

J a m a s r i
S u l a r d j a k a

Pengelasan Paduan
Aluminium



Gadjah Mada University Press

DAFTAR ISI

PRAKATA	v
PENGANTAR PENERBIT.....	vii
BAB I ALUMINIUM DAN PADUAN ALUMINIUM	1
1.1. Pengantar	1
1.2. Aluminium dan Paduan Aluminium	2
Soal/Tugas	20
Referensi.....	20
BAB II KLASIFIKASI PENGELASAN	23
2.1. Pengantar.....	23
2.2. Las Busur.....	25
2.3. Las TIG	28
2.4. Las Logam Gas Mulia (Las MIG)	31
2.5. <i>Resistance Spot Welding</i> (Las Resistansi).....	35
2.6. Reaksi Kimia pada Las Busur.....	38
2.7. <i>Electron Beam Welding</i>	40
2.8. <i>Laser Beam Welding</i>	42
2.9. Pengaruh Pengelasan terhadap Kekuatan Aluminium yang Mengalami Pengerasan Pengerjaan dengan Dingin (<i>Work Hardened</i>).....	42
2.10. Pengaruh Pengelasan terhadap Kekuatan Aluminium yang Mengalami Pengerasan Presipitasi	45
Soal/Tugas	47
Referensi.....	48
BAB III PENGELASAN FUSI ALUMINIUM.....	49
3.1. Sifat Mampu Las Aluminium.....	49
3.2. Logam Pengisi (<i>Filler</i>).....	54
3.3. Masukan Panas pada Pengelasan Aluminium.....	61
3.4. Struktur Mikro Pengelasan	65

	3.5. Retak Las	66
	3.6. Pengelasan Paduan Aluminium Al – Mg – Si	72
	Soal/Tugas	77
	Referensi.....	78
BAB IV	PENGELASAN FASE PADAT	81
	4.1. <i>Friction Welding</i> (Pengelasan Friksi)	81
	4.2. Struktur Mikro Pengelasan Gesek (<i>Friction Welding</i>).....	86
	4.3. Sifat Mekanis Sambungan <i>Friction Welding</i>	89
	4.4. Penyambungan Difusi (<i>Difusion Bonding</i>).....	93
	Soal/Tugas	97
	Referensi.....	98
BAB V	FRICITION STIR WELDING	99
	5.1. Pengantar.....	99
	5.2. <i>Tool</i> dan Mesin Las <i>Friction Stir</i>	101
	5.3. Pencekam pada Proses FSW	107
	5.4. Kelebihan dan Kekurangan Proses FSW	108
	5.5. Struktur Mikro Hasil Pengelasan FSW.....	108
	5.6. Kekuatan Tarik Transversal <i>Weld Joint</i>	110
	5.7. Kekuatan Tarik <i>Longitudinal Weld Joint</i>	116
	5.8. Hasil Uji Kekerasan	119
	5.9. Siklus Termal Pengelasan FSW	122
	Soal/tugas:	124
	Referensi.....	124
BAB VI	MODEL MATEMATIKA PENGELASAN.....	127
	6.1. Pendahuluan.....	127
	6.2. Konduksi Panas Tidak <i>Steady</i>	128
	6.3. Sumber Panas Sesaat.....	128
	6.4. Fusi Lokal Akibat Busur Panas.....	131
	6.5. Las Titik	133
	6.6. Las Gesek (Las Friksi).....	136
	6.7. Sumber Panas Bergerak	141
	Soal/Tugas	143
	Referensi.....	144
BAB VII	PENGUJIAN MATERIAL	145
	7.1. Pengujian Merusak.....	145
	7.2. Pengujian Tidak Merusak	156
	Soal/Tugas	166
	Referensi.....	167

BAB VIII	MEKANIKA PERPATAHAN	169
	8.1. Pengantar.....	169
	8.2. Laju Perambatan Retak.....	172
	8.3. Pengaruh Jenis Filler terhadap Perambatan Retak AA 6061 – T4	175
	8.4. Perilaku Perambatan Retak Hasil Pengelasan FSW	183
	8.5. Perilaku Fatik pada Sambungan Las.....	192
	Soal/Tugas	196
	Referensi.....	196
BAB IX	TEGANGAN SISA DAN DISTORSI PADA PENGELASAN ..	199
	9.1. Pengukuran Tegangan Sisa dengan Metode Difraksi Sinar X	203
	9.2. Pengujian <i>Neutron Diffraction</i>	210
	9.3. Pengukuran Tegangan Sisa dengan Metode Pengeboran....	212
	9.4. Tinjauan Distorsi.....	215
	Soal/Tugas	220
	Referensi.....	221
	DAFTAR PUSTAKA.....	223
	GLOSARIUM.....	229
	INDEKS	233
	TENTANG PENULIS.....	237

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Faktor efisiensi pada berbagai proses pengelasan [7].....	25
Tabel 2.2. Pengaruh perubahan parameter pengelasan terhadap hasil las [3]	35
Tabel 2.3. Temperatur disosiasi gas pada kolom busur	39
Tabel 3.1. Kesesuaian logam induk dengan logam pengisi untuk meminimalisasi retak pada pengelasan aluminium [5].....	55
Tabel 4.1. Parameter pengelasan <i>inertia drive welding</i> untuk bahan sejenis	86
Tabel 4.2. Parameter pengelasan <i>inertia drive welding</i> untuk bahan tidak sejenis	87
Tabel 5.1. Pengukuran temperatur pada pengelasan FSW pada kecepatan pengelasan 0,1 m/dt [7]	112
Tabel 5.2. Perbandingan kekuatan tarik sambungan <i>but</i> FSW dan las TIG [7][13].....	113
Tabel 7.1. Pengujian Kekerasan [3].....	151
Tabel 7.2. Larutan Etsa untuk Pengamatan Mikroskop [7].....	154
Tabel 7.3. Data hasil pengujian tarik [5]	167
Tabel 8.1. Pengaruh <i>filler</i> terhadap konstanta Paris pada daerah HAZ	178
Tabel 8.2. Pengaruh <i>filler</i> terhadap konstanta Paris pada logam las	180
Tabel 8.3. Nilai konstanta Paris.....	190

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1.	Persentase produksi aluminium di seluruh dunia [1].	1
Gambar 1.2.	Diagram Fasa Al-Cu [6]	9
Gambar 1.3.	Diagram fasa Al – Mn [6].	10
Gambar 1.4.	Diagram fasa Al – Si [6].....	11
Gambar 1.5.	Diagram fasa Al – Mg [6].	12
Gambar 1.6.	Diagram fasa Al – Zn [6].....	13
Gambar 1.7.	Diagram fasa Al – Li [6].	14
Gambar 1.8.	Grafik hubungan antara kekuatan luluh dan elongasi dengan kandungan magnesium beberapa paduan aluminium [5].....	15
Gambar 1.9.	Grafik tingkat kelarutan padat unsur paduan sebagai fungsi temperatur [5].....	16
Gambar 1.10.	Pengerasan regangan pada Aluminium (1100), Al-Mn (3003) dan Al-Mg (5052 dan 5050) [5].....	17
Gambar 1.11.	Skema penguatan dengan metode pengerasan endapan (<i>precipitation hardening</i>) [3].....	19
Gambar 2.1.	Klasifikasi pengelasan [1]	24
Gambar 2.2.	Las busur dengan elektroda terbungkus [1]	26
Gambar 2.3.	Pemindahan logam cair [1]	27
Gambar 2.4.	Las busur gas [1]	27
Gambar 2.5.	Klasifikasi las busur [1].....	28
Gambar 2.6.	Diagram proses las TIG [3].....	29
Gambar 2.7.	Perbandingan busur tungsten pada gas argon dan helium [4]	30

Gambar 2.8.	Diagram proses las busur logam gas (elektroda terumpun) [3]	32
Gambar 2.9.	<i>Short-circuiting transfer</i> pada pengelasan MIG [5]	32
Gambar 2.10.	Mekanisme <i>short-circuiting transfer</i> [5]	33
Gambar 2.11.	Mekanisme <i>globular transfer</i> [5]	33
Gambar 2.12.	Mekanisme <i>spray transfer</i> [5]	34
Gambar 2.13.	Skema pengelasan las titik resistansi [6]	36
Gambar 2.14.	Siklus panas pengelasan RSW [8]	38
Gambar 2.15.	Skema diagram yang menunjukkan proses tahapan utama pada proses pengelasan GMAW [9]	39
Gambar 2.16.	Idealisasi reaksi dua tahap pada las busur [7].	40
Gambar 2.17.	Diagram skematis proses <i>electron beam welding</i> [10]	41
Gambar 2.18.	Pengaruh pengelasan terhadap kekuatan HAZ aluminium 5083 yang mengalami proses <i>work hardened</i> [11]	43
Gambar 2.19.	Pelunakan material yang mengalami <i>work hardened</i> akibat pengelasan [11] (a) penampang melintang las, (b) siklus termal, (c) kekuatan atau profil kekerasan	44
Gambar 2.20.	Pengaruh masukan panas persatuan panjang terhadap kekerasan HAZ pada AA 5356 yang dikeraskan dengan <i>work hardening</i> [11]	44
Gambar 2.21.	Diagram fasa Al – Cu [13]	45
Gambar 2.22.	Profil kekerasan pada daerah HAZ pada hasil pengelasan AA 7039 [13] (a) pengelasan kontinu 4 pas; (b) pengelasan kontinu 16 pas.	47
Gambar 3.1.	Terjadinya retak akibat proses pembekuan pada hasil pengelasan TIG aluminium [2]	50
Gambar 3.2.	Pengaruh persentase paduan terhadap sensitivitas retak pada proses pembekuan paduan aluminium [2]	51
Gambar 3.3.	Kelarutan hidrogen pada aluminium [2]	52
Gambar 3.4.	Pengaruh porositas terhadap kekuatan dan keuletan hasil pengelasan aluminium [2]	52
Gambar 3.5.	Distribusi kekerasan pada daerah <i>fusion line</i> (FL) dan HAZ pada hasil pengelasan TIG AA-6061-T4 [8]	56
Gambar 3.6.	Distribusi kekerasan pada daerah HAZ pada hasil pengelasan TIG AA-6061-T6 [5]	57

Gambar 3.7.	(a) Siklus termal (b) profil kekerasan daerah HAZ pada hasil pengelasan aluminium yang mengandung presipitat θ' dan β' [5].....	57
Gambar 3.8.	Pengaruh <i>filler</i> terhadap kekuatan tarik statis pada sambungan <i>butt joint</i> transversal [8].....	58
Gambar 3.9.	Pengaruh <i>filler</i> terhadap kekuatan tarik statis pada sambungan <i>butt joint</i> longitudinal [8].....	59
Gambar 3.10.	Pengaruh <i>filler</i> terhadap perpanjangan pada sambungan <i>butt joint</i> transversal dan longitudinal [8].....	60
Gambar 3.11.	Retak panas pada hasil pengelasan aluminium [12].....	60
Gambar 3.12.	Total panjang retak (TCL) pada daerah PMZ pada pengelasan TIG Aluminium 6061 [13].....	61
Gambar 3.13.	Besar arus yang disarankan terhadap ketebalan plat [2] ..	62
Gambar 3.14.	Pengelasan TIG dengan arus DC polaritas negatif menghasilkan penetrasi las yang lebih dalam [2].....	63
Gambar 3.15.	Pengelasan TIG dengan arus DC polaritas positif memberikan efek pembersihan yang baik seperti ion gas argon yang mengalir dengan gaya yang cukup untuk menghilangkan oksidasi pada permukaan logam [2]	64
Gambar 3.16.	Pengelasan TIG dengan AC memberikan penetrasi yang dalam memberikan efek pembersihan yang baik seperti seperti pada arus DC polaritas positif [2].....	64
Gambar 3.17.	a. diagram fase <i>eutectic</i> , b. siklus termal [5].....	65
Gambar 3.18.	Skema pembentukan pencairan parsial [5]	66
Gambar 3.19.	Skema pembentukan pencairan parsial [15]	67
Gambar 3.20.	Retak pada pembekuan kolumnar [15].....	68
Gambar 3.21.	Retak <i>intergranular</i> pada HAZ pada hasil pengelasan TIG AA 2219 [16].....	69
Gambar 3.22.	Retak <i>liquitation intergranular</i> pada PMZ pada hasil pengelasan MIG AA 6061 [12]	70
Gambar 3.23.	Terjadinya lubang halus pada pengelasan aluminium [17]	71
Gambar 3.24.	Struktur mikro daerah las dari paduan aluminium yang dapat diperlaku-panaskan [17]	71
Gambar 3.25.	Pengintian fase β' (Mg_2Si) akibat proses pendinginan [18]	72

Gambar 3.26. Struktur mikro hasil pengelasan Al – 0,8% Mg – 0,5% Si dengan arus 160 A tanpa siklus panas [19] a. logam induk. b. HAZ. c. batas fusi d. logam las	73
Gambar 3.27. Pengaruh frekuensi pulsa terhadap struktur mikro hasil pengelasan TIG Al – Mg – Si [19]	74
Gambar 3.28. Pengaruh frekuensi pulsa terhadap kekerasan pada arus pengelasan a. 160 A b. 180 A [19].....	75
Gambar 3.29. Struktur mikro logam las pada logam las dengan arus pengelasan 160 A (a) dan 180 A (b) [19].....	76
Gambar 4.1. Skema proses pengelasan gesek [1] (a) satu benda berputar dan yang satu diam, (b) kedua benda disatukan dengan tekanan tertentu sehingga timbul panas, (c) putaran dihentikan.....	82
Gambar 4.2. Aplikasi pengelasan gesek (<i>friction weld</i>) pada poros.....	83
Gambar 4.3. Skema proses pengelasan gesek (<i>friction welding</i>) [2]....	84
Gambar 4.4. Parameter proses pengelasan gesek (<i>friction welding</i>) [1]	84
Gambar 4.5. Plot parameter terhadap waktu relatif pada pengelasan gesek dengan metode <i>inertia drive welding</i> [1]	86
Gambar 4.6. Skema pengelasan gesek dengan menambah material <i>insert</i> [3]	88
Gambar 4.7. Pengaruh bahan <i>insert</i> terhadap kekuatan tarik sambungan las friksi [3]	89
Gambar 4.8. Distribusi kekerasan pada hasil pengelasan friksi [2]	90
Gambar 4.9. Kekuatan tarik sambungan las friksi pada variasi (t) dan P_1 [2].....	91
Gambar 4.10. Struktur mikro yang menunjukkan struktur subbutiran di dalam daerah terdeformasi penuh dan terdeformasi sebagian hasil pengelasan friksi paduan aluminium Al – Mg – Si. (a) <i>overview</i> ; (b) <i>close-up</i> bagian struktur subbutiran [5]	92
Gambar 4.11. Tahapan proses ikatan difusi [4].....	94
Gambar 4.12. Struktur mikro sambungan difusi menunjukkan tidak ada retak, lubang, atau kehilangan elemen paduan [4].....	95
Gambar 4.13. Pengujian tarik hasil sambungan dengan ikatan difusi	95

Gambar 4.14.	Hasil pengujian <i>bending</i> dan puntir sambungan ikatan difusi antara aluminium 6082 dengan Ti-6Al-4V	96
Gambar 5.1.	Skema ilustrasi proses FSW [1]	99
Gambar 5.2.	Lubang yang dihasilkan pada akhir pengelasan oleh <i>Conventional Welding Tool</i> [4].....	102
Gambar 5.3.	Berbagai macam jenis <i>Friction Stir Welding Tool</i> (a) <i>Conventional Pin Tool</i> [2] (b) <i>Manually Adjustable Pin Tool</i> [1] (c) <i>Automatic Retractable Pin Tool</i> [5].....	103
Gambar 5.4.	Dimensi pada <i>tool shoulder</i> [6].....	104
Gambar 5.5.	Profil pada <i>tool pin</i> [6]	104
Gambar 5.6.	Pengaruh profil pin terhadap kekerasan mikro daerah FSP pada diameter <i>shoulder</i> 18 mm [6]	105
Gambar 5.7.	Mesin <i>ESAB Super StirTM</i> untuk proses pengelasan FSW	105
Gambar 5.8.	Pengelasan FSW dengan mesin freis [7].....	106
Gambar 5.9.	Modifikasi mesin bubut untuk proses FSW [8].....	106
Gambar 5.10.	Pencekaman pada pengelasan FSW	107
Gambar 5.11.	Klasifikasi struktur mikro pada las FSW [2].....	109
Gambar 5.12.	Foto struktur mikro hasil pengelasan FSW	109
Gambar 5.13.	Kekuatan tarik sambungan FSW AA 6061 – T4 [7]	110
Gambar 5.14.	Pengaruh putaran <i>welding tool</i> terhadap distribusi kekerasan FSW AA 6061 – T4 [7]	112
Gambar 5.15.	Pengaruh temperatur terhadap sifat bahan [12].....	113
Gambar 5.16.	Grafik kekuatan tarik dan kekuatan luluh sambungan transversal pada putaran 440 rpm [8].....	114
Gambar 5.17.	Grafik kekuatan tarik dan kekuatan luluh sambungan transversal pada putaran 720 rpm [8].....	115
Gambar 5.18.	Grafik kekuatan tarik dan kekuatan luluh sambungan transversal pada putaran 1.050 rpm [8].....	115
Gambar 5.19	Grafik kekuatan tarik dan kekuatan luluh sambungan longitudinal pada putaran 440 rpm [8].....	117
Gambar 5.20.	Grafik kekuatan tarik dan kekuatan luluh sambungan longitudinal pada putaran 720 rpm [8].....	117
Gambar 5.21.	Grafik kekuatan tarik dan kekuatan luluh sambungan longitudinal pada putaran 1.050 rpm.....	118

Gambar 5.22.	Grafik kekuatan tarik dan kekuatan luluh sambungan longitudinal pada variasi kecepatan pengelasan dan putaran pahat [8].....	118
Gambar 5.23.	Grafik hasil uji kekerasan [8]	120
Gambar 5.24.	Daerah perpatahan pada spesimen uji tarik [2]	120
Gambar 5.25.	Distribusi kekerasan pada berbagai variasi pengelasan FSW [10]	121
Gambar 5.26.	a. Pengukuran kekerasan. b. Variasi kekerasan zona FSW AA 2024 T351 [10]	121
Gambar 5.27.	Dimensi pahat [11]	122
Gambar 5.28.	Hubungan waktu terhadap siklus panas pada pengukuran pada sisi yang sama [11]	123
Gambar 5.29.	Kurva distribusi temperatur terhadap arah tebal [11].....	123
Gambar 6.1.	a. Model sumber panas pada bidang b. Model sumber panas pada garis c. Model sumber panas pada titik	130
Gambar 6.2.	Sumber panas titik untuk model distribusi temperatur akibat busur panas	131
Gambar 6.3.	Temperatur akibat pemanasan busur	133
Gambar 6.4.	Model pengelasan titik pada plat.....	134
Gambar 6.5.	Pola temperatur–waktu pengelasan titik	135
Gambar 6.6.	Model skematik aliran panas pada las friksi	136
Gambar 6.7.	Pembagian waktu menjadi elemen-elemen infinitesimal.	137
Gambar 6.8.	Metode untuk menghitung temperatur transien selama pengelasan	140
Gambar 6.9.	Grafis hasil perhitungan pola temperatur–waktu pada pengelasan friksi.....	141
Gambar 6.10.	Sumber titik bergerak pada plat semi infinit	142
Gambar 7.1.	Pengujian merusak dan tidak merusak pada sambungan las [1].....	146
Gambar 7.2.	Kurva Tegangan-Regangan [2] (a) Besi Cor (b) Baja Karbon Rendah (c) Aluminium	148
Gambar 7.3.	Skema pengujian Impak [4] a. Metode Charpy. b. Metode Izod.....	152
Gambar 7.4.	Konfigurasi anvil dan spesimen pada pengujian Charpy [4,5]	153

Gambar 7.5.	Tipe morfologi struktur mikro pada aluminium paduan [7]	156
Gambar 7.6.	Cara kerja metode pengujian dengan cairan <i>penetrant</i> [8]	157
Gambar 7.7.	Distorsi garis-garis fluks magnet karena adanya cacat [8]	158
Gambar 7.8.	Distorsi garis-garis fluks magnet karena adanya cacat di bawah permukaan [8]	159
Gambar 7.9.	Distorsi yang kecil pada garis-garis fluks magnet akibat medan magnet sejajar dengan panjang cacat [8]	159
Gambar 7.10.	<i>Ultrasonic Inspection</i> [8]	160
Gambar 7.11.	Intensitas vs Waktu pada <i>Ultrasonic Inspection</i> [8]	160
Gambar 7.12.	<i>Ultrasonic Inspection</i> dengan menggunakan air sebagai media penghubung transduser dan material yang diinspeksi [8]	161
Gambar 7.13.	Metode inspeksi radiografi [10]	163
Gambar 7.14.	Hasil foto radiografi untuk mengamati retak pada Liberty bell [8]	164
Gambar 7.15.	Prinsip kerja inspeksi dengan arus Eddy [10]	164
Gambar 7.16.	Arus Eddy tertahan untuk bergerak akibat adanya retak [8]	165
Gambar 7.17.	Skema ilustrasi sistem optik yang digunakan dalam holografi untuk mendeteksi cacat pada benda kerja [10] .	166
Gambar 8.1.	Mekanisme patah fatik model <i>wood</i> [2]	169
Gambar 8.2.	Hubungan ketahanan fatik dan kekerasan material [3]	170
Gambar 8.3.	Tiga pola pembebanan.....	171
Gambar 8.4.	Tegangan di ujung retak	172
Gambar 8.5.	Grafik hubungan antara panjang retak terhadap siklus pada beban dan amplitudo konstan [2]	173
Gambar 8.6.	Karakteristik perambatan retak fatik	174
Gambar 8.7.	Kurva $a - N$ spesimen <i>raw material</i> Al 6061 T4	176
Gambar 8.8.	Kurva da/dN <i>raw material</i> Al 6061 T4	177
Gambar 8.9.	Kurva $a - N$ pada daerah HAZ.....	177
Gambar 8.10.	Kurva $da/dN - \Delta K$ pada daerah HAZ	178
Gambar 8.11.	Kurva $a - N$ pada logam las	179

Gambar 8.12. Kurva $da/aN - \Delta K$ pada logam las.....	179
Gambar 8.13. Kurva $a - N$ pada pengelasan longitudinal dengan <i>filler</i> Al 2319.....	180
Gambar 8.14. Kurva $da/dN - \Delta K$ pada pengelasan longitudinal dengan menggunakan <i>filler</i> Al 2319.....	181
Gambar 8.15. Kurva $a - N$ pada pengelasan longitudinal dengan <i>filler</i> Al 4043.....	181
Gambar 8.16. Kurva $da/dN - \Delta K$ pada pengelasan longitudinal dengan <i>filler</i> Al 4043.....	182
Gambar 8.17. Kurva $a - N$ pada pengelasan longitudinal dengan <i>filler</i> Al 5356.....	182
Gambar 8.18. Kurva $da/dN - \Delta K$ pada pengelasan longitudinal dengan <i>filler</i> Al 5356.....	183
Gambar 8.19. Grafik a vs N AA 2024 – T4.....	184
Gambar 8.20. Grafik da/dN vs ΔK AA 2024 – T3.....	184
Gambar 8.21. Garis perambatan retak yang terjadi.....	185
Gambar 8.22. Gambar replika perambatan retak AA 2024 T351 [9] a. beban 270 MPa b. Beban 300 MPa.....	186
Gambar 8.23. Grafik a vs N pengelasan FSW dengan kecepatan pengelasan 2 mm/s.....	187
Gambar 8.24. Grafik da/dN vs ΔK pengelasan FSW dengan kecepatan pengelasan 2 mm/s.....	187
Gambar 8.25. Grafik a vs N pengelasan FSW dengan kecepatan pengelasan 4 mm/s.....	188
Gambar 8.26. Grafik da/dN vs ΔK pengelasan FSW dengan kecepatan pengelasan 4 mm/s.....	188
Gambar 8.27. Grafik a vs N pengelasan FSW dengan kecepatan pengelasan 6 mm/s.....	189
Gambar 8.28. Grafik da/dN vs ΔK pengelasan FSW dengan kecepatan pengelasan 6 mm/s.....	189
Gambar 8.29. Grafik da/dN vs ΔK pengelasan FSW dan <i>raw material</i> ..	190
Gambar 8.30. Nilai konstanta Paris n	191
Gambar 8.31. Perilaku perambatan retak hasil pengelasan FSW pada AA 2024 T351 [9].....	192
Gambar 8.32. Hasil pengujian tarik las FSW dan MIG [8].....	193

Gambar 8.33. Kurva S – N hasil pengelasan FSW dan MIG [8].....	194
Gambar 8.34. Kekuatan fatik hasil pengelasan FSW pada AA 2024 T351 [9]	195
Gambar 8.35. Kekuatan fatik hasil pengelasan MIG dan VPPA bahan AA 2024 T351 [10]	195
Gambar 8.36. Struktur mikro hasil pengelasan MIG yang telah diuji fatik [10].....	196
Gambar 9.1. Tegangan induksi termal [1].....	201
Gambar 9.2. Perubahan temperatur dan tegangan saat pengelasan	202
Gambar 9.3. Difraksi sinar X oleh suatu kristal [3].	204
Gambar 9.4. Skema penggunaan difraksi sinar X [3]	205
Gambar 9.5. Contoh hasil XRD, grafik Intensitas dengan 2θ [3]	206
Gambar 9.6. Sinar dengan panjang gelombang yang sama fasenya [3]	207
Gambar 9.7. Skema pengaruh susunan atom terhadap difraksi sinar X [3]	208
Gambar 9.8. Skema arah penembakan dan bidang yang dikenai sinar X [3]	209
Gambar 9.9. Perbedaan penetrasi difraksi neutron dan XRD [4]	210
Gambar 9.10. Skema pengukuran difraksi neutron untuk tegangan sisa [4]	211
Gambar 9.11. TML FRASS – 2 – 23 <i>residual stress rossete</i>	213
Gambar 9.12. Pengukuran tegangan sisa dengan metode pengeboran ...	214
Gambar 9.13. Distorsi pada proses pengelasan [2].....	217
Gambar 9.14. Pengaruh masukan panas terhadap distorsi transversal [16]	219
Gambar 9.15a. Pengaruh masukan panas terhadap distorsi <i>angular</i> [16]	219
Gambar 9.15b. Pengaruh masukan panas terhadap distorsi <i>angular</i> [17]	220