

## DAFTAR ISI

|  | Halaman       |
|--|---------------|
| <b>HALAMAN JUDUL</b>                                 | <b>i</b>      |
| <b>HALAMAN PERSETUJUAN</b>                           | <b>iii</b>    |
| <b>PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI</b>                     | <b>v</b>      |
| <b>KATA PENGANTAR</b>                                | <b>vi</b>     |
| <b>DAFTAR ISI</b>                                    | <b>viii</b>   |
| <b>DAFTAR GAMBAR</b>                                 | <b>xii</b>    |
| <b>DAFTAR TABEL</b>                                  | <b>xix</b>    |
| <b>DAFTAR LAMPIRAN</b>                               | <b>xx</b>     |
| <b>DAFTAR SIMBOL</b>                                 | <b>xxi</b>    |
| <b>DAFTAR SINGKATAN</b>                              | <b>xxi</b>    |
| <b>INTISARI</b>                                      | <b>xxv</b>    |
| <b>ABSTRACT</b>                                      | <b>xxviii</b> |
| <b>BAB I PENDAHULUAN</b>                             | <b>1</b>      |
| 1.1 Latar Belakang                                   | 1             |
| 1.2 Rumusan Masalah                                  | 4             |
| 1.3 Batasan Masalah                                  | 5             |
| 1.4 Tujuan Penelitian                                | 5             |
| 1.5 Manfaat Penelitian                               | 6             |
| <b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>                       | <b>7</b>      |
| 2.1 Upaya perbaikan kualitas sambungan las aluminium | 7             |
| 2.2 Pengendalian tegangan sisa                       | 10            |
| 2.3 Perlakuan mekanik pada las FSW                   | 12            |
| 2.4 Keaslian Penelitian                              | 14            |
| <b>BAB III LANDASAN TEORI</b>                        | <b>21</b>     |
| 3.1 Aluminium dan Paduannya                          | 21            |
| 3.2 Proses <i>Friction Stir Welding</i>              | 27            |
| 3.3 Aliran Panas pada Las                            | 30            |
| 3.3.1 <i>Heat Generation</i>                         | 30            |
| 3.3.2 <i>Heat transfer</i>                           | 32            |

|               |   |           |
|---------------|---|-----------|
| 3.4           | Metalurgi Las   | 33        |
| 3.5           | Tegangan sisa   | 39        |
| 3.6           | Distorsi  | 44        |
| 3.7           | Kekerasan   | 47        |
| 3.8           | Laju Perambatan Retak Fatik   | 49        |
| 3.8.1         | Mekanika Perpatahan   | 49        |
| 3.8.2.        | Konsentrasi Tegangan  | 50        |
| 3.8.3         | Retak Fatik   | 51        |
| 3.8.4         | Laju Perambatan Retak Fatik   | 53        |
| 3.8.5         | Faktor Intensitas Tegangan ( $K_I$ )                                  | 55        |
| 3.8.6         | Pengaruh Tegangan Sisa Terhadap Laju Perambatan Retak Fatik           | 58        |
| 3.9           | Metode Pengendalian Tegangan sisa dengan <i>Thermal Tensioning</i>    | 60        |
| 3.9.1         | <i>Static Thermal Tensioning</i> (STT)                                | 60        |
| 3.9.2         | <i>Transient Thermal Tensioning</i> (TTT)                             | 62        |
| 3.9.3         | <i>Dynamically Controlled-Low Stress No Distortion</i> (DC LSND)      | 66        |
| 3.10          | Metode Pengendalian Tegangan sisa dengan <i>Mechanical Tensioning</i> | 68        |
| 3.10.1        | <i>Shot peening</i>   | 68        |
| 3.10.2        | Getaran   | 69        |
| 3.10.3        | Proses <i>rolling</i>   | 71        |
| 3.10.4        | <i>Stretching / Tensioning</i>  | 76        |
| <b>BAB IV</b> | <b>METODE PENELITIAN</b>  | <b>78</b> |
| 4.1           | Bahan Penelitian  | 78        |
| 4.2           | Alat Penelitian   | 78        |
| 4.3           | Desain Penelitian   | 79        |
| 4.3.1         | Pengamatan Struktur mikro   | 87        |
| 4.3.2         | Uji Kekerasan   | 87        |
| 4.3.3         | Uji Tarik   | 88        |
| 4.3.4         | Uji Laju Perambatan Retak Fatik                                       | 90        |
| 4.3.5         | Uji Tegangan Sisa Menggunakan <i>Neutron Diffraction</i>              | 94        |
| 4.3.7         | Pengukuran Distorsi   | 97        |
| 4.3.8         | Uji fraktografi SEM   | 98        |

|  |            |
|--|------------|
| 4.3.9 Uji tekstur  | 98         |
| 4.3.10 Uji EBSD ( <i>Electron Backscattered Diffraction</i> )  | 98         |
| 4.3.11 Uji XRD   | 99         |
| <b>BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN</b>  | <b>101</b> |
| 5.1 Material penelitian  | 101        |
| 5.2 Pengelasan FSW dengan variasi putaran  | 103        |
| 5.2.1 Siklus termal pengelasan   | 103        |
| 5.2.2 Struktur makro dan struktur mikro  | 105        |
| 5.2.3 Distribusi nilai kekerasan   | 109        |
| 5.2.4 Sifat-sifat tarik las FSW  | 111        |
| 5.3 Pengelasan FSW dengan perlakuan <i>transient thermal tensioning</i> (TTT)  | 115        |
| 5.3.1 Siklus termal pengelasan   | 115        |
| 5.3.2 Pengamatan struktur makro dan mikro  | 117        |
| 5.3.3 Distribusi nilai kekerasan   | 119        |
| 5.3.4 Sifat-sifat tarik las FSW dengan penambahan perlakuan TTT  | 121        |
| 5.3.5 Tegangan sisa  | 123        |
| 5.3.6 Distorsi pengelasan  | 127        |
| 5.3.7 Perambatan retak fatik   | 128        |
| 5.4 Pengelasan FSW dengan perlakuan <i>in situ rolling tensioning</i> (ISRT)   | 138        |
| 5.4.1 Siklus termal pengelasan   | 138        |
| 5.4.2 Pengamatan struktur mikro  | 140        |
| 5.4.3 Karakteristik tekstur  | 144        |
| 5.4.4 Distribusi kekerasan   | 145        |
| 5.4.5 Sifat tarik las FSW yang mendapatkan penambahan perlakuan <i>in situ rolling tensioning</i> (ISRT)   | 146        |
| 5.4.6 Tegangan sisa dan distorsi pada pengelasan   | 153        |
| 5.4.7 Laju perambatan retak fatik  | 157        |
| 5.5 Pengelasan FSW dengan perlakuan kombinasi ( <i>hybrid</i> ) <i>transient thermal tensioning</i> (TTT) dan <i>in situ rolling tensioning</i> (ISRT) | 162        |
| 5.5.1 Pengukuran distorsi  | 162        |
| 5.5.2 Pengukuran siklus termal   | 163        |

|  |  |            |
|--|--|------------|
| 5.5.3  | Hasil Pengukuran kekerasan mikro           | 166        |
| 4.5.4  | Pengamatan Struktur Mikro                  | 168        |
| 4.5.5  | Sifat tarik hasil las FSW                  | 172        |
| 5.5.6  | Pengujian tegangan sisa                    | 175        |
| 5.5.7  | Pengujian kecepatan perambatan retak fatik | 180        |
| 5.5.8  | Pengamatan SEM                             | 183        |
| <b>BAB VI PENUTUP</b>  |  | <b>185</b> |
| 6.1  | Kesimpulan                                 | 185        |
| 6.2  | Saran                                      | 187        |
| <b>DAFTAR PUSTAKA</b>  |  | <b>188</b> |
| <b>LAMPIRAN</b>  |  | <b>203</b> |
| Lampiran 1. Skema pengelasan FSW dengan penambahan perlakuan |  | 203        |
| Lampiran 2. Peralatan dan alat ukur pengujian                |  | 207        |
| Lampiran 3. Hasil pengujian tekstur                          |  | 209        |

## DAFTAR GAMBAR

|  |    |
|--|----|
| Gambar 2.1. <i>Friction stir welding</i>   | 8  |
| Gambar 2.2. <i>Tool FSW</i>  | 9  |
| Gambar 2.3. Proses <i>in situ rolling</i>  | 12 |
| Gambar 2.4. Proses pengerolan (a) mekanisme pengerolan (b) spesimen uji tarik (c) bagian FSW   | 13 |
| Gambar 2.5. Tegangan sisa (a) arah longitudinal (b) arah transversal   | 14 |
| Gambar 3.1. Skema <i>solution heat treatment</i> pada (a) AA2024-T3; (b) AA2024-T6   | 24 |
| Gambar 3.2. Diagram waktu – temperatur <i>precipitation hardening</i>  | 25 |
| Gambar 3.3. Korelasi <i>aging time</i> dan kekerasan   | 26 |
| Gambar 3.4. Diagram fasa Al – Cu   | 26 |
| Gambar 3.5. Proses <i>friction stir welding</i>  | 27 |
| Gambar 3.6. Skema proses FSW (a) awal proses (b) <i>tool</i> memasuki material (c) pengelasan (d) selesai pengelasan   | 28 |
| Gambar 3.7. Variasi pin dari <i>tool friction stir welding</i>   | 28 |
| Gambar 3.8. Variasi geometri <i>shoulder</i> dari <i>tool friction stir welding</i>  | 29 |
| Gambar 3.9. Sambungan dengan proses FSW: a. <i>square butt</i> , b. <i>edge butt</i> , c. <i>T butt joint</i> , d. <i>lap joint</i> , e. <i>multiple lap joint</i> , f. <i>T lap joint</i> , and g. <i>fillet joint</i>  | 29 |
| Gambar 3.10. Skema <i>tool tilt</i> (a) teori kontak <i>tool</i> dan material; (b) aktual kontak <i>tool</i> dan material  | 30 |
| Gambar 3.11. Area pembangkit panas pada <i>tool</i>  | 30 |
| Gambar 3.12. Profil daerah hasil lasan: a. <i>weld nugget</i> (WN), b. <i>heat affected zone</i> (HAZ), c. <i>thermomechanically affected zone</i> (TMAZ), d. <i>advancing side</i> (AS). e. <i>retreating side</i> (RS) | 34 |
| Gambar 3.13. Struktur mikro dari daerah <i>nugget</i> , TMAZ dan HAZ   | 35 |
| Gambar 3.14. Struktur mikro pada sisi <i>advancing side</i>  | 36 |
| Gambar 3.15. Rekristalisasi logam, $T > 0.5 T_m$   | 37 |
| Gambar 3.16. Sifat dan struktur pada HAZ   | 38 |
| Gambar 3.17. Urutan proses rekristalisasi  | 39 |
| Gambar 3.18. Mekanisme terjadinya tegangan sisa  | 40 |
| Gambar 3.19. Efek pada tegangan sisa dari pemanasan batang   | 42 |

|   |    |
|---|----|
| Gambar 3.20. Perubahan suhu dan tegangan sisa saat pengelasan   | 43 |
| Gambar 3.21. Distribusi tegangan sisa   | 44 |
| Gambar 3.22. Jenis distorsi: a. <i>transverse shrinkage</i> , b. <i>angular change</i> , c. <i>rotational distortion</i> , d. <i>longitudinal shrinkage</i> , e. <i>longitudinal bending distortion</i> , f. <i>buckling distortion</i> . | 45 |
| Gambar 3.23. Distorsi sudut   | 45 |
| Gambar 3.24. Metode pengurangan distorsi (a) <i>presetting</i> , (b) <i>prespringing</i> , dan (c) <i>preheating</i>  | 46 |
| Gambar 3.25. <i>Double V preparation</i>  | 47 |
| Gambar 3.26. Distribusi nilai kekerasan   | 47 |
| Gambar 3.27. Distribusi nilai kekerasan pada paduan AA5083 dan AA6082 yang dilas menggunakan FSW  | 48 |
| Gambar 3.28. Distribusi nilai kekerasan   | 48 |
| Gambar 3.29. Area mekanika perpatahan   | 49 |
| Gambar 3.30. Tahapan fase-fase dari <i>fatigue life</i>   | 50 |
| Gambar 3.31. Contoh takikan (a) Geometri takik/ <i>internal crack</i> , (b) skema profil tegangan   | 50 |
| Gambar 3.32. Inisiasi retak fatik   | 51 |
| Gambar 3.33. Pertumbuhan retak fatik  | 53 |
| Gambar 3.34. Kurva laju perambatan retak fatik terhadap faktor intensitas tegangan  | 54 |
| Gambar 3.35. Pengaruh ketebalan pada <i>fracture toughness</i>  | 56 |
| Gambar 3.36. <i>Critical fracture toughness versus thickness</i>  | 57 |
| Gambar 3.37. Pola pembebanan  | 57 |
| Gambar 3.38. Skema retak pada Mode I  | 58 |
| Gambar 3.39. Profil tegangan sisa M-Shape   | 59 |
| Gambar 3.40. Laju perambatan retak fatik  | 60 |
| Gambar 3.41. Skema STT  | 60 |
| Gambar 3.42. Skema proses pengelasan dengan STT   | 61 |
| Gambar 3.43. Perbandingan tegangan sisa hasil pengelasan <i>conventional welding</i> (CW) dan pengelasan dengan STT   | 61 |
| Gambar 3.44. Skema proses <i>transient thermal tensioning</i>   | 63 |
| Gambar 3.45. Ilustrasi model tegangan sisa, (A) tanpa TTT, (B) dengan TTT   | 63 |

|  |    |
|--|----|
| Gambar 3.46. Pertumbuhan retak fatik pada FSW dengan perlakuan TTT dan tanpa TTT   | 64 |
| Gambar 3.47. Skema proses TTT  | 65 |
| Gambar 3.48. <i>Welding distortion</i>   | 66 |
| Gambar 3.49. Skema proses <i>heat sink</i>   | 66 |
| Gambar 3.50. Skema DC-LSND   | 67 |
| Gambar 3.51. Skema dari prinsip DC-LCND (a) gradien suhu yang tinggi (b) efek <i>tensioning</i>  | 67 |
| Gambar 3.52. Skema penelitian (a) FSW, (b) <i>shot peening</i>   | 68 |
| Gambar 3.53. Skema UVeFSW  | 69 |
| Gambar 3.54. Sifat mekanik FSW dan UVaFSW (a) <i>ultimate tensile strength</i> , (b) <i>elongation</i>   | 70 |
| Gambar 3.55. Proses <i>rolling</i>   | 72 |
| Gambar 3.56. Teknik <i>rolling</i> lasan untuk menghilangkan <i>buckling</i> setelah pengelasan  | 73 |
| Gambar 3.57. Pengurangan tegangan sisa (a) Pengurangan tegangan sisa (b) deformasi plastis inversi   | 74 |
| Gambar 3.58. Profil hasil <i>rolling</i> (a), (b) relief tegangan sisa (c) penghilangan distorsi menggunakan proses <i>rolling</i> lasan   | 75 |
| Gambar 3.59. Kurva tegangan-regangan hasil <i>rolling</i>  | 75 |
| Gambar 3.60. Skema deformasi pada proses <i>rolling</i>  | 76 |
| Gambar 3.61. <i>In situ tensioning</i>   | 77 |
| Gambar 4.1. Ilustrasi pengambilan sampel pengujian   | 81 |
| Gambar 4.2. Diagram alir penelitian  | 82 |
| Gambar 4.3. Rancangan pengelasan FSW tanpa TTT dan FSW dengan TTT: (a) las konvensional; (b) TTT-25; (c) TTT-40 dan (d) TTT-55.  | 84 |
| Gambar 4.4. Perlakuan <i>in situ rolling</i> ; (a) rol tunggal; (b) rol ganda  | 85 |
| Gambar 4.5. Ilustrasi skema perlakuan <i>in situ rolling tensioning</i> (ISRT); (a) <i>roller</i> tunggal, dan (b), (c) <i>roller</i> ganda dengan jarak <i>roller</i> masing-masing 17 mm dan 25 mm | 86 |
| Gambar 4.6. Skema pengelasan FSW dengan penambahan perlakuan <i>hybrid</i>   | 87 |
| Gambar 4.7. Skema bekas injakan piramida intan   | 88 |
| Gambar 4.8. Posisi pengujian kekerasan <i>microVickers</i>   | 88 |
| Gambar 4.9. Spesimen uji tarik   | 89 |

|  |     |
|--|-----|
| Gambar 4.10. Menentukan kekuatan luluh ( $\sigma_Y$ )  | 90  |
| Gambar 4.11. Spesimen uji fatik <i>center-cracked tension</i> (CCT)  | 91  |
| Gambar 4.12. Diagram siklus pembebanan   | 91  |
| Gambar 4.13. Incremental <i>polynomial method</i>  | 93  |
| Gambar 4.14. Uji tegangan sisa; (a) proses las FSW; (b) posisi pengujian <i>neutron diffraction</i>  | 94  |
| Gambar 4.15. Skema <i>neutron diffraction</i> (a) ilustrasi difraktometer; (b) Pengukuran tegangan   | 95  |
| Gambar 4.16. Cincin <i>Debye-Scherrer</i> dari spesimen  | 96  |
| Gambar 4.17. Geometri cincin <i>Debye-Scherrer</i> dan spesimen, serta penentuan regangan kisi dalam metode cos alfa                       | 96  |
| Gambar 4.18. Titik Pengukuran Distorsi (satuan mm)   | 97  |
| Gambar 4.19. Mekanisme pembentukan pita Kikuchi untuk bidang kristal   | 99  |
| Gambar 5.1. Struktur mikro pada 3 sumbu utama (a); (b) <i>longitudinal</i> ; (c) <i>short transverse</i> ; dan (d) <i>long transverse</i>  | 101 |
| Gambar 5.2. Hasil uji tarik logam induk AA2024-T3  | 102 |
| Gambar 5.3. Pengukuran suhu pada variasi kecepatan putaran <i>tool</i> ; (a) 910 rpm; (b) 1500 rpm; (c) 2280 rpm                           | 105 |
| Gambar 5.4. Struktur makro spesimen; (a) 910 rpm; (b) 1500 rpm; (c) 2280 rpm   | 106 |
| Gambar 5.5. Struktur mikro pada masing-masing variasi putaran; (a)(b) putaran 910 rpm; (c)(d) putaran 1500 rpm dan (e)(f) putaran 2280 rpm | 108 |
| Gambar 5.6. (a) Mikrograf SEM daerah NZ; (B), (C), (D) spektrum EDX diambil dari daerah bertanda A, B, C pada Gambar 4.6(a)                | 109 |
| Gambar 5.7. Distribusi nilai kekerasan pada semua spesimen   | 110 |
| Gambar 5.8. Hasil uji tarik spesimen logam induk; 910 rpm; 1500 rpm dan 2280 rpm   | 112 |
| Gambar 5.9. Struktur makro uji tarik spesimen: (a) 910 rpm; (b) 1500 rpm; dan (c) 2280 rpm   | 113 |
| Gambar 5.10. Fraktografi SEM untuk permukaan perpatahan; (a) logam induk dan (b) las FSW 1500 rpm  | 114 |
| Gambar 5.11. Kurva suhu vs waktu; (a) las konvensional; (b) TTT-25; (c) TTT-40; (d) TTT-55   | 116 |
| Gambar 5.12. Kurva suhu vs waktu pada pendinginan kontinyu   | 116 |
| Gambar 5.13. Struktur makro sambungan FSW paduan AA2024-T3   | 117 |



|   |     |
|---|-----|
| Gambar 5.14. Struktur mikro NZ; (a) Las konvensional; (b) TTT-25 mm; (c) TTT-40 mm; (d) TTT-55 mm   | 119 |
| Gambar 5.15. Distribusi nilai kekerasan semua spesimen  | 120 |
| Gambar 5.16. Hasil uji tarik semua spesimen las FSW   | 122 |
| Gambar 5.17. Posisi patahan hasil uji tarik; (a) las konvensional; (b) TTT-25; (c) TTT-40 dan (d) TTT-55  | 123 |
| Gambar 5.18. Tegangan sisa las FSW arah longitudinal dengan metode <i>neutron diffraction</i>   | 125 |
| Gambar 5.19. Tegangan sisa las FSW arah transversal dengan metode <i>neutron diffraction</i>  | 126 |
| Gambar 5.20. Prinsip utama pengaruh perlakuan TTT   | 127 |
| Gambar 5.21. Hasil pengukuran distorsi las FSW dengan variasi TTT   | 128 |
| Gambar 5.22. Kurva panjang retak vs jumlah siklus dari spesimen las konvensional; TTT 25; TTT 40; TTT 55 dan logam induk AA2024-T3  | 129 |
| Gambar 5.23. Kurva $da/dN$ vs $\Delta K$ dari spesimen las konvensional; TTT 25; TTT 40; TTT 55 dan logam induk AA2024-T3   | 131 |
| Gambar 5.24. Garis <i>trendline</i> dari hasil uji perambatan retak fatik dari spesimen las konvensional; TTT 25; TTT 40; TTT 55 dan logam induk AA2024-T3                                      | 132 |
| Gambar 5.25. Skema retakan, (a) zona plastis ujung retak; (b) kondisi tegangan sisa   | 133 |
| Gambar 5.26. Tegangan tekan sisa pada ujung retak akibat beban lebih. (a) zona plastis monotonik. (b) zona plastis siklik setelah beban lebih.  | 134 |
| Gambar 5.27. Fraktografi SEM perpatahan fatik: (a) las konvensional; (b) TTT-25 mm dan (c), (d) area yang diperbesar masing-masing ditandai dengan kotak pada Gambar 5.27(a) dan Gambar 5.27(b) | 135 |
| Gambar 5.28. Pengukuran suhu dengan termokopel ( $T_c$ ) pada jarak 10 mm, 17 mm dan 25 mm dari garis tengah las  | 139 |
| Gambar 5.29. Jarak rol ganda dari pusat las; (a) rol ganda-17; (b) rol ganda-25   | 139 |
| Gambar 5.30. Struktur mikro daerah NZ; (a) las konvensional, (b) rol tunggal dan (c) rol ganda-17, (d) rol ganda-25   | 141 |
| Gambar 5.31. (a) Mikrograf SEM daerah NZ; (b), (c), (d) spektrum EDX diambil dari daerah bertanda A, B, C pada Gambar 4.31(a)   | 142 |

|   |     |
|---|-----|
| Gambar 5.32. Hasil pengujian XRD menunjukkan adanya $Al_2Cu$  | 142 |
| Gambar 5.33. Struktur mikro permukaan atas NZ untuk: (a) las kondisi konvensional, (b) rol tunggal dan (c) rol ganda-17, (d) rol ganda-25   | 143 |
| Gambar 5.34. <i>Pole figure</i> (111) dari: (a) Logam induk (BM), (b) NZ las konvensional dan (c) NZ rol tunggal dengan: (a.1), (b.1), (c.1) <i>inverse pole figure</i> yang sesuai di ND masing-masing | 145 |
| Gambar 5.35. Distribusi kekerasan <i>microVickers</i> pada semua spesimen   | 146 |
| Gambar 5.36. Sifat tarik spesimen las FSW dengan variasi jenis rol  | 148 |
| Gambar 5.37. Posisi perpatahan uji tarik; (a) las konvensional, (b) ISRT rol tunggal; (c) ISRT rol ganda-17mm; dan (d) ISRT rol ganda-25 mm   | 149 |
| Gambar 5.38. Suhu sisi AS dan sisi RS pada pengelasan FSW AA2024-T3   | 149 |
| Gambar 5.39. Struktur mikro daerah las untuk: (a) las konvensional, (b) rol tunggal, (c) rol ganda-17 mm, (d) rol ganda-25mm  | 150 |
| Gambar 5.40. Peta EBSD yang menggambarkan struktur mikro dan <i>inverse pole figure</i> di daerah NZ dekat TMAZ di: (a) sisi maju (AS) dan (b) sisi mundur (RS).  | 152 |
| Gambar 5.41. Fraktografi SEM untuk permukaan perpatahan; (a) Las konvensional dan (b) ISRT rol tunggal  | 153 |
| Gambar 5.42. Tegangan sisa las FSW dengan menggunakan metode <i>X-Ray diffraction</i>   | 154 |
| Gambar 5.43. Distorsi <i>out-of-plane</i> pada arah longitudinal  | 156 |
| Gambar 5.44. Distorsi <i>out-of-plane</i> pada arah transversal   | 156 |
| Gambar 5.45. Kurva panjang retakan (a) vs jumlah siklus (N) untuk spesimen las konvensional; rol tunggal; rol ganda-17; rol ganda-25 dan logam induk AA2024-T3  | 158 |
| Gambar 5.46. Kurva $da/dN$ vs. $\Delta K$ untuk spesimen las konvensional; rol tunggal; rol ganda-17; rol ganda-25 dan logam induk AA2024-T3  | 159 |
| Gambar 5.47. <i>Trendline</i> dari kurva $da/dN$ wilayah II vs $\Delta K$ pada Gambar 5.46  | 160 |
| Gambar 5.48. Fraktograf uji fatik: (a) las konvensional (b) ISRT rol tunggal dan (a.1), (b.1) area yang diperbesar ditandai dengan kotak pada Gambar 5.48(a), (b)                                       | 161 |
| Gambar 5.49. Ilustrasi <i>buckling distortion</i>   | 162 |
| Gambar 5.50. Hasil pengukuran distorsi spesimen las FSW   | 163 |
| Gambar 5.51. Pengukuran suhu dengan termokopel ( $T_c$ ) pada jarak 10 mm,  |     |

|   |     |
|---|-----|
| 25 mm dan 40 mm dari garis tengah las; (a) las konvensional;<br>(b) TTT; (c) S800; (d) <i>hybrid</i> 800TTT   | 166 |
| Gambar 5.52. Distribusi nilai kekerasan (permukaan)   | 167 |
| Gambar 5.53. Distribusi nilai kekerasan pada bagian tengah NZ   | 168 |
| Gambar 5.54. Struktur mikro pada daerah NZ; (a) las konvensional; (b) TTT;<br>(c) S800; (d) <i>hybrid</i> 800TTT  | 170 |
| Gambar 5.55. Struktur mikro pada daerah TMAZ-HAZ-NZ; (a) las konvensional; (b) TTT; (c) S800; (d) <i>hybrid</i> 800TTT  | 171 |
| Gambar 5.56. Sifat tarik spesimen hasil las FSW dari spesimen las konvensional; TTT; S800 dan <i>hybrid</i> 800TTT  | 173 |
| Gambar 5.57. Lokasi perpatahan uji tarik; (a) las konvensional; (b) TTT; (c) S800; (d) <i>hybrid</i> 800TTT   | 175 |
| Gambar 5.58. Tegangan sisa arah longitudinal pada semua spesimen yang diukur dengan metode <i>neutron diffraction</i>   | 177 |
| Gambar 5.59. Tegangan sisa arah transversal pada semua spesimen yang diukur dengan metode <i>neutron diffraction</i>  | 179 |
| Gambar 5.60. Tegangan sisa arah longitudinal pada semua spesimen yang diukur dengan metode <i>X-Ray diffraction</i>   | 179 |
| Gambar 5.61. Jumlah siklus, N, vs panjang retak a dari spesimen las konvensional; TTT; S800 dan <i>hybrid</i> 800TTT  | 180 |
| Gambar 5.62. Kurva da/dN vs $\Delta K$ dari spesimen las konvensional; TTT; S800 dan <i>hybrid</i> 800TTT   | 181 |
| Gambar 5.63. <i>Trendline</i> dari spesimen las konvensional; TTT; S800 dan <i>hybrid</i> 800TTT  | 182 |
| Gambar 5.64. Fraktografi SEM patahan uji fatik: (a) las konvensional, (b) TTT, (c) S800 (d) <i>hybrid</i> 800TTT dan (a.1), (b.1), (c.1), dan (d.1) area yang diperbesar yang ditandai dengan kotak pada Gambar 5.64(a), (b), (c) dan (d) | 184 |

## DAFTAR TABEL

|  |     |
|--|-----|
| Tabel 2. 1. Penelitian FSW yang telah dilakukan                              | 14  |
| Tabel 3. 1. Pengelompokan <i>wrought</i> aluminium dan <i>cast</i> aluminium | 22  |
| Tabel 4. 1. Komposisi kimia dalam % berat                                    | 78  |
| Tabel 4. 2. Dimensi <i>tool</i> dan parameter las FSW                        | 78  |
| Tabel 4. 3. Peralatan dan perlengkapan yang digunakan dalam penelitian       | 79  |
| Tabel 4. 4. Pengaturan peralatan uji XRD                                     | 100 |
| Tabel 5. 1. Komposisi kimia dari AA2024-T3 standar                           | 101 |
| Tabel 5. 2. Komposisi kimia dari AA2024-T3 hasil uji                         | 101 |
| Tabel 5. 3. Sifat mekanik dari AA2024-T3 hasil uji                           | 102 |
| Tabel 5. 4. Sifat mekanik dari AA2024-T3 standar                             | 103 |
| Tabel 5. 5. Konstanta Paris spesimen las FSW dan logam induk AA2024-T3       | 132 |
| Tabel 5. 6. Konstanta Paris  | 160 |
| Tabel 5. 7. Nilai konstanta paris semua spesimen                             | 183 |

## DAFTAR LAMPIRAN

|  |     |
|--|-----|
| Lampiran 1. Skema pengelasan FSW dengan penambahan perlakuan | 194 |
| Lampiran 2. Peralatan dan alat ukur pengujian                | 198 |
| Lampiran 3. Hasil pengujian tekstur                          | 200 |

## DAFTAR SIMBOL

|                      |   |
|----------------------|---|
| $a$                  | : panjang retak   |
| $A_0$                | : luas penampang mula-mula                              |
| $A_f$                | : luas penampang akhir                                  |
| $B$                  | : tebal spesimen  |
| $b_0, b_1$ dan $b_2$ | : Parameter regresi                                     |
| $d$                  | : diagonal injakan rata-rata                            |
| $d_1$                | : diagonal indentasi 1                                  |
| $d_2$                | : diagonal indentasi 2                                  |
| $da/dN$              | : laju pertumbuhan retak                                |
| $d_{hkl}$            | : jarak antar bidang pada indek Miller h, k dan l       |
| $E$                  | : modulus <i>Young</i> /modulus elastisitas             |
| $F$                  | : gaya aksial/gaya tarik                                |
| $f$                  | : frekwensi   |
| $hkl$                | : indeks Miller untuk bidang kristalografi              |
| $H_{net}$            | : Suhu input  |
| $HV$                 | : kekerasan <i>microVickers</i>                         |
| $k$                  | : konstanta konduktivitas panas                         |
| $K_I$                | : intensitas tegangan                                   |
| $K_{max}$            | : faktor intensitas tegangan kondisi maksimum           |
| $K_{min}$            | : faktor intensitas tegangan kondisi minimum            |
| $K_{res}$            | : faktor intensitas tegangan pada kondisi tegangan sisa |
| $K_t$                | : faktor konsentrasi tegangan                           |
| $l_f$                | : panjang ukur setelah patah                            |
| $L_0$                | : panjang mula-mula                                     |
| $l_0$                | : panjang ukur mula-mula                                |
| $N$                  | : jumlah siklus   |
| $P$                  | : beban   |
| $Q$                  | : energi panas  |
| $Q_1$                | : panas yang ditimbulkan oleh <i>shoulder</i>           |

|                  |   |
|------------------|---|
| $Q_2$            | : panas yang ditimbulkan oleh <i>pin</i>                        |
| $Q_2$            | : panas yang ditimbulkan oleh ujung <i>pin/probe</i>            |
| $q_w$            | : masukan panas   |
| $R$              | : rasio tegangan  |
| $T$              | : temperatur  |
| $T_{c-10}$       | : termokopel jarak 10mm   |
| $T_{c-25}$       | : termokopel jarak 25mm   |
| $T_{c-40}$       | : termokopel jarak 40mm   |
| $T_m$            | : temperatur cair   |
| $\nu$            | : rasio poisson   |
| $V$              | : kecepatan pengelasan  |
| $W$              | : lebar benda   |
| $Y$              | : jarak pengelasan  |
| $\alpha$         | : difusivitas panas   |
| $\alpha_{aw}$    | : Perbandingan antara dua kali panjang retak dan lebar spesimen |
| $\sigma$         | : tegangan tarik  |
| $\sigma_m$       | : tegangan maksimum   |
| $+\sigma_{max}$  | : tegangan maksimum   |
| $-\sigma_{min}$  | : tegangan minimum  |
| $\sigma_{ii}$    | : komponen tegangan tensor                                      |
| $\sigma_y$       | : kekuatan luluh  |
| $\sigma_{xx}$    | : komponen tegangan arah xx                                     |
| $\sigma_{yy}$    | : komponen tegangan arah yy                                     |
| $\sigma_{zz}$    | : komponen tegangan arah zz                                     |
| $\sigma$         | : tegangan tarik  |
| $\Delta K$       | : rentang faktor intensitas tegangan                            |
| $\Delta K_{eff}$ | : rentang faktor intensitas tegangan efektif                    |
| $\Delta K_{th}$  | : faktor intensitas tegangan <i>threshold</i>                   |
| $\Delta L$       | : pertambahan panjang   |
| $2\theta$        | : sudut difraksi Bragg  |

|                     |                                     |
|---------------------|-------------------------------------|
| $\varepsilon$       | : regangan                          |
| $\varepsilon_{hkl}$ | : regangan bidang                   |
| $\varepsilon_{ii}$  | : komponen regangan tensor          |
| $\varepsilon_{xx}$  | : komponen regangan arah xx         |
| $\varepsilon_{yy}$  | : komponen regangan arah yy         |
| $\varepsilon_{zz}$  | : komponen regangan arah zz         |
| $\mu$               | : koefisien gesek                   |
| $\omega$            | : putaran <i>shoulder</i>           |
| $\lambda$           | : panjang gelombang radiasi neutron |
| $\rho$              | : massa jenis                       |
| $\rho_c$            | : panas jenis                       |
| $\theta_{hkl}$      | : sudut difraksi                    |
| $C, n$              | : konstanta paris                   |



## DAFTAR SINGKATAN

|        |  |
|--------|--|
| AS     | : <i>Advancing Side</i>                                  |
| BM     | : <i>Base Metal</i>                                      |
| DCLSND | : <i>Dynamically Controlled-Low Stress No Distortion</i> |
| EBSD   | : <i>Electron Backscattered Diffraction</i>              |
| EDX    | : <i>Energy Dispersive X-Ray</i>                         |
| FCGR   | : <i>Fatigue Crack Growth Rate</i>                       |
| FSW    | : <i>Friction Stir Welding</i>                           |
| GMT    | : <i>Global Mechanical Tensioning</i>                    |
| HAZ    | : <i>Heat Affected Zone</i>                              |
| ISRT   | : <i>In situ Rolling Tensioning</i>                      |
| LT     | : <i>Long Transverse</i>                                 |
| ND     | : <i>Normal Direction</i>                                |
| NDT    | : <i>Non Destructive Testing</i>                         |
| NZ     | : <i>Nugget Zone</i>                                     |
| RS     | : <i>Retreating Side</i>                                 |
| SEM    | : <i>Scanning Electron Microscope</i>                    |
| ST     | : <i>Short Transverse</i>                                |
| STT    | : <i>Static Thermal Tensioning</i>                       |
| TMAZ   | : <i>Thermomechanically Affected Zone</i>                |
| TD     | : <i>Transverse Direction</i>                            |
| TTT    | : <i>Transient Thermal Tensioning</i>                    |
| XRD    | : <i>X-Ray Diffraction</i>                               |