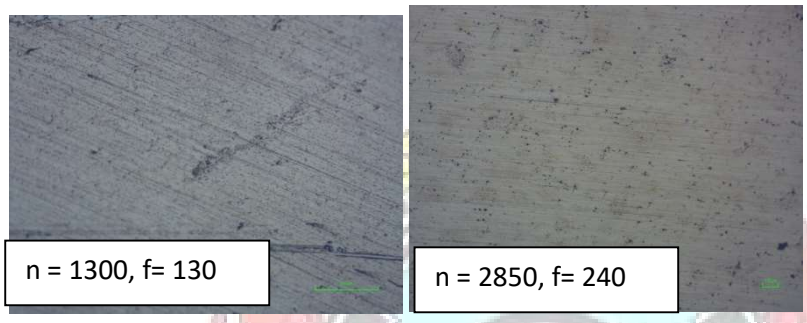




a)



b)



c)

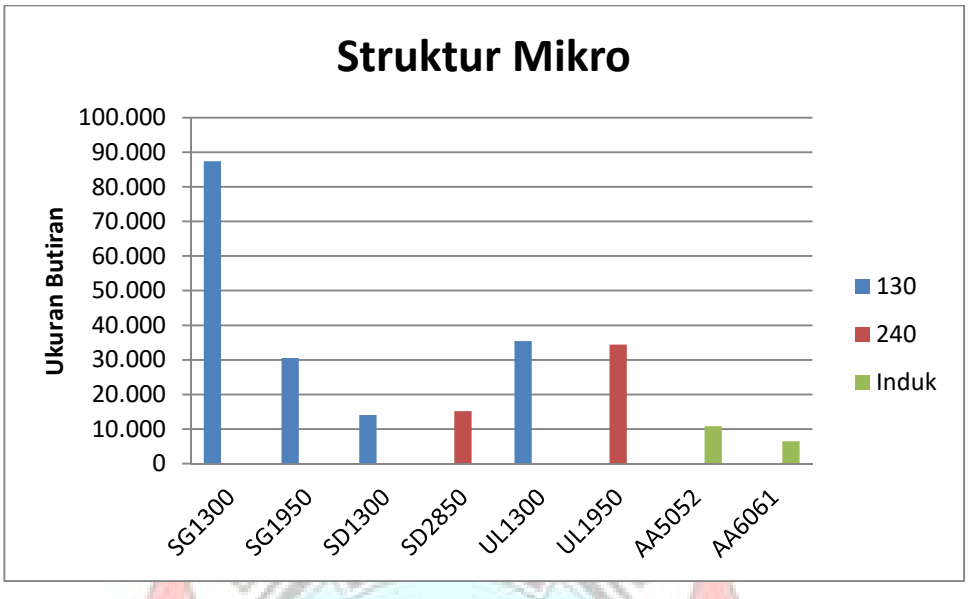
Gambar 4.34 Mikrostruktur: a). Tool Silinder; b. Tool Segi Tiga c. Tool Ulir

Adapun hasil perhitungan rata – rata perhitungan ukuran butir mikrostruktur hasil pengelasan dissimilar FSW Aluminium AA5052 dan Aluminium AA6061 ditunjukkan pada tabel 4.19 dan perbandingan ukuran butir mikrostruktur ditunjukkan pada gambar diagram 4.33.

Tabel 4.19 Ukuran butir mikrostruktur hasil pengelasan dissimilar FSW Aluminium AA5052 dan Aluminium AA6061 untuk kualitas sambungan terbaik setiap bentuk Pin Shoulder.

Tools	Putaran (Rpm)	Feeding (mm/min)	Average Size (µm)
Segitiga	1300	130	87,402
	1950	130	30,547
Silinder	1300	130	14,034
	2850	240	15,201
Ulir	1300	130	35,380
	1950	240	34,488
Logam induk AA 5052			10,873
Logam induk AA 6061			6,474

Adapun penyajian nilai hasil perhitungan rata – rata perhitungan ukuran butir mikrostrukturhasil pengelasan dissimilar FSW Aluminium AA5052 dan Aluminium AA6061 dengan tools,putaran dan tools terbaik dalam bentuk diagram batang didapatkan seperti gambar 4.34



Gambar 4.35 Diagram batang mikrostruktur

Berdasarkan hasil rata – rata perhitungan ukuran butir mikrostruktur hasil pengelasan dissimilar FSW Aluminium AA5052 dan Aluminium AA6061 dengan tools, putaran dan feeding terrbaik, menunjukkan nilai rata-rata ukuran butir paling kecil yaitu pada tool silinder dengan putaran 1300 Rpm feeding 130 mm/min sebesar 14,034 μm. Sedangkan yang menunjukkan nilai rata-rata ukuran butir paling besar yaitu pada tool segitiga dengan putaran 1300 Rpm feeding 130 mm/min sebesar 87,402 μm. Hal tersebut menunjukkan bahwa terdapat hubungan nilai rata-rata pengaruh bentuk tool, ukuran butir. Pada ukuran butiran terkecil menghahasilkan kerapatan yang baik sehingga menghasilkan kekuatan tarik yang lebih tinggi.

Pada gambar 4.34 bagian (a) menunjukkan hasil foto mikrostruktur pin silinder masing - masing ukuran butiran sebesar 14,034 µm dan 15,201 µm adapun dari tampilan hasil foto mikrostruktur menunjukkan perbedaan yang tidak signifikan meskipun mempunya feeding dan putaran pada tool ini berbeda, sehingga dapat di kesimpulan bahwa mikrostruktur pada pin silinder dipengaruhi oleh bentuk tool nya karena mempunyai nilai yang cenderung konstan ukuran butiran nya.

Adapun gambar 4.34 bagian (b) hasil foto mikrostruktur dari tool segitiga menghasilkan rata-rata ukuran butiran yaitu masing-masing 87,402 µm dan 30,547 µm dan mengahasilkan struktur yang masih kasar, pada foto mikrostruktur tersebut telah menampilkan pembesaran sebesar 100X , dalam penghitungan ukuran butiran melibatkan jumlah keseluruhan butiran dibagi dengan luas area, sehinga ukuran butiran suatu mikrostruktur tergantung dari banyaknya butiran yang didapatkan. Terlihat jelas perbandingan pada hasil foto tersebut bahwa putaran yang beda dan feeding yang sama akan menghasilkan mikrostruktur yang signifikan.

Pada gambar 4.34 bagian (c) tersebut menunjukkan mikrostruktur dari tool ulir masing-masing ukuran butiran sebesar 35,380 µm dan 34,488 µm dimana tampilan foto mikrostruktur mempunyai kerapatan yang tidak terlalu berbeda, meskipun dilihat dari putaran dan feeding berbeda. Pelumeran yang belum maksimal dapat terlihat jelas pada hasil foto mikrostruktur.

a. Foto struktur logam induk

Logam Induk AA 5052 (Average Size 10,873 μm)

Logam Induk AA 6061 (Average Size 6,474 μm)

Gambar 4.36 Hasil Foto Mikrostruktur logam induk

Pada gambar 4.36 menunjukkan hasil foto mikrostruktur logam induk AA 5052 dan AA 6061 dimana ukuran butiran rata-rata paling kecil yaitu sebesar 6,474 μm berad a pada logam induk AA 6061 sedangkan logam induk AA 5052 mempunyai ukuran butiran sebesar 10,873 μm. ini mennunjukkan bahwa logam induk AA 6061 memilik mikrostruktur yang lebih bagus dan ini sebanding dengan kekuatan tarik dan kekuatan tekuknya. Sehingga dibandingkan dengan ukuran butiran rata-rata (*average size)* hasil pengelasan *dissimilar friction stir welding (*FSW) masih belum sebanding dengan ukuran butiran rata-rata (*average size)* logam induk. Penyebab terjadinya logam induk lebih kecil ukuran butirannya dibandingkan dengan logam induk yaitu adanya pelemuran yang tidak merata dikarenakan belum mencapai titik lebur aluminium.

4.7. Pengaruh Parameter Pengelasan FSW Dissimilar Aluminium AA5052 dan AA 6061 terhadap temperatur, mikrostruktur dan sifat mekanis

Adapun pembahasan mengenai pengaruh parameter pengelasan terhadap kualitas hasil pengelasan seperti ukuran butir mikrostukrur dan sifat mekanis dapat dilihat pada tabel 4.20. Dimana pada tabel 4.20 ini diambil enam sambungan terbaik dari masing variasi tool pin shouder berdasarkan kekuatan tarik maksimum.

Tabel 4.20 Sifat mekanis dan mikrostruktur sambungan dissimilar hasil pengelasan FSW Aluminium AA 5052 dan AA 6061.

Tool	n (Rpm)	F (mm/min)	Temperatur (°c)	Kekerasan (HB)	Uji Tarik (Mpa)	Uji Tekuk (Mpa)	Average Grain Size (µm)
Silinder	1300	130	118	39.4	123.51	243.7	14,034
	2850	240	175	41.7	117.65	159.3	15,201
Segitiga	1300	130	165	54.6	111.77	165.1	87,402
	1950	130	178	45.4	107.22	0	30,547
Ulir	1300	130	172	53.7	50.57	178.6	35,380
	1950	240	164	50.7	111.57	118	34,488
Logam Induk	AA 5052			45	172.49	191,67	10,873
	AA 6061			114	301.68	520.56	6,474

Berdasarkan tabel 4.20 tool silinder dengan putaran 1300 rpm dan feeding 130 mm/min memiliki temperature rendah yaitu 118 dan kekerasan 39,4 HB yang tidak terlalu keras namun mempunyai kekuatan uji tarik yang tinggi sebesar 243,7 MPa dan mempunyai ukuran butiran yang rendah sebesar 14,034 µm sehingga fenomena yang terjadi dapat mengindikasikan bahwa pengaruh temperatur yang dihasilkan oleh tiga bentuk pin shoulder tidak terlalu berpengaruh terhadap sifat mekanis suatu sambungan disssimilar FSW AA5052 dengan AA6061. Sedangkan

ukuran rata-rata butiran menujukkan adanya pengaruh terhadap sifat mekanis, dimana ukuran butiran kecil memiliki kerapatan mikrostruktur lebih baik sehingga kekuatan tarik lebih tinggi. Berbagai aspek mikrostruktur termasuk evolusi struktur butir, teksturnya, distribusi temperatur, metode rekristalisasi dan pengendapan konstituen antar-logam. Faktor-faktor ini mempengaruhi kekuatan dan kualitas pengelasan adukan gesekan yang dinilai menggunakan berbagai pengujian yaitu beban tarik, beban lentur dll . (Kumbhar, 2011)

Adapun dengan sifat kekerasan yang cenderung tidak konstan sangat di pengaruhi dari titik pengambilan data serta adukan pada setiap permukaan ketika sedang terjadi pelumeran tidak merata, Sedangkan tampilan dari spesimen mikrostruktur terdapat cacat pada sambungan pada beberapa spesimen yang dipengaruhi oleh pelumeran pada saat proses pengelasan FSW. Dimana pelumeran ini dipengaruhi oleh temperatur akibat gesekan pengaduk pin shoulder dan pin shoulder itu sendiri. Unsur paduan juga sangat berpengaruh terhadap sifat mekanis dan mikrostruktur pengelasan *dissimilar* FSW dimana Aluminium AA 5052 memiliki unsur magnesium yang sedang, sedangkan aluminium AA 6061 memiliki unsur silika dan magnesium yang tinggi sehingga pencampuran dua bahan material ini akan sangat mempengaruhi sifat-sifat mekanis. pengaruh temperature terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur juga tidak terlalu signifikan.

4.8. Cacat Yang Terjadi Pada Hasil Sambungan Pengelasan dissimilar FSW Aluminiun AA5052 dan AA6061

Secara umum visual dari hasil pengelasan penyambungan *dissimilar* FSW AA5052 dan AA6061 sebagian mengalami cacat dan sebagian mempunyai permukaan yang halus dan bersih. Adapun hasil foto biasa, foto makro, dan tampilan permukaan saat dibela serta dipolis menunjukkan bahwa terjadi cacat pada bagian tertentu permukaan hasil las dan terjadi pada bagian nugget zone.

Gambar 4.37. Foto hasil pengelasan, foto makro, hasil polis dan foto mikrostruktur.

Beberapa pengaruh terjadinya cacat pada bagian las disebabkan dari berbagai faktor yaitu bentuk geometri dari tool, putaran dan *feeding* serta berbagai pengaruh yang belum diteliti seperti mesin yang digunakan, *holding time* yang bervariasi, dan sudut tool yang digunakan. Adapun pengaruh dari cacat permukaan ini menyebabkan sifat mekanik lebih rendah dari sifat mekanik logam induk, sehingga disimpulkan bahwa pengelasan penyambungan *dissimilar* FSW AA 5052 dan AA 6061 tidak rekomendasikan digunakan untuk pengaplikasian pada bagian yang mempunyai beban yang sama dengan beban logam induk.

4.9. Analisis Varian (ANOVA), Korelasi dan Regresi

Analisis varian, korelasi dan regresi berganda untuk dua variabel bebas, yakni putaran, *feeding* pada masing-masing bentuk *pin shoulder tool* terhadap kekerasan, kekuatan tarik, dan kekuatan lentur dilakukan menggunakan metode *factorial* pada program *Design Expert* vesri 6.0.5. Berikut hasil analisa data yang didapatkan.

A. Kekerasan

- **Kekerasan *Nugget Zone* (NZ)**

  Berikut data hasil analisis varian, korelasi dan regresi putaran dan *feeding* pada *Nugget Zone* (NZ) *pin* silinder terhadap kekerasan hasil pengelasan.

ANOVA for Response Surface Quadratic Model

Analysis of variance table [Partial sum of squares]

Source		Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model		459.21	5	91.84	11.72	0.0349	significant
	A	*0.95*	*1*	*0.95*	*0.12*	*0.7502*	
	B	*5.36*	*1*	*5.36*	*0.68*	*0.4689*	
	A^2	*219.68*	*1*	*219.68*	*28.02*	*0.0132*	
	B^2	*26.23*	*1*	*26.23*	*3.35*	*0.1648*	
	AB	*191.38*	*1*	*191.38*	*24.41*	*0.0159*	
Residual		23.52	3	7.84			
Cor Total		482.73	8				

Std. Dev.	2.80	R-Squared	0.9513
Mean	41.69	Adj R-Squared	0.8701
C.V.	6.72	Pred R-Squared	0.6153
PRESS	185.71	Adeq Precision	9.571

Factor	Coefficient Estimate	DF	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
ntercept	31.99	1	2.15	25.15	38.84	
A-Putaran	0.40	1	1.14	-3.24	4.04	1.01
B-Feeding	0.95	1	1.15	-2.70	4.59	1.01
A^2	10.81	1	2.04	4.31	17.30	1.01
B^2	3.68	1	2.01	-2.72	10.08	1.00
AB	-6.87	1	1.39	-11.30	-2.45	1.01

Final Equation in Terms of Coded Factors:

Uji Kekerasan =
+31.99
+0.40 * A
+0.95 * B
+10.81 * A^2
+3.68 * B^2
-6.87 * A * B

Final Equation in Terms of Actual Factors:

Uji Kekerasan =
+88.19804
-0.061418 * Putaran
+0.089067 * Feeding
+1.79928E-005 * $Putaran^2$
+3.79270E-004 * $Feeding^2$
-9.00161E-005 * Putaran * Feeding

Dari hasil output regresi yang tertera pada *Final Equation in Terms of Actual Factors*, maka diperoleh persamaan regresi kekerasan sebagai berikut.

HB = 88,19 +0,06* n + 0,089 * F

Hasil analisis lain yang didapatkan berupa uji signifikasi, anova dan korelasi dijelaskan sebagai berikut.

1. Uji signfikansi model regresi

   Uji keberartian model regresi dapat dilihat pada koefisien determinasi (*R squared* = R^2). Koefisien determinasi ini, menjelaskan besarnya variabel terikat yang dapat dijelaskan oleh tiga variabel bebas. Adapun nilai yang ditunjukkan pada output, yaitu R square sebesar 0,9513 atau 95,13 %. Hal ini menunujukkan bahwa sebesar 95,13 % variabel terikat dapat dijelaskan oleh dua variabel bebas. Artinya, kekerasan yang didapatkan pada proses pengelasan dipengaruhi oleh variabel putaran, *feeding,* dengan *pin shoulder* silinder sebesar 95,13 %, sisanya sebesar 4,87 % dipengaruhi oleh variabel lain yang tidak diteliti seperti sudut *tool*, diameter *pin*, diameter *shoulder,* penetrasi *tool*.

2. Koefisien korelasi

   Menyatakan hubungan linear antara variabel terikat dan variabel bebas dengan kisaran angka antara 0-1. Apabila nilai R semakin mendekati 1, maka hubungan antar variabel semakin kuat demikian sebaliknya. Nilai korelasi dapat diperoleh dari akar nilai *R squared* ($\sqrt{R^2}$). Nilai yang ditunjukkan pada tabel untuk *R squared* sebesar 0,9513. Dari nilai tersebut didapatkan korelasi variabel bebas putaran, *feeding*, pada *pin* silinder terhadap variabel terikat kekerasan sebesar $\sqrt{0{,}9513} = 0{,}97$. Jadi, koefisien korelasi menunjukkan adanya hubungan positif antara kekerasan hasil pengelasan dengan putaran, *feeding* pada *pin*

shoulder segi tiga sebesar 0,97. Nilai korelasi yang besar disebabkan karena kurangnya pengaruh dari parameter lainnya yang tidak di teliti.

3. Uji ANOVA/F Test

Pada bagian ini ditampilkan tabel analisis varian (anova), dimana nilai F_{sig} ditunjukkan sebesar 0,0349. Nilai ini digunakan untuk uji F test dalam memprediksi kontribusi variabel putaran, *feeding* secara bersama-sama terhadap variabel terikat kekerasan *pin shoulder* segi tiga. Adapun langkah-langkah yang dilakukan untuk uji F test adalah sebagai berikut:

a. Merumuskan hipotesis

Hipotesis yang digunakan:

H_i: Ada hubungan signifikan antara variabel terikat atau yang diselidiki dengan variabel bebas.

H_o: Tidak ada hubungan signifikan antara variabel terikat atau yang diselidiki dengan variabel bebas.

b. Menentukan tingkat signifikansi

Tingkat signifikansi α = 5% atau 0.05

c. Menentukan nilai F sig

Berdasarkan hasil *analysis of varians* diperoleh nilai statistik F_{sig} sebesar 0,0149.

d. Kriteria pengujian untuk H_o

H_i diterima jika $F_{sig} < \alpha$

H_o diterima jika $F_{sig} > \alpha$

e. Membandingkan nilai F_{sig} dengan α

$F_{sig} < \alpha = 0{,}0349 < 0{,}05$.

Dari perbandingan tersebut, menunjukkan bahwa H_i diterima. Dalam hal ini terdapat pengaruh yang signifikan antara putaran dan *feeding* pada *pin shoulder* silinder secara bersama-sama terhadap kekerasan NZ hasil pengelasan.

B. Kekuatan Tarik

Berikut data hasil analisis varian, korelasi dan regresi putaran dan *feeding pin silinder* terhadap kekuatan tarik hasil pengelasan.

ANOVA for Response Surface Quadratic Model

Analysis of variance table [Partial sum of squares]

Source		Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model		750.25	5	150.05	19.75	0.0167	significant
	A	*0.59*	*1*	*0.59*	*0.078*	*0.7982*	
	B	*4.16*	*1*	*4.16*	*0.55*	*0.5129*	
	A^2	*473.79*	*1*	*473.79*	*62.36*	*0.0042*	
	B^2	*80.03*	*1*	*80.03*	*10.53*	*0.0476*	
	AB	*187.31*	*1*	*187.31*	*24.65*	*0.0157*	
Residual		22.79	3	7.60			
Cor Total		773.04	8				

Std. Dev.	2.76	R-Squared	0.9705
Mean	44.90	Adj R-Squared	0.9214
C.V.	6.14	Pred R-Squared	0.7868
PRESS	164.80	Adeq Precision	11.235

Factor	Coefficient Estimate	DF	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	38.53	1	2.12	31.79	45.26	
A-Putaran	-0.31	1	1.13	-3.90	3.27	1.01
B-Feeding	0.83	1	1.13	-2.75	4.42	1.01
A^2	15.87	1	2.01	9.48	22.27	1.01
B^2	-6.43	1	1.98	-12.73	-0.13	1.00
AB	-6.80	1	1.37	-11.16	-2.44	1.01

Final Equation in Terms of Coded Factors:

Uji tarik =
+38.53
-0.31 * A
+0.83 * B
+15.87 * A^2
-6.43 * B^2
-6.80 * A * B

Final Equation in Terms of Actual Factors:

Uji tarik =
+112.52938
-0.097465 * Putaran
+0.38075 * Feeding
+2.64240E-005 * $Putaran^2$
-6.62498E-004 * $Feeding^2$
-8.90536E-005 * Putaran * Feeding

Dari hasil output regresi yang tertera pada *Final Equation in Terms of Actual Factors*, maka diperoleh persamaan regresi kekuatan tarik sebagai berikut.

$$\sigma_u = 112{,}52 + 0{,}097 * n - 0{,}380 * F$$

Hasil analisis lain yang didapatkan berupa uji signifikasi, anova dan korelasi dijelaskan sebagai berikut.

1. Uji signfikansi model regresi

Uji keberartian model regresi dapat dilihat pada koefisien determinasi (*R squared* = R^2). Koefisien determinasi ini, menjelaskan besarnya variabel terikat yang dapat dijelaskan oleh dua variabel bebas. Adapun nilai yang ditunjukkan pada output, yaitu R square sebesar 0,9705 atau 97,07 %. Hal ini menunujukkan bahwa sebesar 97,07 % variabel terikat dapat dijelaskan oleh dua variabel bebas. Artinya kekuatan tarik yang didapatkan pada proses pengelasan dipengaruhi oleh variabel putaran dan *feeding pin shoulder* Silinder sebesar 97,07 %, sisanya sebesar 3,93% dipengaruhi oleh variabel lain yang tidak diteliti seperti sudut *tool,* keliling *pin*, diameter *shoulder,* penetrasi *tool.*

2. Koefisien korelasi

Menyatakan hubungan linear antara variabel terikat dan variabel bebas dengan kisaran angka antara 0-1. Apabila nilai R semakin mendekati 1, maka hubungan antar variabel semakin kuat demikian pula sebaliknya. Nilai korelasi dapat diperoleh dari akar nilai *R squared* ($\sqrt{R^2}$). Nilai yang ditunjukkan pada tabel untuk *R squared* sebesar 0,9705. Dari nilai tersebut didapatkan korelasi variabel bebas putaran dan *feeding* terhadap variabel terikat kekuatan tarik sebesar $\sqrt{0{,}9705} = 0{,}98$. Jadi, koefisien korelasi menunjukkan adanya hubungan positif antara kekuatan tarik hasil pengelasan dengan putaran, *feeding* dan

diameter *shoulder* sebesar 0,98. Nilai korelasi yang besar disebabkan karena kurangnya pengaruh dari parameter lainnya yang tidak di teliti.

3. Uji ANOVA/F Test

Pada bagian ini ditampilkan tabel analisis varian (anova), dimana nilai F_{sig} ditunjukkan sebesar 0,0167. Nilai ini digunakan untuk uji F test dalam memprediksi kontribusi variabel putaran,dan *feeding* dengan bentuk *pin shoulder* segi tiga secara bersama-sama terhadap variabel terikat kekuatan tarik. Adapun langkah-langkah yang dilakukan untuk uji F test adalah sebagai berikut.

a. Merumuskan hipotesis

Hipotesis yang digunakan:

H_i: Ada hubungan signifikan antara variabel terikat atau yang diselidiki dengan variabel bebas.

H_o: Tidak ada hubungan signifikan antara variabel terikat atau yang diselidiki dengan variabel bebas.

b. Menentukan tingkat signifikansi

Tingkat signifikansi α = 5% atau 0.05

c. Menentukan nilai F sig

Berdasarkan hasil *analysis of varians* diperoleh nilai statistik F_{sig} sebesar 0,0167.

d. Kriteria pengujian untuk H_o

H_i diterima jika $F_{sig} < \alpha$

H_o diterima jika $F_{sig} > \alpha$

e. Membandingkan nilai F_{sig} dengan α

$F_{sig} < \alpha = 0{,}0167 < 0{,}05$.

Dari perbandingan tersebut, menunjukkan bahwa H_i diterima. Dalam hal ini terdapat pengaruh yang signifikan antara putaran dan *feeding* pada *pin shoulder* silinder secara bersama-sama terhadap kekuatan tarik hasil pengelasan.

C. Kekuatan Lentur

- Kekuatan Lentur *Face Band* (FB)

Berikut data hasil analisis varian, korelasi dan regresi putaran dan *feeding pin silinder* terhadap kekuatan lentur hasil pengelasan.

ANOVA for Response Surface Linear Model

Analysis of variance table [Partial sum of squares]

Source		Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model		2391.55	2	1195.77	8.95	0.0158	significant
	A	*2366.59*	*1*	*2366.59*	*17.72*	*0.0056*	
	B	*24.95*	*1*	*24.95*	*0.19*	*0.6807*	
Residual		801.35	6	133.56			
Cor Total		3192.90	8				

Std. Dev.	11.56	R-Squared	0.7490
Mean	127.97	Adj R-Squared	0.6654
C.V.	9.03	Pred R-Squared	0.4609
PRESS	1721.43	Adeq Precision	6.537

Factor	Coefficient Estimate	DF	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	129.11	1	3.86	119.65	138.57	
A-Putaran	19.77	1	4.70	8.28	31.27	1.00
B-Feeding	2.03	1	4.71	-9.48	13.55	1.00

Final Equation in Terms of Coded Factors:

Uji Tekuk R =
+129.11
+19.77 * A
+2.03 * B

Final Equation in Terms of Actual Factors:

Uji Tekuk R =
+73.24068
+0.025516 * Putaran
+0.020657 * Feeding

Dari output regresi yang tertera pada *Final Equation in Terms of Actual Factors*, maka diperoleh persamaan regresi kekuatan lentur sebagai berikut.

$$\sigma_b = 73{,}240 - 0{,}025 * n - 0{,}020 * F$$

Hasil analisis lain yang didapatkan berupa uji signifikasi, anova dan korelasi dijelaskan sebagai berikut.

1. Uji signfikansi model regresi

   Uji keberartian model regresi dapat dilihat pada koefisien determinasi (R square = R^2). Koefisien determinasi ini, menjelaskan besarnya variabel terikat

yang dapat dijelaskan oleh dua variabel bebas. Adapun nilai yang ditunjukkan pada output, yaitu R square sebesar 0,7490 atau 74,90%. Hal ini menunujukkan bahwa sebesar 74,90 % variabel terikat dapat dijelaskan oleh dua variabel bebas. Artinya, kekuatan lentur face yang didapatkan pada proses pengelasan dipengaruhi oleh variabel putaran, *feeding* dan diameter *shoulder* sebesar 74,90%, sisanya sebesar 26,10 % dipengaruhi oleh variabel lain yang tidak diteliti seperti sudut *tool*, kelililing *pin*, diameter *shoulder*, penetrasi *tool*.

2. Koefisien korelasi

Menyatakan hubungan linear antara variabel terikat dan variabel bebas dengan kisaran angka antara 0-1. Apabila nilai R semakin mendekati 1, maka hubungan antar variabel semakin kuat demikian sebaliknya. Nilai korelasi dapat diperoleh dari akar nilai *R squared* ($\sqrt{R^2}$). Nilai yang ditunjukkan pada tabel untuk *R squared* sebesar 0,7490. Dari nilai tersebut didapatkan korelasi variabel bebas putaran, *feeding*, diameter *shoulder* terhadap variabel terikat kekuatan lentur face sebesar $\sqrt{0{,}7490} = 0{,}86$. Jadi, koefisien korelasi menunjukkan adanya hubungan positif antara kekuatan tarik hasil pengelasan dengan putaran, *feeding* dan diameter *shoulder* sebesar 0,8. Nilai korelasi yang besar disebabkan karena nilai parameter putaran dan *feeding* yang digunakan sudah sesuai..

3. Uji ANOVA/F Test

Pada bagian ini ditampilkan tabel analisis varian (anova), dimana nilai F_{sig} ditunjukkan sebesar 0,0158. Nilai ini digunakan untuk uji F test dalam

memprediksi kontribusi variabel putaran, *feeding* dan diameter *shoulder* secara bersama-sama terhadap variabel terikat kekuatan lentur. Adapun langkah-langkah yang dilakukan untuk uji F test adalah sebagai berikut:

a. Merumuskan hipotesis

   Hipotesis yang digunakan:

   H_i: Ada hubungan signifikan antara variabel terikat atau yang diselidiki dengan variabel bebas.

   H_o: Tidak ada hubungan signifikan antara variabel terikat atau yang diselidiki dengan variabel bebas.

b. Menentukan tingkat signifikansi

   Tingkat signifikansi α = 5% atau 0.05

c. Menentukan nilai F sig

   Berdasarkan hasil *analysis of varians* diperoleh nilai statistik F_{sig} sebesar 0,0158

d. Kriteria pengujian untuk H_o

   H_i diterima jika $F_{sig} < \alpha$

   H_o diterima jika $F_{sig} > \alpha$

e. Membandingkan nilai F_{sig} dengan α

   $F_{sig} > \alpha = 0{,}0158 > 0{,}05$.

Dari perbandingan tersebut, menunjukkan bahwa H_o diterima. Dalam hal ini tidak terdapat pengaruh yang signifikan antara putaran dan *feeding pin* silinder secara bersama-sama terhadap kekuatan lentur face hasil pengelasan.

- **Kekuatan Lentur *Root Band* (RB)**

  Berikut data hasil analisis varian, korelasi dan regresi putaran dan *feeding* terhadap kekuatan lentur hasil pengelasan.

ANOVA for Response Surface Quadratic Model
Analysis of variance table [Partial sum of squares]

Source		Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model		752.22	5	150.44	26.13	0.0112	significant
	A	*36.85*	*1*	*36.85*	*6.40*	*0.0854*	
	B	*11.19*	*1*	*11.19*	*1.94*	*0.2576*	
	A^2	*391.94*	*1*	*391.94*	*68.07*	*0.0037*	
	B^2	*5.23*	*1*	*5.23*	*0.91*	*0.4110*	
	AB	*260.91*	*1*	*260.91*	*45.31*	*0.0067*	
Residual		17.27	3	5.76			
Cor Total		769.50	8				

Factor	Coefficient Estimate	DF	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	46.53	1	1.84	40.67	52.40	
A-Putaran	2.48	1	0.98	-0.64	5.60	1.01
B-Feeding	1.37	1	0.98	-1.76	4.49	1.01
A^2	14.43	1	1.75	8.87	20.00	1.01
B^2	-1.64	1	1.72	-7.13	3.84	1.00

Std. Dev.	2.40	R-Squared	0.9776
Mean	54.97	Adj R-Squared	0.9401
C.V.	4.37	Pred R-Squared	0.7393
PRESS	200.59	Adeq Precision	13.402

Final Equation in Terms of Coded Factors:

uji tekuk =
+46.53
+2.48 * A
+1.37 * B
+14.43 * A^2
-1.64 * B^2
-8.02 * A * B

Final Equation in Terms of Actual Factors:

uji tekuk =
+107.15055
-0.081664 * Putaran
+0.27990 * Feeding
+2.40333E-005 * $Putaran^2$
-1.69295E-004 * $Feeding^2$
-1.05104E-004 * Putaran * Feeding

Dari output regresi yang tertera pada *Final Equation in Terms of Actual Factors*, maka diperoleh persamaan regresi kekuatan lentur sebagai berikut.

$$\sigma b = 107{,}150 - 0{,}081 * n + 0{,}27 * F$$

Hasil analisis lain yang didapatkan berupa uji signifikasi, anova dan korelasi dijelaskan sebagai berikut.

1. Uji signfikansi model regresi

   Uji keberartian model regresi dapat dilihat pada koefisien determinasi (R square = R^2). Koefisien determinasi ini, menjelaskan besarnya variabel terikat yang dapat dijelaskan oleh dua variabel bebas. Adapun nilai yang ditunjukkan pada output, yaitu R square sebesar 0,9776 atau 97,76 %. Hal ini menunujukkan bahwa sebesar 97,76 % variabel terikat dapat dijelaskan oleh dua variabel bebas. Artinya, kekuatan lentur *root* yang didapatkan pada proses pengelasan dipengaruhi oleh variabel putaran, *feeding* dan bentuk *pin shoulder* sebesar 97,76

%, sisanya sebesar 2,24 % dipengaruhi oleh variabel lain yang tidak diteliti seperti sudut *tool*, kelililing *pin*, diameter *shoulder*, penetrasi *tool*.

2. Koefisien korelasi

Menyatakan hubungan linear antara variabel terikat dan variabel bebas dengan kisaran angka antara 0-1. Apabila nilai R semakin mendekati 1, maka hubungan antar variabel semakin kuat demikian sebaliknya. Nilai korelasi dapat diperoleh dari akar nilai *R squared* ($\sqrt{R^2}$). Nilai yang ditunjukkan pada tabel untuk *R squared* sebesar 0,9776. Dari nilai tersebut didapatkan korelasi variabel bebas putaran, *feeding*, diameter *shoulder* terhadap variabel terikat kekuatan lentur face sebesar $\sqrt{0{,}9776} = 0{,}98$. Jadi, koefisien korelasi menunjukkan adanya hubungan positif antara kekuatan tarik hasil pengelasan dengan putaran, *feeding* dan diameter *shoulder* sebesar 0,9. Nilai korelasi yang besar disebabkan karena nilai parameter putaran dan *feeding* yang digunakan sudah sesuai.

3. Uji ANOVA/F Test

Pada bagian ini ditampilkan tabel analisis varian (anova), dimana nilai F_{sig} ditunjukkan sebesar 0,0112. Nilai ini digunakan untuk uji F test dalam memprediksi kontribusi variabel putaran, *feeding* dan diameter *shoulder* secara bersama-sama terhadap variabel terikat kekuatan lentur. Adapun langkah-langkah yang dilakukan untuk uji F test adalah sebagai berikut:

a. Merumuskan hipotesis

Hipotesis yang digunakan:

H_i: Ada hubungan signifikan antara variabel terikat atau yang diselidiki dengan variabel bebas.

H_o: Tidak ada hubungan signifikan antara variabel terikat atau yang diselidiki dengan variabel bebas.

b. Menentukan tingkat signifikansi

Tingkat signifikansi α = 5% atau 0.05

c. Menentukan nilai F sig

Berdasarkan hasil *analysis of varians* diperoleh nilai statistik F_{sig} sebesar 0,9038

d. Kriteria pengujian untuk H_o

H_i diterima jika $F_{sig} < \alpha$

H_o diterima jika $F_{sig} > \alpha$

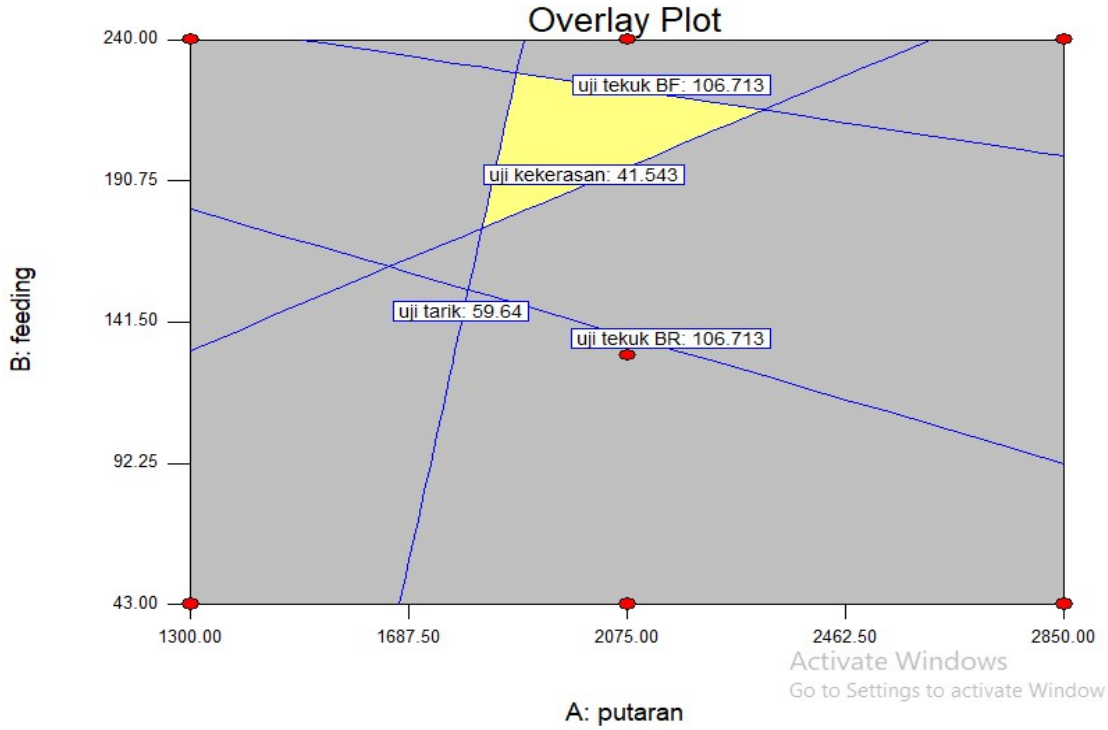
e. Membandingkan nilai F_{sig} dengan α

$F_{sig} > \alpha = 0{,}0112 > 0{,}05$.

Dari perbandingan tersebut, menunjukkan bahwa H_o diterima. Dalam hal ini tidak terdapat pengaruh yang signifikan antara putaran dan *feeding pin* silinder secara bersama-sama terhadap kekuatan lentur face hasil pengelasan.

4.9.1 Optimasi Pemilihan Putaran, *Feeding* pada *tool pin* silinder Dalam Menentukan Nilai Uji Kekerasan, Uji Tekuk, Dan Uji Tarik

Dalam pemilihan parameter putaran, *feeding* dan diameter *shoulder* yang tepat guna memperoleh nilai kekerasan,tekuk dan tarik maksimun dapat ditentukan berdasarkan nilai *desirability* atau kecenderungan hubungan parameter putaran, *feeding*, pada *tool pin shoulder* segi tiga terhadap nilai kekerasan hasil pengelasan yang didapatkan dari grafik optimasi pada gambar 4.28. Pada gambar tersebut menunjukan hubungan yang terjadi serta besar kecenderungan parameter putaran, *feeding* pada *tool pin* silinder mempengaruhi nilai kekerasan, tekuk, dan tarik hasil pengelasan.



Gambar 4.38. Grafik Optimasi Hasil Pengelasan

Pada grafik gambar 4.38 bagian dari *overlay plot* yang diarsir kuning adalah batasan untuk semua tanggapan yang diinginkan. Untuk menentukan pengaturan proses yang layak digunakan, nilai perpaduan *feeding* dan putaran harus menghasilkan nilai kekuatan tarik yang tidak kurang dari 59,64 N/mm^2, nilai kekerasan mempunyai nilai optimal dari 41,543 HB, nilai uji tekuk (*bending face* dan bending root) sebesar 106.713 N/mm$^{2.}$

POLITEKNIK NEGERI
UJUNG PANDANG

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa:

1. Pengelasan sambungan *dissimilar friction stir welding* (FSW) material alumunium AA 5052 dan Aluminium AA 6061 dengan menggunakan *pin sholde*r silinder, segi tiga, ulir pada putaran 1300 rpm, 1950 rpm, 2850 rpm dan kecepatan pemakanan (*feeding)* 43 mm/min, 130 mm/min, 240 mm/min dapat tersambung dengan baik meskipun masih terdapat cacat pada logam las.
2. Sifat mekanis sambungan *dissimilar* FSW umumnya memiliki kekuatan tarik yang lebih kecil dari kekuatan tarik logam induk karena lokasi putus semuanya terjadi pada daerah nuget dan HAZ. Kekuatan tarik dan tekuk tertinggi terjadi pada tool pin shoulder silinder untuk putaran 1300 rpm dan *feeding* 130 mm/min sebesar 123,51 Mpa dan 456,38 Mpa. Dimana patahan hasil uji tarik yang terjadi pada daerah HAZ logam induk AA5052.
3. Nilai uji tekuk terbaik terdapat pada bentuk tool pin shoulder silinder sebesar 243.7 Mpa, bentuk tool pin shoulder nilai paling rendah yaitu ulir sebesar 118 Mpa.
4. Nilai kekerasan tertinggi terjadi pada tool pin shoulder ulir untuk putaran putaran 1300 Rpm dengan *feeding* 130 mm/min sebesar 53,7 HB.

5. Hasil foto mikrostruktur pengelasan menunjukkan bahwa rata-rata ukuran butir (*Average size*) yang paling kecil juga terjadi pada tool pin shoulder silinder dengan putaran 1300 rpm dan *feeding* 130 mm/min kecil sebesar 14,034 μm.
6. Untuk menentukan pengaturan proses yang layak digunakan sesuai dengan aplikasi DOE, nilai perpaduan *feeding* dan putaran harus menghasilkan nilai kekuatan tarik yang tidak kurang dari 59,64 N/mm^2, nilai kekerasan mempunyai nilai optimal dari 41,543 HB, nilai uji tekuk (*bending face* dan bending root) sebesar 106.713 N/mm^2.

5.2. Saran

1. Mesin Milling yang digunakan kurang akurat untuk menentukan feeding dan putaran sehingga disarankan menggunakan mesin CNC milling.
2. Jig yang digunakan harus lebih presisi dan dapat disetting dengan mudah di ragum mesin.
3. Meminimalisir kesalahan dalam melakukan pembuatan spesimen untuk menghemat material dan mempercepat proses permesinan
4. Untuk penelitian selanjutnya disarankan untuk fokus pada pengaruh ukuran butiran terhadap sifat mekanis pengelasan dissimilar FSW, material tool lebih keras serta alat yang digunakan lebih modern dan canggih.

DAFTAR PUSTAKA

Andri, 2012, Pengaruh kecepatan rotasi (rpm) shoulder pada pengelasan similar Al 2024 T3 dengan metode *friction stir welding*, Teknik Metalurgi unjani, Hal 22.

Anwarie, Rifko dkk, 2015, Studi KoMParatif Hasil Friction Stir Welding (FSW) dan Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) Pada Sambungan Las Luminium Seri 5083, *Prosiding Skf.*

Blignault, C., Hattingh, D.G., Kruger, G.H., Van Niekerk, T.I., James, M.N. 2008 [36], *Friction stir weld process evaluation by multi - axial transducer, Meas*urement , 41, pp. 32-43

Heidarzadeh, A., Khodaverdizadeh, H., Mahmoudi, A., & Nazari, E. *Tensile behavior of friction stir welded* AA 6061-T4 *aluminum alloy joints*. JOURNAL OF MATERIALS&DESIGN 2012; 37:166–173.

Iskandar, Norman. dkk. 2011. Pebandingan Karakteristik Produk Hasil Proses Micro Forging pada Material Aluminium, dengan Sistem Closed Die Forging pada Kondisi Cold dan Hot Working Secara Eksperimental dan Analisis dengan FEM. Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Ke-2. Fakultas Teknik Universitas Wahid Hasyin Semarang.

Kalpakjian, Serope.*Manufacturing Processes for Engineering Materials, Fourth edition*. Pearson Prentice Hall International, 2001.

Kumbhar, N.T., Sahoo, S.K., Samajdar, I., Dey, G.K., Bhanumurthy, K., 2011. Microstructure and micro textural studies of friction stir welded aluminium alloy 5052, Materials and Design 32, p. 1657–1666.

Mumin Sahin, Joining with friction welding of high-speed steel and medium carbon steel, Mechanical Engineering Departement, Trakya University, Edirne,Turkey, 2004.

Nurdin, Fadli dan Imran, 2016, Sifat Mekanis Alumunium Paduan Pada Pengelasan Gesek Friction Stir Welding (FSW), Skripsi, Makassar: Politeknik Negeri Ujung Pandang.

Prasetya Dimas dkk, 2016, Pengaruh Kedalaman Pin (*Depth Plunge*) Terhadap Kekuatan Sambungan Las Pada Pengelasan Gesek Al.5083, Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Surakarta.

Raichard Pasau dan Misdar, 2017,Pengaruh Parameter Bentuk *Pin Shoulder* Pada Proses *Friction Stir Welding* (FSW) Alumunium AA 6061 Terhadap Sifat Mekanis.Skripsi, Makassar: Politeknik Negeri Ujung pandang .

Rajkumar, 2014, Studies on effect of tool design and welding parameters on the friction stir welding of dissimilar aluminium alloys AA 5052 – AA 6061. India. School of Mechanical and Building Sciences, VIT University.

Sadeesh,2014 *Studies on friction stir welding of* AA 2024 and AA 6061 dissimilar metals, India, School of Mechanical and Building Sciences, VIT University.

Spinler, 1994, What Industry Needs to know about Friction Welding, Welding Journal, march,p. 37-42

http://www.alcoa.com diakses pada tanggal 25 januari 2018 pukul 23:00 wita