

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSETUJUAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR LAMPIRAN	xxi
DAFTAR SIMBOL DAN NOTASI	xxii
INTISARI	xxv
ABSTRACT	xxvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1. 1 Latar Belakang Masalah	1
1. 2 Rumusan Masalah	4
1. 3 Keaslian Penelitian	4
1. 4 Batasan Masalah	5
1. 5 Tujuan Penelitian	6
1. 6 Manfaat Penelitian	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI	8
2. 1 Kajian Pustaka	8
2.1.1 Pengelasan RFW sejenis berbagai aluminium seri AA5083-H112	8
2.1.2 Pengelasan RFW sejenis aluminium seri AA606-T6	8
2.1.3 Pengelasan RFW sejenis aluminium seri AA7075-T6	13
2. 2 Landasan Teori	18
2.2.1 Aluminium dan paduannya	18
2.2.2 Metalurgi las RFW	32
2.2.3 Proses <i>rotary friction welding</i> (RFW)	34
2.2.4 Aliran panas pada proses las RFW	36
2.2.5 Karakterisasi sifat mekanis hasil pengelasan	37
2.2.6 Tegangan sisa akibat proses RFW	38

2.2.7	Kekuatan lelah sambungan las	46
2.2.8	Fraktografi pada permukaan patah kelelahan	53
2.2.9	Analisis material dengan SEM dan EDS	62
BAB III	METODE PENELITIAN	65
3.1	Bahan dan Alat Penelitian	65
3.1.1	Bahan yang digunakan untuk pengelasan RFW	65
3.1.2	Alat yang digunakan untuk pengelasan RFW	65
3.2	Proses Pengelasan RFW	66
3.3	Pengujian	68
3.3.1	Pengamatan struktur makro dan struktur mikro	69
3.3.2	Pengujian kekerasan	70
3.3.3	Pengujian tarik	71
3.3.4	Pengukuran tegangan sisa	73
3.3.5	Uji <i>rotary bending fatigue</i>	75
3.4	Diagram Alir Penelitian	76
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	79
4.1	Pengelasan RFW sejenis AA5083-H112	79
4.1.1	Profil temperatur RFW sejenis AA5083-H112	79
4.1.2	Panjang <i>burn off length</i> RFW sejenis AA5083-H112	80
4.1.3	Struktur makro RFW sejenis AA5083-H112	82
4.1.4	Struktur mikro RFW sejenis AA5083-H112	84
4.1.5	Kekerasan mikro RFW sejenis AA5083-H112	87
4.1.6	Kekuatan tarik RFW sejenis AA5083-H112	89
4.1.7	Tegangan sisa RFW sejenis AA5083-H112	91
4.1.8	Kekuatan fatik las RFW sejenis AA5083-H112	92
4.2	Pengelasan RFW sejenis AA6061-T6	98
4.2.1	Profil temperatur RFW sejenis AA6061-T6	98
4.2.2	Panjang <i>burn off length</i> RFW sejenis AA6061-T6	100
4.2.3	Struktur makro RFW sejenis AA6061-T6	102

4.2.4	Struktur mikro RFW sejenis AA6061-T6	103
4.2.5	Kekerasan mikro RFW sejenis AA6061-T6	106
4.2.6	Kekuatan tarik RFW sejenis AA6061-T6	109
4.2.7	Kekuatan fatik las RFW sejenis AA6061-T6	111
4.3	Pengelasan RFW sejenis AA7075-T6	115
4.3.1	Profil temperatur RFW sejenis AA7075-T6	115
4.3.2	Panjang <i>burn off length</i> RFW sejenis AA7075-T6	117
4.3.3	Struktur makro RFW sejenis AA7075-T6	118
4.3.4	Struktur mikro RFW sejenis AA7075-T6	119
4.3.5	Kekerasan mikro RFW sejenis AA7075-T6	121
4.3.6	Kekuatan tarik RFW sejenis AA7075-T6	123
4.3.7	Tegangan sisa RFW sejenis AA7075-T6	124
4.3.8	Kekuatan fatik las RFW sejenis AA7075-T6	125
4.4	Pengelasan RFW tak sejenis AA5083-H112/AA6061-T6	129
4.4.1	Temperatur RFW tak sejenis AA5083-H112/AA6061-T6	129
4.4.2	<i>Burn off length</i> RFW tak sejenis AA5083-H112/AA6061-T6	131
4.4.3	Struktur makro RFW tak sejenis AA5083-H112/AA6061-T6	133
4.4.4	Struktur mikro RFW tak sejenis AA5083-H112/AA6061-T6	136
4.4.5	Unsur pada RFW tak sejenis AA5083-H112/AA6061-T6	139
4.4.6	Kekerasan mikro RFW tak sejenis AA5083-H112/AA6061-T6	142
4.4.7	Kekuatan tarik RFW tak sejenis AA5083-H112/AA6061-T6	143
4.4.8	Kekuatan fatik RFW tak sejenis AA5083-H112/AA6061-T6	145
4.5	Pengelasan RFW tak sejenis AA5083-H112/AA7075-T6	149
4.5.1	Temperatur RFW tak sejenis AA5083-H112/AA7075-T6	149
4.5.2	<i>Burn off length</i> RFW tak sejenis AA5083-H112/AA7075-T6	150
4.5.3	Struktur makro RFW tak sejenis AA5083-H112/AA7075-T6	152
4.5.4	Struktur mikro RFW tak sejenis AA5083-H112/AA7075-T6	155
4.5.5	Unsur pada RFW tak sejenis AA5083-H112/AA7075-T6	157
4.5.6	Kekerasan mikro RFW tak sejenis AA5083-H112/AA7075-T6	161
4.5.7	Kekuatan tarik RFW tak sejenis AA5083-H112/AA7075-T6	162
4.5.8	Tegangan sisa RFW tak sejenis AA5083-H112/AA7075-T6	164

4.5.9	Kekuatan fatik RFW tak sejenis AA5083-H112/AA7075-T6	165
4.6	Pengelasan RFW tak sejenis AA6061-T6/AA7075-T6	169
4.6.1	Temperatur RFW tak sejenis AA6061-T6/AA7075-T6	169
4.6.2	<i>Burn off length</i> RFW tak sejenis AA6061-T6/AA7075-T6	170
4.6.3	Kekuatan tarik RFW tak sejenis AA6061-T6/AA7075-T6	173
4.6.4	Struktur makro RFW tak sejenis AA6061-T6/AA7075-T6	174
4.6.5	Struktur mikro RFW tak sejenis AA6061-T6/AA7075-T6	177
4.6.6	Unsur pada RFW tak sejenis AA6061-T6/AA7075-T6	180
4.6.7	Kekerasan mikro RFW tak sejenis AA6061-T6/AA7075-T6	182
4.6.8	Tegangan sisa RFW tak sejenis AA6061-T6/AA7075-T6	185
4.6.9	Kekuatan fatik RFW tak sejenis AA6061-T6/AA7075-T6	186
BAB V	PENUTUP	191
5.1	Kesimpulan	191
5.2	Saran	192
DAFTAR PUSTAKA		193
LAMPIRAN		204

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Penelitian RFW pada AA5083-H112, AA6061-T6 dan AA7075-T6	17
Tabel 2.2.	Jenis-jenis aluminium paduan tempa	18
Tabel 2.3.	Pengaruh penambahan unsur paduan	19
Tabel 2.4.	Simbol perlakuan panas pada produk aluminium	27
Tabel 2.5.	Simbol proses pengerasan regangan	28
Tabel 2.6.	Arti digit ke dua setelah simbol proses pengerasan regangan	28
Tabel 2.7.	Komposisi kimia AA5083-H112 , AA6061-T6 dan AA7075-T6	29
Tabel 2.8.	Sifat mekanis AA7075-T6, AA6061-T6 dan AA5083-H112	29
Tabel 2. 9.	Metode pengukuran tegangan sisa	41
Tabel 2. 10.	Bidang difraksi untuk material dengan simetri berbeda	45
Tabel 4. 1	Nilai K dan m untuk RFW sejenis AA5083-H112	95
Tabel 4. 2	Nilai K dan m untuk RFW sejenis AA6061-T6	113
Tabel 4. 3	Nilai K dan m untuk RFW sejenis AA7075-T6	127
Tabel 4. 4	Nilai K dan m untuk RFW tak sejenis AA5083-H112/AA6061-T6	147
Tabel 4. 5	Nilai K dan m untuk RFW tak sejenis AA5083-H112/AA7075-T6	167
Tabel 4. 6	Nilai K dan m untuk RFW tak sejenis AA6061-T6/AA7075-T6	188
Tabel 5. 1.	Lokasi patahan pada sambungan las	192

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Diagram fasa Al-Mg	21
Gambar 2.2. Diagram fasa Al-Mg ₂ Si	22
Gambar 2.3. Model diagram pemrosesan termomekanis yang menyebabkan penghalusan butir sehingga meningkatkan sifat mekanik	24
Gambar 2.4. Diagram fasa Al-Zn	26
Gambar 2.5. Struktur mikro logam dasar aluminium hasil pengamatan beberapa orang peneliti sebelumnya : (a) AA5083-H112 , (b) AA6061-T6 dan (c) AA7075-T6 dan hasil pengamatan sendiri : (d) AA5083-H112, (e) AA6061-T6 dan (f) AA7075-T6	31
Gambar 2.6. RFW pada komponen automotif	32
Gambar 2.7. Komposisi struktur mikro sambungan las RFW	32
Gambar 2.8. Efek rekristalisasi dinamis di sekitar antarmuka dua bahan yang dilas menggunakan tekanan pada temperatur di atas 0,4T _{MP absolute}	34
Gambar 2.9. Bagian mesin dan peralatan proses las gesekan RFW	34
Gambar 2.10. Hubungan parameter kecepatan putar, tekanan dan waktu pada friction welding antara aluminium dengan mild steel	35
Gambar 2.11. Aliran panas konduksi pada batang bulat	36
Gambar 2.12. Kondisi batas yang terjadi saat pengelasan RFW akibat adanya gaya tekan dan pembentukan flash	39
Gambar 2.13. Beberapa jenis cara pengukuran tegangan sisa	40
Gambar 2.14. Pengukuran tegangan sisa dengan neutron difraktometer	42
Gambar 2.15. Contoh spektrum difraksi hamburan neutron	43
Gambar 2.16. Contoh spektrum difraksi hasil proses <i>multiple peak fitting</i>	43
Gambar 2.17. Prinsip kerja mesin uji lelah <i>rotary bending fatigue</i>	47
Gambar 2.18. Distribusi momen pada mesin uji <i>rotary bending fatigue</i>	48
Gambar 2.19. Distribusi tegangan pada sampel akibat momen bending	48
Gambar 2.20. Jenis siklus beban lelah: (a) Siklus pembebanan tarik – tekan berulang penuh, (b) Siklus pembebanan tarik - tarik dengan tambahan beban, (c) siklus pembebanan dengan spektrum acak	50

Gambar 2.21. Kurva S-N uji lelah <i>rotary bending</i> pada aluminium AA6061-T6	52
Gambar 2.22. Persamaan kurva tegangan pada grafik hasil uji lelah	53
Gambar 2.23. Perilaku pertumbuhan khas retak lelah panjang pada kurva Paris	55
Gambar 2.24. Proses <i>slip</i> pada kegagalan lelah pada suatu material	56
Gambar 2.25. Bentuk permukaan patahan secara umum	56
Gambar 2.26. Ilustrai struktur makro permukaan patahan pada tahap I	57
Gambar 2.27. Ilustrai patahan tahap I pada sebuah material polikristalin	58
Gambar 2.28. Bentuk patahan <i>cleavage</i> pada permukaan patahan getas	59
Gambar 2.29. Karakteristik khas dari permukaan patah lelah tahap II: permukaan halus yang ditutupi oleh tanda <i>beach mark</i>	59
Gambar 2.30. Mikroskopik <i>striation</i> untuk retak ulet (<i>ductile</i>) pada tahap II bergelombang halus	60
Gambar 2.31. <i>Striation</i> jenis <i>brittle</i>	60
Gambar 2.32. Permukaan retak lelah bentuk <i>small tear ridge</i> tanpa <i>striation</i>	61
Gambar 2.33. Tampilan mikroskopis <i>dimple</i> dalam permukaan patahan ulet	61
Gambar 2.34. Proses kegagalan lelah material dilihat secara makro	62
Gambar 2.35. Diagram sistim kerja SEM dan EDS	63
Gambar 2.36. Layar tampilan <i>counts-energy</i> pada EDS	63
Gambar 3.1. Mesin <i>Rotary Friction Welding</i> untuk penelitian	65
Gambar 3.2. Skema kerja dan komponen mesin RFW	66
Gambar 3.3. Skema proses pengelasan RFW	67
Gambar 3.4. Dimensi sampel RFW	68
Gambar 3.5. Pemasangan awal termokopel pada sampel saat proses pengelasan RFW	68
Gambar 3.6. Lokasi uji kekerasan mikro membujur sepanjang sambungan las	70
Gambar 3.7. Skema indentasi hasil uji kekerasan Vickers	71
Gambar 3.8. Sampel uji tarik berdasarkan ASTM E8M-99	72
Gambar 3.9. Kurva tegangan-regangan untuk material liat	72
Gambar 3.10. Fasilitas Neutron difraktometer di BATAN, Serpong	73
Gambar 3.11. Posisi pengukuran tegangan sisa dengan <i>neutron diffraction</i>	73

Gambar 3.12. Arah tegangan sisa dan posisi pengukuran pada pada sampel hasil las RFW : (a) pengukuran tegangan arah radial dan hoop, (b) pengukuran tegangan arah axial	74
Gambar 3.13. Dimensi sampel uji lelah pada beban <i>rotary bending</i>	75
Gambar 3.14. Diagram proses pengelasan sejenis RFW dengan material sejenis AA5083-H112, sejenis AA6061-T6 dan sejenis AA7075-T6	77
Gambar 3.15. Diagram proses pengelasan tak sejenis dengan material AA5083-H112/AA6061-T6, AA5083-H112/AA7075-T6 dan AA6061-T6/AA7075-T6	78
Gambar 4.1. Profil siklus termal las RFW sejenis AA5083-H112 pada jarak : (a) 2 mm (Tc1) dan (b) 10 mm (Tc2) dari pusat las untuk variasi kecepatan putar	80
Gambar 4.2. Ilustrasi panjang akhir sampel akibat variasi proses las RFW sejenis AA5083-H112: (a) 370 rpm, (b) 800 rpm, (c) 1200 rpm dan (d) 1700 rpm.	81
Gambar 4.3. Variasi panjang <i>burn off length</i> pada sambungan las RFW sejenis AA5083-H112	82
Gambar 4.4. Aliran material pada pengelasan RFW	83
Gambar 4.5. Struktur makro pada sampel las RFW sejenis AA5083-H112 : (a) 370 rpm, (b) 800rpm, (c) 1200 rpm dan (d) 1700 rpm	84
Gambar 4.6. Struktur mikro pada sambungan las RFW sejenis AA5083-H112 : (a) 370 rpm, (b) 800rpm, (c) 1200 rpm dan (d) 1700 rpm	85
Gambar 4.7. Transformasi struktur mikro : (a) sambungan las RFW sejenis AA5083-H112 dari DRZ, TMAZ dan HAZ yang dihasilkan pada kecepatan putar 1200 rpm dengan pembesaran 10x, (b) daerah DRZ	86
Gambar 4.8. Profil <i>microhardness</i> pada sambungan las RFW sejenis AA5083-H112 akibat variasi putaran	88
Gambar 4.9. Pengaruh kecepatan putar terhadap kekuatan luluh dan kekuatan tarik sambungan las RFW sejenis AA5083-H112	90

Gambar 4.10. Lokasi patahan pada sampel uji tarik RFW sejenis AA5083-H112	91
Gambar 4.11. Distribusi tegangan sisa sambungan las RFW sejenis AA5083-H112 yang dihasilkan pada putaran 1200 rpm	92
Gambar 4.12. Kurva S-N sambungan las RFW sejenis AA5083-H112 yang dihasilkan pada putaran 1200 rpm dan logam dasar	93
Gambar 4.13. Lokasi patahan pada sambungan las RFW sejenis AA5083-H112 yang dihasilkan pada kecepatan putar 1200 rpm setelah pengujian lelah	96
Gambar 4.14. Permukaan patahan sambungan las RFW sejenis AA5083-H112 yang dihasilkan pada kecepatan putar 1200 rpm setelah pengujian lelah : (a) foto struktur makro, (b) permukaan patahan lelah tanpa <i>striations</i> untuk daerah inisiasi tahap I pada lokasi tanda A dan (c), permukaan patahan antara daerah perambatan retak tahap II menuju <i>final fracture</i> untuk lokasi dengan tanda B	97
Gambar 4.15. Profil siklus termal las RFW sejenis AA6061-T6 pada jarak : (a) 2 mm (Tc1) dan (b) 10 mm (Tc2) dari pusat las untuk variasi kecepatan putar	99
Gambar 4.16. Ilustrasi panjang akhir sambungan lasan akibat variasi proses las RFW sejenis AA6061-T6: (a) 370 rpm, (b) 800rpm, (c) 1200 rpm dan (d) 1700 rpm	100
Gambar 4.17. Variasi panjang <i>burn off length</i> pada sambungan las RFW tak sejenis AA6061-T6	101
Gambar 4.18. Struktur makro pada sambungan las RFW RFW sejenis AA6061-T6 : (a) 370 rpm, (b) 800rpm, (c) 1200 rpm dan (d) 1700 rpm	103
Gambar 4.19. Struktur mikro pada sambungan las RFW AA6061-T6- AA6061-T6: (a) 370 rpm, (b) 800 rpm, (c) 1200 rpm dan (d) 1700 rpm	105
Gambar 4.20. Transformasi struktur mikro : (a) sambungan las RFW sejenis AA6061-T6 pada DRZ, TMAZ dan HAZ yang dihasilkan pada	106

kecepatan putar 800 rpm dengan pembesaran 10x, (b) daerah DRZ

Gambar 4.21. Profil <i>microhardness</i> pada sambungan las RFW sejenis AA6061-T6 akibat variasi putaran	107
Gambar 4.22. Pengaruh kecepatan putar terhadap kekuatan luluh dan kekuatan tarik sambungan las RFW sejenis AA6061-T6	110
Gambar 4.23. Lokasi patahan pada uji tarik RFW sejenis AA6061-T6	111
Gambar 4.24. Kurva S-N sambungan las RFW sejenis AA6061-T6 yang dihasilkan pada putaran 1200 rpm dan logam dasar	112
Gambar 4.25. Lokasi patahan pada sambungan las RFW sejenis AA6061-T6 yang dihasilkan pada kecepatan putar 1200 rpm setelah pengujian lelah	114
Gambar 4.26. Permukaan struktur makro patahan pada sambungan las RFW sejenis AA6061-T6 yang dihasilkan pada kecepatan putar 1200 rpm setelah pengujian kelelahan : (a) foto struktur makro, (b) permukaan patahan lelah tahap I dengan mekanisme <i>intrusion-extrusion</i> untuk daerah inisiasi pada lokasi A dan (c) permukaan patahan lelah tahap II dengan mekanisme <i>striations</i> pada daerah perambatan retak lokasi B	115
Gambar 4.27. Profil siklus termal las RFW sejenis AA7075-T6 pada jarak : (a) 2 mm (Tc1) dan (b) 10 mm (Tc2) dari pusat las untuk variasi kecepatan putar	116
Gambar 4.28. Panjang sambungan las akibat variasi proses las RFW sejenis AA7075-T6 : (a) 370 rpm, (b) 800 rpm, (c) 1200 rpm dan (d) 1700 rpm	117
Gambar 4.29. Variasi panjang <i>burn off length</i> pada sambungan las RFW sejenis AA7075-T6	118
Gambar 4.30. Struktur makro pada sambungan las RFW sejenis AA7075-T6: (a) 370 rpm, (b) 800 rpm, (c) 1200 rpm dan (d) 1700 rpm	119
Gambar 4.31. Struktur mikro pada sambungan las RFW sejenis AA7075-T6 : (a) 370 rpm, (b) 800 rpm, (c) 1200 rpm dan (d) 1700 rpm	120

Gambar 4.32. Transformasi struktur mikro : (a) sambungan las sejenis AA7075-T6 dari DRZ, TMAZ dan HAZ yang dihasilkan pada kecepatan putar 1700 rpm, (b) daerah DRZ	121
Gambar 4.33. Profil microhardness pada sambungan las RFW sejenis AA7075-T6 akibat variasi putaran	123
Gambar 4.34. Pengaruh kecepatan putar terhadap kekuatan luluh dan kekuatan tarik sambungan las RFW sejenis AA7075-T6	124
Gambar 4.35. Lokasi patahan pada uji tarik RFW sejenis AA7075-T6	124
Gambar 4.36. Distribusi tegangan sisa sambungan las RFW sejenis AA7075-T6 yang dihasilkan pada putaran 1200 rpm	125
Gambar 4.37. Kurva S-N sambungan las RFW sejenis AA7075-T6 yang dihasilkan pada putaran 1200 rpm dan logam dasar	126
Gambar 4.38. Lokasi patahan pada sampel uji kelelahan las RFW sejenis AA7075-T6	127
Gambar 4.39. Permukaan patah pada sambungan las RFW sejenis AA7075-T6 yang dihasilkan pada kecepatan putar 1200 rpm setelah pengujian kelelahan : (a) foto struktur makro, (b),(c) foto SEM untuk daerah B dan (d),(e) foto SEM untuk daerah A	129
Gambar 4.40. Profil siklus termal las RFW tak sejenis AA5083-H112/AA6061-T6 pada jarak : (a) 2 mm (Tc1) dan (b) 10 mm (Tc2) dari pusat las untuk variasi kecepatan putar	130
Gambar 4.41. Ilustrasi panjang akhir sambungan las akibat variasi proses las RFW tak sejenis AA5083-H112/AA6061-T6: (a) 370 rpm, (b) 540 rpm, (c) 800 rpm, (d) 1200 rpm, (e) 1700 rpm dan 2500 rpm	131
Gambar 4.42. Variasi panjang <i>burn off length</i> pada sambungan las RFW tak sejenis AA5083-H112/AA6061-T6	133
Gambar 4.43. Struktur makro pada sambungan las RFW tak sejenis AA5083-H112/AA6061-T6 : (a) 370 rpm, (b) 540 rpm, (c) 800 rpm, (d) 1200 rpm dan (e) 1700 rpm	135

Gambar 4.44. Struktur mikro pada sambungan las RFW tak sejenis AA5083-H112/AA6061-T6 : (a) 370 rpm, (b) 540 rpm, (c) 800 rpm, (d) 1200 rpm, (e) 1700 rpm dan (f) 2500 rpm	137
Gambar 4.45. Struktur mikro sambungan las RFW tak sejenis AA5083-H112/AA6061-T6 yang dihasilkan pada kecepatan putar 1200 rpm dengan pembesaran 5x: (a) pada sisi AA5083-H112, (b) pada sisi AA6061-T6	138
Gambar 4.46. Analisis EDS pada sambungan las RFW tak sejenis AA5083-H112/AA6061-T6 yang diproduksi pada 1200 rpm : (a) sisi AA6061-T6, (b) daerah DRZ dan (c) sisi AA5083-H112	140
Gambar 4.47. <i>Mapping</i> unsur daerah las untuk sambungan las RFW tak sejenis AA5083-H112/AA6061-T6 yang diproduksi pada 1200 rpm : (a) posisi pengambilan data, (b) Al, (c) Si, (d) Mn, (e) Cu, (f) Mg, (g) Ti	141
Gambar 4.48. Profil <i>microhardness</i> pada sambungan las RFW tak sejenis AA5083-H112/AA6061-T6 akibat variasi putaran	143
Gambar 4.49. Pengaruh kecepatan putar terhadap kekuatan luluh dan kekuatan tarik sambungan las RFW tak sejenis AA5083-H112/AA6061-T6	144
Gambar 4.50. Lokasi patahan pada sampel uji tarik las RFW tak sejenis AA5083-H112/AA6061-T6	145
Gambar 4.51. Kurva S-N sambungan las RFW tak sejenis AA5083-H112/AA6061-T6 yang dihasilkan pada putaran 1200 rpm dan logam dasar	146
Gambar 4.52. Permukaan patahan pada sambungan las RFW tak sejenis AA5083-H112/AA6061-T6 yang dihasilkan pada kecepatan putar 1200 rpm setelah pengujian lelah	148
Gambar 4.53. Permukaan patahan pada sambungan las RFW tak sejenis AA5083-H112/AA6061-T6 yang dihasilkan pada kecepatan putar 1200 rpm setelah pengujian kelelahan : (a) foto struktur makro, (b) permukaan patahan lelah dengan mekanisme <i>ductile</i>	149

fracture ditandai adanya *deep dimple* pada lokasi A dan (c) pada *deep dimple* untuk lokasi A

- Gambar 4.54. Profil siklus termal las RFW tak sejenis AA5083-H112/AA7075-T6 pada jarak : (a) 2 mm (Tc1) dan (b) 10 mm (Tc2) dari pusat las untuk variasi kecepatan putar 150
- Gambar 4.55. Ilustrasi panjang akhir sambungan las akibat variasi proses las RFW tak sejenis AA5083-H112/AA7075-T6 : (a) 370 rpm, (b) 540 rpm, (c) 800 rpm, (d) 1200 rpm, (e) 1700 rpm dan (f) 2500 rpm 151
- Gambar 4.56. Variasi panjang *burn off length* pada sambungan las RFW tak sejenis AA5083-H112/AA7075-T6 152
- Gambar 4.57. Struktur makro pada sambungan las RFW tak sejenis AA5083-H112/AA7075-T6 : (a) 370 rpm, (b) 540 rpm, (c) 800 rpm, (d) 1200 rpm, (e) 1700 rpm dan (f) 2500 rpm 154
- Gambar 4.58. Struktur mikro pada sambungan las RFW tak sejenis AA5083-H112/AA7075-T6 : (a) 370 rpm, (b) 540 rpm, (c) 800 rpm, (d) 1200 rpm, (e) 1700 rpm, (f) 2500 rpm 156
- Gambar 4.59. Transformasi struktur mikro sambungan las RFW tak sejenis AA5083-H112/AA7075-T6 yang dihasilkan pada kecepatan putar 1200 rpm : (a) pada sisi AA5083-H112, (b) pada sisi AA7075-T6, (c) daerah DRZ 157
- Gambar 4.60. Analisis EDS pada sambungan las RFW tak sejenis AA5083-H112/AA7075-T6 yang diproduksi pada 1200 rpm : (a) sisi AA7075-T6, (b) daerah DRZ dan (c) sisi AA5083-H112 159
- Gambar 4.61. *Mapping* unsur daerah las untuk las RFW tak sejenis AA5083-H112/AA7075-T6 yang diproduksi pada 1200 rpm : (a) posisi pengambilan data, (b) Ni, (c) Al, (d) Si, (e) Mn, (f) Fe, (g) Cu, (h) Zn, (i) Ti, (j) Mg 160

Gambar 4.62. Profil <i>microhardness</i> pada sambungan las RFW tak sejenis AA5083-H112/AA7075-T6 akibat variasi putaran	162
Gambar 4.63. Pengaruh kecepatan putar terhadap kekuatan luluh dan kekuatan tarik sambungan las RFW tak sejenis AA5083-H112/AA7075-T6	163
Gambar 4.64. Lokasi patahan pada uji tarik sambungan las RFW tak sejenis AA5083-H112/AA7075-T6	163
Gambar 4.65. Distribusi tegangan sisa sambungan las RFW tak sejenis AA5083-H112/AA7075-T6 yang dihasilkan pada putaran 1200 rpm	165
Gambar 4.66. Kurva S-N sambungan las RFW tak sejenis AA5083-H112/AA7075-T6 yang dihasilkan pada putaran 1200 rpm dan logam dasar	166
Gambar 4.67. Permukaan patahan pada sambungan las RFW tak sejenis AA5083-H112/AA7075-T6 yang dihasilkan pada kecepatan putar 1200 rpm setelah pengujian kelelahan : (a) foto struktur makro, (b),(c) foto SEM untuk daerah B dan (d),(e) foto SEM untuk daerah A	168
Gambar 4.68. Profil siklus termal las RFW tak sejenis AA6061-T6/AA7075-T6 pada jarak : (a) 2 mm (Tc1) dan (b) 10 mm (Tc2) dari pusat las akibat variasi kecepatan putar	170
Gambar 4.69. Ilustrasi panjang akhir sambungan las akibat variasi kecepatan proses las RFW tak sejenis AA6061-T6/AA7075-T6 : (a) 370 rpm, (b) 540 rpm, (c) 800 rpm, (d) 1200 rpm, (e) 1700 rpm, (f) 2500 rpm	171
Gambar 4.70. Variasi panjang <i>burn off length</i> pada sambungan las RFW tak sejenis AA6061-T6/AA7075-T6	171
Gambar 4.71. Pengaruh kecepatan putar terhadap kekuatan luluh dan kekuatan tarik sambungan las RFW tak sejenis AA6061-T6/AA7075-T6	173
Gambar 4.72. Lokasi patahan uji tarik pada sambungan las RFW tak sejenis AA6061-T6/AA7075-T6: (a) kondisi setelah uji tarik, (b) struktur makro patahan pada penampang membujur	174

- Gambar 4.73. Struktur makro sambungan las RFW tak sejenis AA6061-T6/AA7075-T6: (a) 370 rpm, (b) 540 rpm, (c) 800 rpm, (d) 1200 rpm, (e) 1700 rpm dan (f) 2500 rpm 176
- Gambar 4.74. Struktur mikro pada sambungan las RFW tak sejenis AA6061-T6/AA7075-T6: (a) 370 rpm, (b) 540 rpm, (c) 800 rpm, (d) 1200 rpm, (e) 1700 rpm, (f) 2500 rpm 178
- Gambar 4.75. Transformasi struktur mikro sambungan las RFW tak sejenis AA6061-T6/AA7075-T6 dari DRZ, TMAZ dan HAZ yang dihasilkan pada kecepatan putar 1700 rpm : (a) pada sisi 6061, (b) pada sisi AA7075-T6, (c) daerah DRZ 179
- Gambar 4.76. Analisis EDS pada sambungan las RFW tak sejenis AA6061-T6/AA7075-T6 yang diproduksi pada 1200 rpm : (a) sisi AA6061-T6, (b) daerah DRZ dan (c) sisi AA7075-T6 181
- Gambar 4.77. *Mapping* unsur daerah las untuk sambungan las RFW tak sejenis AA6061-T6/AA7075-T6 yang diproduksi pada 1200 rpm : (a) posisi pengambilan data, (b) Al, (c) Mn, (d) Cu, (e) Zn, (f) Fe, (g) Mg 182
- Gambar 4.78. Profil *microhardness* pada sambungan las RFW tak sejenis AA6061-T6/AA7075-T6 akibat variasi putaran 183
- Gambar 4.79. Distribusi tegangan sisa sambungan las RFW tak sejenis AA6061-T6/AA7075-T6 yang dihasilkan pada putaran 1200 rpm 185
- Gambar 4.80. Kurva S-N sambungan las RFW tak sejenis AA6061-T6/AA7075-T6 yang dihasilkan pada putaran 1200 rpm, RFW sejenis AA6061-T6 dan RFW sejenis AA7075-T6 187
- Gambar 4.81. Lokasi patahan pada uji kelelahan las RFW pada sambungan las RFW tak sejenis AA6061-T6/AA7075-T6 188
- Gambar 4.82. Permukaan patahan pada sambungan las RFW tak sejenis AA6061-T6/AA7075-T6 yang dihasilkan pada kecepatan putar 1200 rpm setelah pengujian kelelahan : (a) foto struktur makro, (b),(c) foto SEM untuk daerah B dan (d),(e) foto SEM untuk daerah A 190

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1. Sertifikat material AA5083-H112	204
LAMPIRAN 2. Sertifikat material AA6061-T6	205
LAMPIRAN 3. Sertifikat material AA7075-T6	206
LAMPIRAN 4. Profil temperatur T1 pada berbagai variasi material	207
LAMPIRAN 5. Profil temperatur T1 pada berbagai variasi material	208
LAMPIRAN 6. Sambungan las RFW pada berbagai variasi material	209
LAMPIRAN 7. Burn off length RFW pada berbagai variasi material	210
LAMPIRAN 8. Struktur makro pada semua sambungan RFW	211
LAMPIRAN 9. Struktur mikro pada semua sambungan RFW	212
LAMPIRAN 10. Profil mikrohardness pada semua sambungan RFW	213
LAMPIRAN 11. Kekuatan tarik sambungan RFW	215
LAMPIRAN 12. Lokasi patahan hasil uji fatik	217
LAMPIRAN 13. Profil tegangan sisa sambungan RFW	218
LAMPIRAN 14. Lokasi patahan uji kelelahan sambungan RFW	219
LAMPIRAN 15. Kekuatan kelelahan sambungan RFW	220
LAMPIRAN 16. Foto SEM pada permukaan patah lelah	222
LAMPIRAN 17. Distribusi unsur pada sambunga RFW	224
LAMPIRAN 18. Unsur RFW tak sejenis AA5083-H112/AA6061-T6	226
LAMPIRAN 19. Unsur RFW tak sejenis AA5083-H112/AA7075-T6	227
LAMPIRAN 20. Unsur RFW tak sejenis AA6061-T6/AA7075-T6	228
LAMPIRAN 21. Set up pada mesin rotary bending fatigue	229
LAMPIRAN 22. Mesin uji tarik Shimadzu Servopulzer	230
LAMPIRAN 23. Mesin microhardness Buehler	231
LAMPIRAN 24. Mikroskop optik Olympus BX53M	232
LAMPIRAN 25. Mikroskop optik s Olympus SZX16	233
LAMPIRAN 26. Contoh spesimen uji tarik sebelum dan setelah uji	234
LAMPIRAN 27. Spesimen rotary bending sebelum dan setelah uji	235
LAMPIRAN 28. Contoh spesimen microhardness dan struktur mikro	236
LAMPIRAN 29. Contoh grafik hasil uji tarik	237
LAMPIRAN 30. Letter of acceptance internasional OIC-MMIE	238
LAMPIRAN 31. Sertifikat paper publish di Metals-MDPI	240