

DAFTAR ISI

| | |
|--|-------|
| KATA PENGANTAR | i |
| INTISARI | iv |
| ABSTRACT | v |
| DAFTAR ISI | vi |
| DAFTAR GAMBAR | ix |
| DAFTAR TABEL | xv |
| DAFTAR NOTASI | xvii |
| DAFTAR SINGKATAN | xviii |
| DAFTAR LAMPIRAN | xix |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar belakang | 1 |
| 1.2 Perumusan masalah | 7 |
| 1.3 Batasan masalah | 8 |
| 1.4 Tujuan penelitian | 9 |
| 1.5 Keaslian penelitian | 9 |
| 1.6 Manfaat penelitian | 11 |
| BAB II TUNJAUAN PUSTAKA | 12 |
| 2.1 Tinjauan pustaka | 12 |
| 2.2 Kerangka kerja teori | 19 |
| 2.3 Kerangka kerja konseptual | 19 |
| BAB III DASAR TEORI | 21 |
| 3.1 Magnesium dan paduannya | 21 |
| 3.2 Aluminium dan paduannya | 25 |
| 3.3 <i>Friction stir welding</i> | 32 |
| 3.4 Prinsip kerja FSW | 33 |
| 3.5 Desain dan material <i>tool</i> (<i>shoulder</i> dan <i>pin</i>) | 34 |
| 3.6 Sambungan las FSW | 49 |
| 3.7 Perpindahan panas pada las FSW | 43 |
| 3.7.1 Masukan panas (<i>heat input</i>) las FSW | 44 |
| 3.7.2 Distribusi panas las FSW | 48 |
| 3.8 Aliran material pada las FSW | 50 |
| 3.9 Proses termo-mekanik | 53 |
| 3.10 Senyawa intermetalik | 54 |
| 3.11 Pengelasan FSW tidak sejenis (<i>Dissimilar</i>) | 56 |
| 3.12 Sifat mekanik FSW | 58 |
| 3.10.1 Distribusi kekerasan pada las FSW | 58 |
| 3.10.2 Kekuatan tarik pada las FSW | 59 |
| 3.13 Tegangan sisa (<i>residual stress</i>) pada las FSW | 59 |
| 3.14 Laju Perambatan retak fatik pada las FSW | 63 |
| 3.14.1 Mekanisme perambatan Retak | 64 |
| 3.14.2 Perambatan retak fatik | 65 |
| 3.15 Perlakuan <i>shot peening</i> pada hasil las FSW | 69 |
| 3.16 Korosi pada sambungan FSW | 70 |
| 3.17 Teknik penguatan material | 71 |

| | |
|--|-----------|
| BAB IV METODE PENELITIAN | 73 |
| 4.1 Bahan dan peralatan penelitian | 73 |
| 4.2 Pahat yang digunakan pada pengelasan FSW | 76 |
| 4.3 Parameter penelitian | 77 |
| 4.4 Rancangan penelitian | 78 |
| 4.5 Proses Pengelasan FSW | 80 |
| 4.6 Proses Pengambilan data | 81 |
| 4.6.1 Pengukuran siklus termal pengelasan FSW | 81 |
| 4.6.2 Posisi pengambilan sampel uji | 82 |
| 4.6.3 Pengamatan struktur mikro | 83 |
| 4.6.4 Pengujian kekerasan (<i>hardness test</i>) | 84 |
| 4.6.5 Pengujian tarik (<i>tensile test</i>) | 85 |
| 4.6.6 Pengujian perambatan retak fatik (<i>fatigue crack growth</i>) | 87 |
| 4.6.7 Pengujian laju korosi sambungan las | 90 |
| 4.6.8 Perlakuan <i>shot peening</i> | 91 |
| 4.6.9 Pengukuran tegangan sisa (<i>residual stress</i>) | 93 |
| 4.7 Diagram penelitian | 95 |
| BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN | 99 |
| 5.1 Pengelasan FSW similar magnesium alloy AZ31B-H24 | 99 |
| 5.1.1 Material magnesium alloy AZ31B-H24 | 99 |
| 5.1.2 Siklus thermal | 100 |
| 5.1.3 Struktur mikro sambungan las | 106 |
| 5.1.4 Kekuatan tarik sambungan las | 113 |
| 5.1.5 Kekerasan sambungan las | 119 |
| 5.1.6 Tegangan sisa sambungan las | 121 |
| 5.1.7 Perambatan retak fatik sambungan las | 123 |
| 5.1.8 Ketahanan laju korosi sambungan las | 134 |
| 5.2 Perlakuan <i>shot peening</i> pada sambungan las FSW AZ31B-H24 | 138 |
| 5.2.1 Kekasaran permukaan sambungan las pasca <i>shot peening</i> | 138 |
| 5.2.2 Struktur mikro sambungan las pasca <i>shot peening</i> | 141 |
| 5.2.3 Kekuatan tarik sambungan las pasca <i>shot peening</i> | 143 |
| 5.2.4 Nilai kekerasan sambungan las pasca <i>shot peening</i> | 147 |
| 5.2.5 Tegangan sisa sambungan las pasca <i>shot peening</i> | 149 |
| 5.2.6 Kekuatan perambatan retak fatik sambungan las pasca <i>shot peening</i> | 153 |
| 5.2.7 Metalografi sambungan las pasca <i>shot peening</i> | 158 |
| 5.2.8 Ketahanan laju korosi sambungan las pasca <i>shot peening</i> | 164 |
| 5.3 Pengelasan FSW similar aluminium alloy AA6061-T6 | 166 |
| 5.3.1 Material aluminium alloy AA6061-T6 | 166 |
| 5.3.2 Siklus termal | 168 |
| 5.3.3 Struktur makro dan mikro sambungan las | 173 |
| 5.3.4 Kekuatan tarik sambungan las | 180 |
| 5.3.5 Kekerasan sambungan las | 184 |
| 5.3.6 Tegangan sisa sambungan las | 187 |
| 5.3.7 Perambatan retak fatik sambungan las | 188 |
| 5.3.8 Ketahanan laju korosi sambungan las | 194 |

| | |
|---|-----|
| 5.4 Perlakuan <i>shot peening</i> pada sambungan las FSW AA6061-T6 | 197 |
| 5.4.1 Perlakuan <i>shot peening</i> pada sambungan las FSW AA6061-T6 | 197 |
| 5.4.2 Struktur mikro sambungan las pasca <i>shot peening</i> | 198 |
| 5.4.3 Kekuatan tarik sambungan las pasca <i>shot peening</i> | 200 |
| 5.4.4 Nilai kekerasan sambungan las pasca <i>shot peening</i> | 203 |
| 5.4.5 Tegangan sisa sambungan las pasca <i>shot peening</i> | 205 |
| 5.4.6 Kekuatan perambatan retak fatik sambungan las pasca <i>shot peening</i> | 207 |
| 5.4.7 Ketahanan laju korosi sambungan las pasca <i>shot peening</i> | 212 |
| 5.5 Pengelasan FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 | 215 |
| 5.5.1 Siklus termal fsw tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 | 216 |
| 5.5.2 Visualisasi, struktur makro dan mikro sambungan las | 220 |
| 5.5.3 SEM dan EDX sambungan las FSW tak sejenis | 224 |
| 5.5.4 Kekuatan tarik sambungan las FSW tak sejenis | 232 |
| 5.5.5 Kekerasan sambungan las FSW tak sejenis | 234 |
| 5.5.6 Tegangan sisa sambungan las FSW tak sejenis | 236 |
| 5.5.7 Perambatan retak fatik sambungan las FSW tak sejenis | 238 |
| 5.5.8 Ketahanan laju korosi sambungan las FSW tak sejenis | 242 |
| 5.6 Perlakuan <i>Shot Peening</i> pada Sambungan Las FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 | 245 |
| 5.6.1 Kekuatan tarik sambungan las FSW tak sejenis pasca <i>shot peening</i> | 245 |
| 5.6.2 Nilai kekerasan sambungan las FSW tak sejenis pasca <i>shot peening</i> | 247 |
| 5.6.3 Tegangan sisa sambungan las FSW tak sejenis pasca <i>shot peening</i> | 251 |
| 5.6.4 Kekuatan perambatan retak fatik sambungan las FSW tak sejenis pasca <i>shot peening</i> | 252 |
| 5.6.5 Ketahanan laju korosi sambungan las FSW tak sejenis pasca <i>shot peening</i> | 258 |
| BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN | 260 |
| 6.1 Kesimpulan | 260 |
| 6.2 Saran | 264 |
| DAFTAR PUSTAKA | 265 |
| DAFTAR LAMPIRAN | 280 |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|-------------|---|----|
| Gambar 1.1 | Panel dashboard dari material paduan Al-Mg | 1 |
| Gambar 1.2 | Proses pengelasan FSW paduan aluminium pada industri | 4 |
| Gambar 2.1 | Kerangka kerja teori penelitian | 19 |
| Gambar 2.2 | Kerangka kerja konseptual penelitian | 19 |
| Gambar 3.1 | Magnesium paduan dan proses pembentukan | 21 |
| Gambar 3.2 | Diagram fasa paduan magnesium-aluminium | 21 |
| Gambar 3.3 | Grafik magnesium paduan AZ31 | 24 |
| Gambar 3.4 | Struktur mikro magnesium paduan AZ31B-H24 | 25 |
| Gambar 3.5 | Skema <i>heat treatment</i> pada proses <i>age-hardening</i> | 27 |
| Gambar 3.6 | Grafik <i>artificial aging</i> pada aluminium paduan | 29 |
| Gambar 3.7 | Struktur mikro aluminium paduan AA6061-T6 | 30 |
| Gambar 3.8 | Grafik pembentukan persipitasi pada proses pengelasan | 31 |
| Gambar 3.9 | Skematik FSW (<i>friction stir welding</i>) | 33 |
| Gambar 3.10 | Posisi <i>advancing side</i> dan <i>retreating side</i> terhadap arah putaran <i>tool</i> | 34 |
| Gambar 3.11 | Jenis <i>shoulder tool</i> pada pengelasan FSW | 36 |
| Gambar 3.12 | Bentuk <i>pin</i> pada pengelasan FSW | 37 |
| Gambar 3.13 | Daerah SZ, TMAZ HAZ, BM pengelasan FSW | 40 |
| Gambar 3.14 | Struktur mikro FSW AA6061-T6 | 40 |
| Gambar 3.15 | Daerah pembangkitan panas pada <i>tool</i> | 44 |
| Gambar 3.16 | Geometri bentuk <i>pin</i> segitiga dan bujur sangkar | 46 |
| Gambar 3.17 | Proses tahapan pengelasan FSW | 46 |
| Gambar 3.18 | Diagram panas pada proses pengelasan FSW | 48 |
| Gambar 3.19 | Siklus termal pada pengelasan FSW | 50 |
| Gambar 3.20 | Ikatan antarmuka sambungan FSW | 51 |
| Gambar 3.21 | Pola aliran material pengelasan FSW AA6061-T6/AZ31 | 51 |
| Gambar 3.22 | Aliran material proses pengelasan FSW | 52 |
| Gambar 3.23 | Diagram fase Al-Mg | 55 |
| Gambar 3.24 | Daerah terbentuknya IMCs pada FSW tidak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 | 56 |
| Gambar 3.25 | Distribusi kekerasan sambungan FSW AA6061-T6/AZ31B-H24 | 58 |
| Gambar 3.26 | Tegangan tarik pengelasan FSW tidak sejenis AA6061/AZ31B | 59 |
| Gambar 3.27 | Skema tegangan sisa pada proses pengelasan FSW | 60 |
| Gambar 3.28 | Distribusi keseimbangan tegangan sisa | 62 |
| Gambar 3.29 | Distribusi tegangan sisa pada pengelasan FSW | 63 |
| Gambar 3.30 | Proses perambatan retak fatik | 64 |
| Gambar 3.31 | Mekanisme retak material logam | 65 |
| Gambar 3.32 | Jenis mode pembebanan FCG (<i>fatigue crack growth</i>) | 66 |
| Gambar 3.33 | Skema retak awal pada spesimen uji fatik | 67 |
| Gambar 3.34 | Daerah plotting da/dN vs ΔK pada FCG | 68 |
| Gambar 3.35 | Skema <i>shot peening</i> | 70 |
| Gambar 3.36 | Struktur permukaan material setelah perlakuan <i>shot peening</i> | 70 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Gambar 3.37 | Kekuatan fatik sambungan las dengan perlakuan <i>shot peening</i> | 71 |
| Gambar 4.1 | Geometry <i>pin</i> pengelasan FSW | 76 |
| Gambar 4.2 | Rancangan pengelasan FSW | 81 |
| Gambar 4.3 | Skema pengukuran siklus termal pada pengelasan FSW | 82 |
| Gambar 4.4 | Posisi pengambilan sampel | 84 |
| Gambar 4.5 | Penampang uji kekerasan sambungan las FSW | 85 |
| Gambar 4.6 | Pijakan indenter <i>Vickers microhardness (VHN)</i> | 85 |
| Gambar 4.7 | Spesimen uji tarik (ASTM E-8) | 85 |
| Gambar 4.8 | Grafik menentukan tegangan luluh/ <i>yeild</i> (σ_y) | 87 |
| Gambar 4.9 | Spesimen uji perambatan retak fatik model middle tesion M(T) atau <i>CCT (centre-cracked tension)</i> (ASTM E-647) | 87 |
| Gambar 4.10 | Siklus diagram pembebanan fatik | 88 |
| Gambar 4.11 | Diagram <i>incremental polynomial method</i> | 89 |
| Gambar 4.12 | Spesimen uji laju korosi (ASTM G-48) | 90 |
| Gambar 4.13 | Skema uji laju korosi model 3 sel elektroda | 91 |
| Gambar 4.14 | Skema <i>shot peening</i> pada sambungan las FSW | 92 |
| Gambar 4.15 | Posisi pengukuran tegangan sisa dengan <i>diffraction neutron</i> | 93 |
| Gambar 4.16 | Skema pengukuran tegangan sisa dengan <i>diffraction neutron</i> | 94 |
| Gambar 4.17 | Diagram alir penelitian | 95 |
| Gambar 5.1 | Struktur mikro logam induk AZ31B-H24 | 100 |
| Gambar 5.2 | Siklus termal FSW AZ31B-H24 dengan bentuk <i>pin</i> silinder | 101 |
| Gambar 5.3 | Siklus termal FSW AZ31B-H24 dengan bentuk <i>pin</i> persegi | 103 |
| Gambar 5.4 | Siklus termal FSW AZ31B-H24 dengan bentuk <i>pin</i> segitiga | 104 |
| Gambar 5.5 | Temperatur puncak jarak 10 cm dari garis pengelasan FSW AZ31B-H24 dengan variasi putaran dan bentuk pin | 105 |
| Gambar 5.6 | Perbedaan bentuk dan jari-jari pin (R_{pin}) | 106 |
| Gambar 5.7 | Struktur mikro daerah pengadukan (SZ) FSW AZ31B-H24 | 108 |
| Gambar 5.8 | Sambungan FSW AZ31B-H24 dengan geometri <i>pin</i> silinder | 108 |
| Gambar 5.9 | Sambungan FSW AZ31B-H24 dengan geometri <i>pin</i> segi empat | 110 |
| Gambar 5.10 | Sambungan FSW AZ31B-H24 dengan geometri <i>pin</i> segi tiga | 111 |
| Gambar 5.11 | SEM, EDX, dan X-rd struktur mikro | 112 |
| Gambar 5.12 | Kekuatan tarik dan keuletan sambungan FSW AZ31B-H24 | 114 |
| Gambar 5.13 | Efisiensi sambungan las FSW AZ31B-H24 | 115 |
| Gambar 5.14 | Profil patahan uji tarik sambungan las FSW AZ31B-H24 | 116 |
| Gambar 5.15 | SEM patahan uji tarik sambungan FSW AZ31B-H24 | 118 |
| Gambar 5.16 | Kekerasan sambungan FSW AZ31B-H24 | 120 |
| Gambar 5.17 | Tegangan sisa sambungan FSW AZ31B-H24 | 122 |
| Gambar 5.18 | Perbandingan siklus dan panjang retak fatik sambungan FSW AZ31B-H24 dengan spesimen M(T) | 124 |
| Gambar 5.19 | Perambatan retak fatik sambungan FSW AZ31B-H24 dengan spesimen M(T) | 125 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Gambar 5.20 | <i>Trendline</i> perambatan retak fatik Gambar 5.19 | 126 |
| Gambar 5.21 | SEM permukaan patahan fatik daerah I sambungan FSW AZ31B-H24 | 127 |
| Gambar 5.22 | SEM permukaan patahan fatik daerah II sambungan FSW AZ31B-H24 | 128 |
| Gambar 5.23 | Perambatan retak fatik sambungan FSW AZ31B-H24 dengan spesimen SECT | 129 |
| Gambar 5.24 | Perbandingan siklus dan panjang retak fatik sambungan FSW AZ31B-H24 dengan spesimen SECT | 130 |
| Gambar 5.25 | SEM permukaan patahan fatik sambungan FSW AZ31B-H24 dengan spesimen SECT pada putaran 2280 rpm | 131 |
| Gambar 5.26 | SEM faktografi patahan fatik sambungan FSW AZ31B-H24 spesimen SECT daerah AS dan RS | 132 |
| Gambar 5.27 | Tafel polarisasi sambungan FSW AZ31B-H24 dengan variasi bentuk <i>pin</i> | 136 |
| Gambar 5.28 | Kekasaran sambungan FSW AZ31B-H24 variasi intensitas <i>shot peening</i> | 138 |
| Gambar 5.29 | SEM Permukaan daerah SZ dengan variasi intensitas <i>shot peening</i> | 140 |
| Gambar 5.30 | Struktur mikro sambungan FSW AZ31B-H24 dengan variasi intensitas <i>shot peening</i> | 141 |
| Gambar 5.31 | Struktur mikro daerah SZ sambungan FSW AZ31B-H24 pada intensitas <i>shot peening</i> 0,006A | 142 |
| Gambar 5.32 | Kekuatan tarik dan regangan sambungan FSW AZ31B-H24 pasca perlakuan <i>shot peening</i> | 144 |
| Gambar 5.33 | Profil patahan uji tarik sambungan las FSW AZ31B-H24 pasca perlakuan <i>shot peening</i> | 145 |
| Gambar 5.34 | SEM patahan uji tarik sambungan las FSW AZ31B-H24 pasca perlakuan <i>shot peening</i> | 147 |
| Gambar 5.35 | Nilai kekerasan sambungan FSW AZ31B-H24 pasca perlakuan <i>shot peening</i> | 148 |
| Gambar 5.36 | Nilai kekerasan arah vertikal ketebalan plat FSW AZ31B-H24 pasca perlakuan <i>shot peening</i> | 149 |
| Gambar 5.37 | Tegangan sisa sambungan FSW AZ31B-H24 pasca perlakuan <i>shot peening</i> | 150 |
| Gambar 5.38 | Tegangan sisa sambungan FSW AZ31B-H24 intensitas <i>shot peening</i> 0,006A menggunakan <i>neutron diffraction</i> | 152 |
| Gambar 5.39 | Perbandingan panjang retak (<i>a</i>) dan siklus fatik (<i>N</i>) sambungan FSW AZ31B-H24 dengan variasi intensitas <i>shot peening</i> | 153 |
| Gambar 5.40 | Perambatan retak fatik sambungan FSW AZ31B-H24 dengan variasi intensitas <i>shot peening</i> | 154 |
| Gambar 5.41 | <i>Trendline</i> perambatan retak fatik Gambar 5.40 | 156 |
| Gambar 5.42 | SEM patahan permukaan uji fatik FSW AZ31B-H24 daerah perambatan I | 157 |
| Gambar 5.43 | SEM patahan permukaan uji fatik FSW AZ31B-H24 daerah perambatan II | 158 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Gambar 5.44 | <i>X-rd diffraction</i> sambungan las FSW AZ31B-H24 | 159 |
| Gambar 5.45 | Tekstur sambungan las FSW AZ31B-H24 | 161 |
| Gambar 5.46 | EBSD sambungan las FSW AZ31B-H24 | 162 |
| Gambar 5.47 | Tafel polarisasi sambungan FSW AZ31B-H24 pasca perlakuan <i>shot peening</i> | 165 |
| Gambar 5.48 | Struktur mikro logam induk AA6061-T6 | 167 |
| Gambar 5.49 | Siklus termal FSW AA6061-T6 dengan bentuk <i>pin</i> silinder | 160 |
| Gambar 5.50 | Siklus termal FSW AA6061-T6 dengan bentuk <i>pin</i> persegi | 170 |
| Gambar 5.51 | Siklus termal FSW AA6061-T6 dengan bentuk <i>pin</i> segitiga | 172 |
| Gambar 5.52 | Temperatur puncak jarak 10 cm dari garis pengelasan FSW AA6061-T6 | 173 |
| Gambar 5.53 | Struktur makro sambungan las FSW AA6061-T6 | 174 |
| Gambar 5.54 | Struktur mikro daerah pengadukan (SZ) FSW AA6061-T6 | 176 |
| Gambar 5.55 | Sambungan FSW AA6061-T6 dengan geometri <i>pin</i> silinder | 177 |
| Gambar 5.56 | Sambungan FSW AA6061-T6 dengan geometri <i>pin</i> persegi | 178 |
| Gambar 5.57 | Sambungan FSW AA6061-T6 dengan geometri <i>pin</i> segitiga | 180 |
| Gambar 5.58 | Kekuatan tarik dan keuletan sambungan FSW AA6061-T6 | 182 |
| Gambar 5.59 | Efisiensi sambungan las FSW AA6061-T6 | 183 |
| Gambar 5.60 | Profil patahan uji tarik sambungan las FSW AA6061-T6 | 184 |
| Gambar 5.61 | Kekerasan sambungan FSW AA6061-T6 | 186 |
| Gambar 5.62 | Tegangan sisa sambungan FSW AA6061-T6 | 188 |
| Gambar 5.63 | Perbandingan siklus dan panjang retak fatik sambungan las FSW AA6061-T6 | 189 |
| Gambar 5.64 | Perambatan retak fatik sambungan FSW AA6061-T6 | 190 |
| Gambar 5.65 | <i>Trendline</i> perambatan retak fatik Gambar 5.64 | 191 |
| Gambar 5.66 | SEM permukaan patahan fatik daerah I sambungan las FSW AA6061-T6 | 192 |
| Gambar 5.67 | SEM permukaan patahan fatik daerah II sambungan las FSW AA6061 T6 | 193 |
| Gambar 5.68 | Tafel polarisasi sambungan FSW AA6061-T6 | 196 |
| Gambar 5.69 | Kekasaran sambungan FSW AA6061-T6 pasca perlakuan <i>shot peening</i> | 197 |
| Gambar 5.70 | Struktur mikro sambungan FSW AA6061-T6 pasca perlakuan <i>shot peening</i> | 199 |
| Gambar 5.71 | Skematik perubahan struktur butiran pada permukaan pasca <i>shot peening</i> | 199 |
| Gambar 5.72 | Kekuatan tarik dan regangan sambungan FSW AA6061-T6 pasca perlakuan <i>shot peening</i> | 201 |
| Gambar 5.73 | Profil patahan uji tarik sambungan las FSW AA6061-T6 pasca perlakuan <i>shot peening</i> | 202 |
| Gambar 5.74 | Nilai kekerasan sambungan FSW AA6061-T6 pasca perlakuan <i>shot peening</i> | 204 |

| | | |
|--------------|---|-----|
| Gambar 5.75 | Nilai kekerasan arah vertikal ketebalan plat FSW AA6061-T6 perlakuan <i>shot peening</i> | 205 |
| Gambar 5.76 | Tegangan sisa sambungan FSW AA6061-T6 pasca perlakuan <i>shot peening</i> | 207 |
| Gambar 5.77 | Perbandingan siklus dan panjang retak fatik sambungan las FSW AA6061-T6 dengan variasi intensitas <i>shot peening</i> | 208 |
| Gambar 5.78 | Perambatan retak fatik sambungan FSW AA6061-T6 dengan variasi intensitas <i>shot peening</i> | 209 |
| Gambar 5.79 | Trenline perambatan retak fatik Gambar 5.78 | 209 |
| Gambar 5.80 | Skematik retakan pasca perlakuan <i>shot peening</i> | 210 |
| Gambar 5.81 | SEM patahan permukaan uji fatik FSW AA6061-T6 daerah perambatan I | 211 |
| Gambar 5.82 | SEM patahan permukaan uji fatik FSW AA6061-T6 daerah perambatan II | 212 |
| Gambar 5.83 | Tafel polarisasi sambungan las FSW AA6061-T6 pasca perlakuan <i>shot peening</i> | 213 |
| Gambar 5.84 | Skematik korosi pada permukaan material pasca perlakuan <i>shot peening</i> | 214 |
| Gambar 5.85 | Skematik pengelasan FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 | 215 |
| Gambar 5.86 | Siklus termal FSW Tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 tanpa perlakuan H/C | 217 |
| Gambar 5.87 | Siklus termal FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 dengan perlakuan H/C | 219 |
| Gambar 5.88 | Visualisasi FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 | 220 |
| Gambar 5.89 | Struktur makro FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 | 221 |
| Gambar 5.90 | Struktur mikro FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 tanpa perlakuan H/C | 222 |
| Gambar 5.91 | Struktur mikro FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 dengan perlakuan H/C | 223 |
| Gambar 5.92 | SEM FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 | 225 |
| Gambar 5.93 | EDX sambungan las FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 | 226 |
| Gambar 5.94 | Distribusi EDX sambungan las FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 | 228 |
| Gambar 5.95 | SEM sambungan FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 dengan perlakuan H/C | 229 |
| Gambar 5.96 | EDX <i>advancing side</i> (AS) sambungan las FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 dengan perlakuan H/C | 230 |
| Gambar 5.97 | EDX <i>retreating side</i> (RS) sambungan las FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 dengan perlakuan H/C | 231 |
| Gambar 5.98 | Kekuatan mekanis sambungan FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 | 233 |
| Gambar 5.99 | Profil patahan uji tarik sambungan las FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 | 234 |
| Gambar 5.100 | Distribusi kekerasan sambungan las FSW Tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 tanpa perlakuan H/C | 235 |

| | |
|--|-----|
| Gambar 5.101 Distribusi kekerasan sambungan las FSW Tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 dengan perlakuan H/C | 236 |
| Gambar 5.102 Tegangan sisa sambungan las FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 | 237 |
| Gambar 5.103 Perbandingan panjang retak fatik (a) vs. siklus (N) sambungan las FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 | 238 |
| Gambar 5.104 Perambatan retak fatik sambungan las FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 | 239 |
| Gambar 5.105 <i>Trendline</i> FCGR Gambar 5.104 pada perambatan daerah II | 240 |
| Gambar 5.106 SEM permukaan patahan fatik daerah I sambungan FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 | 240 |
| Gambar 5.107 SEM permukaan patahan fatik daerah II sambungan FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 | 241 |
| Gambar 5.108 Tafel sambungan FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 | 244 |
| Gambar 5.109 Kekuatan tarik dan regangan sambungan las FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 pasca perlakuan <i>shot peening</i> | 246 |
| Gambar 5.110 Profil patahan uji tarik sambungan las FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 | 247 |
| Gambar 5.111 Distribusi kekerasan sambungan las FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 tanpa perlakuan H/C pasca <i>shot peening</i> | 248 |
| Gambar 5.112 Distribusi kekerasan sambungan las FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 dengan perlakuan H/C pasca <i>shot peening</i> | 250 |
| Gambar 5.113 Tegangan sisa sambungan las FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 pasca perlakuan <i>shot peening</i> | 252 |
| Gambar 5.114 Perbandingan panjang retak fatik (a) dan siklus (N) sambungan las FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 pasca perlakuan <i>shot peening</i> | 253 |
| Gambar 5.115 Perambatan retak fatik sambungan las FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 pasca perlakuan <i>shot peening</i> | 254 |
| Gambar 5.116 <i>Trendline</i> perambatan retak fatik Gambar 5.113 pada perambatan daerah II perambatan retak fatik | 255 |
| Gambar 5.117 SEM patahan permukaan uji fatik sambungan las FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 pada daerah perambatan retak I | 256 |
| Gambar 5.118 SEM patahan permukaan uji fatik sambungan las FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 pada daerah perambatan retak II | 257 |
| Gambar 5.119 Tafel sambungan las FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 pasca perlakuan <i>shot peening</i> | 258 |

DAFTAR TABEL

| | |
|---|-----|
| Tabel 1.1 Penelitian FSW tidak sejenis aluminium paduan seri 6xxx dan magnesium paduan seri AZ | 10 |
| Tabel 2.1 Penelitian FSW tidak sejenis magnesium paduan dan aluminium paduan | 16 |
| Tabel 3.1 Klasifikasi Aluminium | 25 |
| Tabel 3.2 Senyawa intermetalik pada paduan aluminium | 30 |
| Tabel 3.3 Karakteristik material <i>tool</i> pengelasan FSW | 39 |
| Tabel 3.4 Tingkat pengaruh aliran material dan temperatur FSW | 53 |
| Tabel 3.5 <i>Physical properties</i> aluminium dan magnesium | 57 |
| Tabel 3.6 Penyebab korosi sambungan las FSW dilihat dari struktur mikro | 72 |
| Tabel 4.1 Komposisi kimia dan sifat mekanik material | 74 |
| Tabel 4.2 Peralatan kegiatan penelitian | 74 |
| Tabel 4.3 Parameter pengelasan FSW | 77 |
| Tabel 4.4 Parameter perlakuan <i>shot peening</i> | 78 |
| Tabel 5.1 Komposisi kimia dan sifat mekanik AZ31B-H24 | 99 |
| Tabel 5.2 Ukuran butiran (<i>grain size</i>) rata-rata daerah SZ | 106 |
| Tabel 5.3 Kekuatan tarik dan keuletan sambungan FSW AZ31B-H24 | 113 |
| Tabel 5.4 Nilai <i>n</i> dan <i>C</i> konstanta Paris sambungan las FSW AZ31B-H24 | 125 |
| Tabel 5.5 Tafel polarisasi sambungan las FSW AZ31B-H24 | 135 |
| Tabel 5.6 Parameter perlakuan <i>shot peening</i> | 139 |
| Tabel 5.7 Kekuatan tarik dan regangan sambungan FSW AZ31B-H24 dengan perlakuan <i>shot peening</i> | 144 |
| Tabel 5.8 Tegangan sisa pada sambungan FSW AZ31B-H24 dengan perlakuan <i>shot peening</i> | 150 |
| Tabel 5.9 Nilai <i>n</i> dan <i>C</i> konstanta Paris sambungan las FSW AZ31B-H24 dengan perlakuan <i>shot peening</i> | 155 |
| Tabel 5.10 Tafel polarisasi sambungan FSW AZ31B-H24 dengan perlakuan <i>shot peening</i> | 164 |
| Tabel 5.11 Komposisi kimia dan sifat mekanik AA6061-T6 | 166 |
| Tabel 5.12 Ukuran butiran (<i>grain size</i>) rata-rata daerah SZ pada FSW AA6061-T6 | 176 |
| Tabel 5.13 Kekuatan tarik dan regangan sambungan las FSW AA6061-T6 | 181 |
| Tabel 5.14 Nilai <i>n</i> dan <i>C</i> konstanta Paris sambungan las FSW AA6061-T6 | 191 |
| Tabel 5.15 Tafel polarisasi sambungan las FSW AA6061-T6 | 195 |
| Tabel 5.16 Kekuatan tarik dan regangan sambungan FSW AA6061-T6 dengan perlakuan <i>shot peening</i> | 200 |
| Tabel 5.17 Tegangan sisa pada sambungan FSW AA6061-T6 dengan perlakuan <i>shot peening</i> | 206 |
| Tabel 2.18 Nilai <i>n</i> dan <i>C</i> konstanta Paris sambungan las FSW AA6061-T6 dengan perlakuan <i>shot peening</i> | 209 |
| Tabel 5.19 Tafel polarisasi sambungan AA6061-T6 dengan perlakuan <i>shot peening</i> | 213 |

| | |
|--|-----|
| Tabel 5.20 Spesifikasi pemanas dan pendinginan FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 | 216 |
| Tabel 5.21 Temperatur puncak <i>advancing side</i> dan <i>retreating side</i> pada pengelasan FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 dengan perlakuan H/C | 218 |
| Tabel 5.22 Kekuatan tarik dan keuletan sambungan FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 | 232 |
| Tabel 5.23 Nilai n dan C konstanta Paris sambungan las FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 | 240 |
| Tabel 5.24 Tafel polarisasi sambungan las FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 | 243 |
| Tabel 5.25 Kekuatan tarik dan keuletan sambungan las FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 pasca perlakuan <i>shot peening</i> | 247 |
| Tabel 5.26 Tegangan sisa pada permukaan sambungan las FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 pasca perlakuan <i>shot peening</i> | 252 |
| Tabel 5.27 Nilai n dan C konstanta Paris sambungan las FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 pasca perlakuan <i>shot peening</i> | 255 |
| Tabel 5.28 Tafel polarisasi sambungan las FSW tak sejenis AA6061-T6/AZ31B-H24 pasca perlakuan <i>shot peening</i> | 258 |

DAFTAR NOTASI

| | | | |
|------------|-----------------------------------|---------------------|------------------------------------|
| a | : Panjang retak | α | : Fungsi termal |
| a_t | : Berat atom | β | : Fasa persipitasi |
| A_0 | : Luas penampang | β_1' | : Fasa persipitasi 1 |
| c | : Panas spesifik | β_2' | : Fasa persipitasi 2 |
| CPR | : <i>Corrosion penetrate rate</i> | ΔL | : Perbandingan pertambahan panjang |
| b | : Ketebalan | ΔK | : Faktor intensitas tegangan |
| D | : Densitas logam | ΔP | : Selisih pembebanan |
| d | : Diameter | ε | : Regangan |
| da | : Perubahan panjang retak | ε_{hkl} | : Regangan kisi |
| dN | : Perubahan jumlah siklus | λ | : Panjang gelombang |
| d_{hkl} | : Jarak kisi | ρ | : Massa jenis |
| E | : Modulus elastisitas | σ | : Tegangan |
| EL | : Prosentase pertambahan panjang | σ_y | : Tegangan luluh |
| E_{corr} | : Potensial tegangan korosi | σ_{ii} | : Tegangan sisa |
| F | : Gaya tarik | π | : phi |
| I_{corr} | : Kerapatan arus korosi | θ_{hkl} | : Sudut kisi |
| k | : Konduktivitas panas | τ | : Tegangan geser |
| k | : Konstanta | ω_r | : Putaran |
| K_0 | : Fungsi Bassel | 2θ | : Sudut peak |
| K_{max} | : Intensitas tegangan maksimal | | |
| K_{min} | : Intensitas tegangan minimal | | |
| l_0 | : Panjang awal | | |
| l_i | : Panjang sesaat | | |
| l_f | : Panjang setelah patah | | |
| n | : Jumlah electron valensi | | |
| P | : Tekanan | | |
| P_{max} | : Pembebanan maksimal | | |
| P_{min} | : Pembebanan minimal | | |
| Q | : Panas (kalor) yang dibangkitkan | | |
| R | : <i>Stress ratio</i> | | |
| r | : Jari-jari | | |
| RA | : Persentase pengurangan luas | | |
| $SSSS$ | : Super saturated solid solution | | |
| t | : waktu | | |
| T | : Temperatur akhir | | |
| T_o | : Temperatur awal | | |
| T_m | : Tempetarur <i>melting</i> | | |
| v | : Kecepatan | | |
| ν | : <i>Poisson's ratio</i> | | |
| W | : Lebar | | |

DAFTAR SINGKATAN

| | |
|-------------|--|
| <i>Al</i> | : Aluminium |
| <i>AS</i> | : <i>Advancing side</i> |
| <i>ASTM</i> | : American Society for Testing and Materials |
| <i>BM</i> | : <i>Base metal</i> |
| <i>CCT</i> | : <i>Center cracked-tension</i> |
| <i>CR</i> | : <i>Corrosion rate</i> |
| <i>Cu</i> | : Cuprum (Tembaga) |
| <i>EDX</i> | : <i>Electron dispersive spectrometry</i> |
| <i>FCGR</i> | : <i>Fatigue crack growth rate</i> |
| <i>FSW</i> | : <i>Frition stir welding</i> |
| <i>H/C</i> | : <i>Heater-Cooling</i> |
| <i>HAZ</i> | : <i>Heat affected zone</i> |
| <i>Hv</i> | : <i>Vickers microhardness</i> |
| <i>IMCs</i> | : <i>Intermetallic compound</i> |
| <i>Mg</i> | : Magnesium |
| <i>MIG</i> | : <i>Metal inner gas</i> |
| <i>MT</i> | : <i>Mechanical tensioning</i> |
| <i>PWT</i> | : <i>Post weld treatment</i> |
| <i>RS</i> | : <i>Retreating side</i> |
| <i>RS</i> | : <i>Residual Stress</i> |
| <i>SCC</i> | : <i>Stress corrosion cracking</i> |
| <i>SEM</i> | : <i>Scanning electron microscope</i> |
| <i>Si</i> | : Silicon |
| <i>SP</i> | : <i>Shot peening</i> |
| <i>STT</i> | : <i>Static Thermal Tensioning</i> |
| <i>SZ</i> | : <i>Stir zone</i> |
| <i>Ti</i> | : Titanium |
| <i>TIG</i> | : <i>Tungsten inner gas</i> |
| <i>TMAZ</i> | : <i>Thermal-mechanically affected zone</i> |
| <i>TT</i> | : <i>Thermal tensioning</i> |
| <i>UTS</i> | : <i>Ultimate tensile strength</i> |
| <i>YS</i> | : <i>Yield strength</i> |
| <i>Zn</i> | : Zinc (Seng) |



UNIVERSITAS
GADJAH MADA

Karakterisasi Sifat-Sifat Mekanis Sambungan Pengelasan Friction Stir Welding (FSW) Tak Sejenis Magnesium Paduan AZ31B-H24 dan Aluminium Paduan AA6061-T6 dengan Variasi Putaran Tool dan Geometri

Pin serta Perlakuan Shot Peening

Muji Prihajatno, Prof. Ir. Mochammad Noer Ilman, S.T., M.Sc., Ph.D. IPM, ASEAN.Eng.; Ir. R. Rachmat A. Sriwijaya,

Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari <http://etd.repository.ugm.ac.id/>

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Publikasi

Lampiran 2 Data uji kekuatan tarik

Lampiran 3 Data uji kekerasan (*micro-Vickers*)

Lampiran 4 Data uji FCGR