

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
HALAMAN PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
PRAKATA	iv
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN	xvii
INTISARI	xx
ABSTRACT	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Penelitian	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan Penelitian	5
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI	7
2.1 Tinjauan Pustaka	7
2.2 Landasan Teori	9
2.2.1 Aluminium	9
2.2.2 Aluminium Paduan	10
2.2.3 Aluminium Paduan Al-Cu	17
2.2.4 Mekanisme Peningkatan Kekuatan Aluminium Paduan	18
2.2.5 Logam Paduan Al-Cu	22
2.2.6 <i>Hot Tearing</i>	23

2.2.6.1 Pengaruh Temperatur Penuangan Terhadap <i>Hot Tearing</i>	29
2.2.6.2 Pengaruh Temperatur Cetakan Terhadap <i>Hot Tearing</i>	32
2.2.6.3 Pengaruh Penghalus Butir Terhadap <i>Hot Tearing</i>	35
2.2.6.4 Pengukuran Tingkat Kerentana <i>Hot Tearing</i>	36
2.2.7 Jenis Cetakan untuk Pengamatan <i>Hot Tearing</i>	37
2.2.7.1 Cetakan <i>Ring Casting</i>	37
2.2.7.2 Cetakan <i>Flanged Bar</i>	38
2.2.7.3 Cetakan “U” <i>Casting</i>	39
2.2.7.4 Cetakan <i>Ball-bar</i>	40
2.2.7.5 Cetakan <i>Backbone</i>	41
2.2.7.6 Cetakan <i>I-beam Casting</i>	42
2.2.7.7 Cetakan <i>Chilled Casting</i>	42
2.2.7.8 Cetakan <i>Constrained Rod Casting (CRC)</i>	43
2.2.7.9 Cetakan <i>Horizontal Bar</i>	44
2.2.7.10 Cetakan Pengujian <i>N-tech</i>	45
2.2.8 <i>Hot Tear Physical Processes</i>	46
2.2.9 <i>Hot Tear Model Matematis</i>	46
2.3 Pengamatan Struktur Mikro	47
2.3.1 Mikroskop Optik	48
2.3.2 Pengukuran Butiran	48
2.4 Laju Korosi	49
2.5 Pengujian Mekanis	53
2.5.1 Uji Kekerasan	53
2.5.2 Uji Impak	54
2.5.3 Uji Tarik	57
2.5.4 Uji Fatik	59
BAB III METODE PENELITIAN	70
3.1 Bahan dan Alat	70
3.2 Peralatan	71

3.3 Proses Penelitian	72
3.3.1 Pengecoran dan Peleburan	72
3.3.2 Cetakan Baja	73
3.4 Pengukuran dan Pengujian	77
3.4.1 <i>Hot Tearing Rating System</i>	77
3.4.2 Persiapan Sampel	78
3.4.3 Pengujian <i>cast-sample</i>	78
3.5 Diagram Alir Penelitian	88
3.6 Tahapan Penelitian	90
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	94
4.1 Kerentanan <i>Hot Tearing</i>	94
4.2 Porositas dan Densitas	110
4.3 Struktur-mikro	112
4.4 Korosi	120
4.5 Kekerasan	124
4.6 Energi Impak	127
4.7 Kuat Tarik	129
4.8 <i>Fatigue Strength</i>	126
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	140
5.1 Kesimpulan	140
5.2 Saran	141
DAFTAR PUSTAKA	142
LAMPIRAN-LAMPIRAN	145

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Ilustrasi penghalusan butir aluminum	16
Gambar 2.2	Hipotesis <i>diagram phase</i> untuk paduan penguas endapan dari komposisi C_0	19
Gambar 2.3	Skema kedua pelarutan dan perlakuan panas presipitat untuk penguasan presipitat	21
Gambar 2.4	Skematik kekuatan dan kekerasan sebagai fungsi dari logaritma waktu penuaan pada temperatur konstan selama proses perlakuan panas presipitat	21
Gambar 2.5	Diagram fase binery Al-Cu	22
Gambar 2.6	Pembentukan <i>hot tearing</i> berdasarkan konsep <i>liquid film interdendritic</i>	26
Gambar 2.7	WF untuk berbagai tipe <i>tear</i>	37
Gambar 2.8	Desain cetakan <i>ring casting</i>	38
Gambar 2.9	Desain cetakan <i>flanged bar casting</i>	39
Gambar 2.10	Cetakan “U”	39
Gambar 2.11	Cetakan <i>ball-bar casting</i>	40
Gambar 2.12	Pengujian <i>hot tearing</i> cetakan <i>backbone</i>	41
Gambar 2.13	Cetakan kombinasi beberapa <i>backbone</i> untuk mengamati kerentanan <i>hot tearing</i>	41
Gambar 2.14	Cetakan <i>I-beam casting</i>	42
Gambar 2.15	Cetakan <i>chilled casting</i>	43
Gambar 2.16	Skema cetakan CRC	44
Gambar 2.17	Cetakan <i>horizontal bar</i>	45
Gambar 2.18	Cetakan <i>N-tech</i>	45
Gambar 2.19	Tampilan butir setelah dipoles dan di-etsa pada pengamatan dengan mikroskop optik	47
Gambar 2.20	Skema perbedaan pantulan cahaya dari permukaan	48

	yang dipoles dan di-etsa	
Gambar 2.21	Skema uji korosi sel tiga elektroda	50
Gambar 2.22	Garis Tafel dan penentuan Icorr	51
Gambar 2.23	Indentor uji Brinell dan uji Rockwell	53
Gambar 2.24	Skema uji impak Charpy dan Izod	54
Gambar 2.25	Spesimen uji impak Charpy dan Izod	55
Gambar 2.26	Skema untuk perhitungan uji impak Charpy	55
Gambar 2.27	Skema uji tarik	57
Gambar 2.28	Kurva engineering <i>stress-strain</i>	58
Gambar 2.29	Skema permukaan patah akibat fatik	60
Gambar 2.30	Kurva siklus tegangan bolak – balik	61
Gambar 2.31	Kurva siklus tegangan berulang	61
Gambar 2.32	Kurva siklus tegangan acak	62
Gambar 2.33	Diagram skematik peralatan pengujian fatik untuk melakukan uji <i>rotating-bending</i>	63
Gambar 2.34	Diagram SFD dan BMD mesin uji fatik <i>rotary bending</i>	64
Gambar 2.35	Modulus penampang lingkaran padat	66
Gambar 2.36	Kurva S-N dengan <i>fatigue limit</i>	68
Gambar 2.37	Penentuan kekuatan fatik dari kurva S-N	69
Gambar 3.1	Aluminum <i>wrought alloy</i> Al-2024	70
Gambar 3.2	Proses peleburan dan pengecoran dengan <i>electric furnace</i>	72
Gambar 3.3	Pengukuran temperatur saat proses pengecoran	73
Gambar 3.4	Cetakan <i>ring casting</i>	74
Gambar 3.5	Cetakan spesimen pengujian sifat mekanis	75
Gambar 3.6	Neraca digital	80
Gambar 3.7	Mikroskop optik Olympus dengan perangkat Optilab	81
Gambar 3.8	Spesimen uji struktur mikro	81
Gambar 3.9	Alat uji laju korosi tipe sel tiga elektroda potensiostat tipe M273	82

Gambar 3.10	Alat uji kekerasan Brinell	83
Gambar 3.11	Ilustrasi spesimen uji dan lokasi titik uji kekerasan	83
Gambar 3.12	Dimensi spesimen uji impak	84
Gambar 3.13	Alat uji impak	84
Gambar 3.14	Mesin uji tarik UTS	85
Gambar 3.15	Spesimen uji Tarik	85
Gambar 3.16	Shimadzu ONO'S type H-6 <i>bending fatigue tester</i>	87
Gambar 3.17	Spesimen standar JIS Z2274	87
Gambar 3.18	Diagram alir penelitian	89
Gambar 4.1	Photograph dari <i>cast-sample</i>	96
Gambar 4.2	HCI terhadap paduan Al-Cu-Mg dengan tiga variasi temperatur tuang	98
Gambar 4.3	Cast-sample 1: (a) retak halus dan (b) retak sedang	99
Gambar 4.4	Kerentanan hot tear kategor <i>fully broken</i>	99
Gambar 4.5	Kategori retak halus pada cast-sample 2 pada temperatur tuang 738 °C	100
Gambar 4.6	Pembentukan dendrit pada berbagai tahap	101
Gambar 4.7	Perbedaan pembekuan dendritik <i>equiaxed</i> sejalan dengan mekanisme pembentukan <i>hot tearing</i>	102
Gambar 4.8	Faktor kunci yang mempengaruhi <i>hot tearing</i>	102
Gambar 4.9	Skema pembentukan <i>hot tear</i> dalam dendrit kolumnar	103
Gambar 4.10	Kurva pembekuan paduan Al-Cu-Mg pada temperatur tuang 688 °C	104
Gambar 4.11	Laju pendinginan dari kurva pembekuan paduan Al-Cu-Mg (temperatur tuang 688 °C).	105
Gambar 4.12	Kurva pendingin (<i>cooling curve</i>) untuk paduan Sn Pb-30% <i>hypoeutectic</i>	107
Gambar 4.13	Paduan Al-Cu <i>as-cast</i> : (a) persentase porositas dan (b) densitas	111
Gambar 4.14	Porositas pada permukaan spesimen.	112

Gambar 4.15	Struktur mikro: (a) temperatur tuang 688°C, (b) temperatur tuang 738°C, (c) temperatur tuang 788 °C.	113
Gambar 4.16	Diagram fasa Al-Cu dan ilustrasi struktur mikro selama pembekuan pada paduan Al-4% Cu	115
Gambar 4.17	Struktur mikro paduan <i>as-cast</i>	115
Gambar 4.18	Garis <i>univariant</i> liquidus dan fasa utama	116
Gambar 4.19	Proyeksi Liquidus dengan liquidus isotherms	117
Gambar 4.20	SEM <i>image</i> pada temperatur tuang 788°C	118
Gambar 4.21	SEM-EDS <i>pattern</i> pada spesimen dengan temperatur tuang 788°C	119
Gambar 4.22	EDS <i>mapping</i> pada spesimen dengan temperatur tuang 788°C	120
Gambar 4.23	<i>Potential</i> dan <i>current</i> dengan metode tafel	121
Gambar 4.24	(a) <i>potential</i> dan <i>current</i> dengan metode <i>cyclic</i> : (b) temperatur tuang 688 °C, (c) temperatur tuang 738 °C, dan (d) temperatur tuang 788 °C.	123
Gambar 4.25	Pengaruh temperatur tuang terhadap kekerasan Brinell	126
Gambar 4.26	<i>Fracture</i> permukaan sampel uji impak terhadap temperatur	128
Gambar 4.27	Energi impak terhadap beda temperatur tuang	128
Gambar 4.28	Variasi temperatur tuang: (a) kuat tarik, (b) elongasi.	131
Gambar 4.29	<i>Fatigue strength</i> dengan beda temperatur tuang.	134
Gambar 4.30	Kurva S-N spesimen temperatur tuang 688 °C	135
Gambar 4.31	Kurva S-N spesimen temperatur tuang 738 °C	135
Gambar 4.32	Kurva S-N spesimen temperatur tuang 788°C	135
Gambar 4.33	Perbandingan dengan kurva S-N gabungan <i>cast-sample</i>	136
Gambar 4.34	Makro permukaan patah spesimen <i>fatigue strength</i>	137
Gambar 4.35	SEM permukaan patah spesimen fatik	139
Gambar 4.35	<i>initial crack</i> spesimen fatik.	139

DAFTAR TABEL

Table 2.1	Sifat dari aluminium pada 298.15 K	9
Tabel 2.2	Standar penomoran aluminiu paduan tempa	11
Tabel 2.3	Standar penomoran aluminium paduan cor	11
Table 2.4	Perbandingan rentang temperatur perlakuan panas dan initial Eutektik <i>Melting Temperature</i> untuk paduan 2XXX	17
Table 2.5	Sifat mekanis dari beberapa paduan yang umumnya digunakan di <i>aerospace</i>	17
Tabel 2.6	Pemberian nilai tipe <i>tear</i> yang terjadi pada sampel-cor	37
Table 2.7	Peringkat laju korosi	52
Table 3.1	Jumlah spesimen uji	71
Tabel 3.2	Jumlah spesimen untuk pengujian struktur mikro	81
Table 3.3	Jumlah spesimen untuk pengujian kekerasan	83
Table 3.4	Jumlah spesimen untuk pengujian impak	84
Table 3.5	Jumlah spesimen untuk pengujian tarik	86
Table 3.6	Jumlah spesimen untuk pengujian fatik <i>rotary bending</i>	87
Tabel 3.7	Beban yang diberikan pada pengujian fatik <i>rotary bending</i> .	87
Tabel 3.8	Tahapan dan indikator penelitian	90
Table 4.1	Komposisi kimia (wt.%)	94
Table 4.2	Nilai WF yang diberikan untuk tipe <i>tear</i> yang terjadi pada sampel-cor	96
Table 4.3	Nilai HTS	97
Table 4.4	Porositas dan densitas paduan Al-Cu-Mg	111
Table 4.5	Hasil pengujian korosi dengan metode <i>tafel</i>	121
Table 4.6	Hasil pengujian korosi dengan metode <i>cyclic</i>	123
Table 4.7	Nilai kekerasan Brinell terhadap beda temperatur tuang	125
Table 4.8	Energi impak paduan Al-Cu-Mg	128



Table 4.9	Data hasil uji kekuatan tarik terhadap beda temperatur	130
Table 4.10	Hasil Pengujian <i>fatigue strength</i> dengan beda temperatur tuang	130

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1. Diagram SFD dan BMD mesin uji fatik *rotary bending*.
- Lampiran 2. Komposisi Kimia (*wt.%*).
- Lampiran 3. Photograph dari *cast-sample hot tearing*
- Lampiran 4. Hasil perhitungan HCI untuk mengukur tingkan kerentanan *hot tearing*.
- Lampiran 5. Kurva pendinginan paduan Al-Cu-Mg pada temperatur tuang 688 °C.
- Lampiran 6. Porositas dan densitas paduan Al-Cu-Mg dengan beda temperatur tuang.
- Lampiran 7. Struktur mikro paduan Al-Cu-Mg.
- Lampiran 8. Hasil uji korosi dengan metode Tafel,
- Lampiran 9. Uji Kekerasan.
- Lampiran 10. Uji Ketangguhan Impak.
- Lampiran 11. Kekuatan Tarik.
- Lampiran 12. Uji fatik *rotary bending*.

DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

<u>Lambang</u>	<u>Arti</u>	<u>Satuan</u>
σ_y	tegangan luluh paduan	MPa
σ_o	Tegangan luluh awal	MPa
k	Konstanta	-
d	Ukuran diameter rata-rata butiran	mm
ε	Regangan di daerah <i>hot spot</i>	%
α	Koefisien ekspansi termal	°C ⁻¹
ΔT	Panjang daerah <i>mushy</i>	mm
L	Panjang produk cor	mm
l	Panjang daerah <i>hot spot</i>	mm
P	Gaya yang diperlukan untuk terbentuknya <i>hot tear</i>	N
α	Tegangan permukaan dari cairan	erg/cm ²
F	Bidang kontak antara lempeng dan cairan	cm ²
g	Konstanta percepatan gravitasi	cm/s ²
b	Ketebalan lapisan cair antara lempengan	cm
HTS	Nilai kerentanan terhadap cacat <i>hot tear</i>	-
NOT	Jumlah <i>hot tear</i> dari pengulangan sampel	-
WF	Tipe <i>hot tear</i>	-
NOF	Jumlah sampel untuk setiap parameter	-
f_{crack}	Faktor yang menunjukkan tingkat keparahan dari hot tear	-
$f_{location}$	Faktor yang menunjukkan lokasi yang tingkat sulit terbentuknya	-
η_a	Tafel reaksi oksidasi	mV
η_c	Tafel reaksi reduksi	mV
i_a	Arus pada reaksi anoda	μA/cm ²
i_c	Arus pada reaksi katoda	μA/cm ²
β_a	Gradien Tafel reaksi anoda	mV
β_c	Gradien Tafel reaksi katoda	mV

BHN	Angka kekerasan Brinell	kg/mm ²
F	Beban pengujian	kg
D	Diameter indentor	mm
D_i	Diameter jejak indentor	mm
m	Massa bandul	kg
g	Percepatan gravitasi	9,81 m.s ⁻²
L	Panjang lengan bandul	m
α	Besar sudut posisi awal bandul	°
β	Besar sudut akhir bandul	°
HI	Nilai ketangguhan impak	joule/mm ²
E	Energi yang diserap	joule
A	Luas penampang di bawah takik	mm ²
S	<i>Engineering stress</i>	MPa
F	Beban pengujian	N
A_0	Luas penampang mula-mula	mm ²
e	<i>Engineering strain</i>	%
Δl	Pertambahan panjang spesimen	mm
l_0	Panjang mula-mula spesimen	mm
σ	<i>True stress</i>	MPa
F	Beban pengujian	N
A	Luas penampang mula-mula	mm ²
ε	<i>True strain</i>	%
M_{max}	Momen gaya maksimum	N.mm
σ_{max}	Tegangan lengkung maksimum	MPa
d	Diameter minimum spesimen	mm
a	Jarak antara beban dan tumpuan	mm
dT	Laju pembekuan (turunan pertama temperatur)	°C/s
T_1	Temperatur awal	°C
T_2	Temperatur akhir	°C
t	Waktu	s

ρ_{ap}	Masa jenis aktual	gr/cm ³
ρ_{th}	Masa jenis teori	gr/cm ³

Arti Singkatan

ASTM	American society of testing and materials
CRC	Constrained Rod Casting
CRCM	Constrain Rod Casting Modified
HTS	Hot Tearing Susceptibility
NOT	Number of Tear
WF	Weighing Factor
NOF	Number of Casting
NSI	Hot Tearing Susceptibility Index
HR	Hardness Rockwell
BHN	Brinell Hardness Number
HV	Hardness Vickers
Cu	Copper
Mg	Magnesium
Ni	Nickel
Sn	Tin
Ti	Titanium
B	Boron
Mn	Manganese
Zn	Zinc
DAS	Dendrite Arm Spacing
DAQ	Data aquitition
HF	Hidrogen Fluorida
UTM	Ultimate Tensile Strength
I_{corr}	Intensitas arus korosi
E_{corr}	Garis potensial korosi