



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI PENGARUH TEMPERATUR DAN WAKTU TAHAN PERLAKUAN
PELARUTAN TERHADAP Pengerasan Penuaan Paduan
ALUMINIUM AC4B DENGAN KANDUNGAN UNSUR 0.108 *wt. %* Ti DAN
0.02 *wt. %* Sr**

SKRIPSI

**ABDUL LATIEF
0606074470**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK METALUGI & MATERIAL
DEPOK
JANUARI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI PENGARUH TEMPERATUR DAN WAKTU TAHAN
PERLAKUAN PELARUTAN TERHADAP Pengerasan Penuaan
PADUAN ALUMINIUM AC4B DENGAN KANDUNGAN UNSUR 0.108 wt.
% Ti DAN 0.02 wt. % Sr**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**ABDUL LATIEF
0606074470**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK METALUGI & MATERIAL
DEPOK
JANUARI 2011**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Abdul Latief
NPM : 0606074470
Tanda Tangan : 
Tanggal : 7 Januari 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Abdul Latief
NPM : 0606074470
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Studi Pengaruh Temperatur dan Waktu Tahan
Perlakuan Pelarutan Terhadap Pengerasan Penuaan
Paduan Aluminium AC4B dengan Kandungan
Unsur 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr.

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan Diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Bondan Tiara Sofyan, M.Si (.....)
Penguji 1 : Dr. Ir. Myrna Ariati, M.Si (.....)
Penguji 2 : Deni Ferdian, ST, M.Sc (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 7 Januari 2011

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, atas karunia dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Skripsi yang berjudul **“Studi Pengaruh Temperatur dan Waktu Tahan Perlakuan Pelarutan Terhadap Pengerasan Penuaan Paduan Aluminium AC4B dengan Kandungan Unsur 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr”** ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Universitas Indonesia. Saya Menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada :

1. Prof. Dr. Ir. Bondan Tiara Sofyan, M.Si selaku dosen pembimbing yang telah memberikan motivasi, bimbingan, pengetahuan, dan mengarahkan dalam saya dalam penyusunan skripsi ini.
2. Pihak CMPFA (Ahmad Effendi ST, Achmad Zakiyudin ST, Siti Chadijah ST, Yudha Pratesa ST, Doddy ST) yang telah membantu saya untuk memperoleh data-data yang diperlukan.
3. Dr. Ir. Myrna Ariati, M.Si, selaku Kepala Laboratorium Metalografi dan HST, terima kasih untuk fasilitas penggunaan laboratorium.
4. Pihak MDEV PT.AHM Sunter (Bapak Doddy Setiawan, Lusiana Eka, Bapak Ali, Mas Reza, Mas Devi dll), terima kasih telah memberikan fasilitas alat uji Rockwell dan dapur uji merk Mapple.
5. Kedua orangtua penulis, Busyra Rasyid M.Ag dan Indrawati BA, atas segala doa yang tidak henti-hentinya dipanjatkan, serta dorongan moril dan materil yang tidak putus-putusnya diberikan.
6. Keluarga penulis, Abdullah Sani S.Pd, Siti Aminah S.Si, Robby Ardiansyah, dan Sabrina Khairunnisa.
7. Mega Ayu Nurfitriana atas semangat dan masukan positif yang selalu diberikannya dengan penuh kasih sayang, sabar dan ikhlas.

8. Mochamad Fani Indarto sebagai rekan TA yang telah memberikan motivasi, pengalaman serta pengetahuannya.
9. Tim TA AC4B Mashudi Darti ST, Muhammad Azi Fallah ST, Nike Lestari ST, Alfarisi ST, dan Oktafinaldo Syafza ST, yang saling membantu dalam mendapatkan data.
10. Rekan-rekan Teknik Metalurgi 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009 dan 2010, khususnya untuk Andika Amanatilla (Metalurgi 2007) dan Ghiska Ramahdita (Metalurgi 2008) atas pembuatan mounting dan zat etsa.
11. Rekan-rekan di Salemba Group (Nurul Hidayat S.Si, Devry Ary Sinaga, S.Si, Nyken Yuliani, S.Pd, Yahya Farid Nasution, Tyara Mandasari S.Sos, Septarida S.Sos, Ahmad Syamsudin S.Hum, dr. Budi Heryadi, S.Ked, dll)
12. Rekan-rekan di Pondok Bukit Pisang (Mas Ivan, mas Fito, bang Harun, bang Hasan, Ricky, Ferdian, Lutfi, Andre, Herri, Tezar, Syukron, Kevin, Herly, Heru, Landra, Dudit, Suprayogi, Reza, Nova, dll)

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR
UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Abdul Latief
NPM : 0606074470
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

Dengan pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneklusif (Non-exclusive Royalty-Free Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

Studi Pengaruh Temperatur dan Waktu Tahan Perlakuan Pelarutan Terhadap
Pengerasan Penuaan Paduan Aluminium AC4B dengan Kandungan Unsur 0.108
wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia / formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya tanpa meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis / pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian Pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya,

Dibuat : Depok
Pada tanggal : 7 Januari 2011

Yang menyatakan



(Abdul Latief)

ABSTRAK

Nama : Abdul Latief
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Studi Pengaruh Temperatur dan Waktu Tahan
Perlakuan Pelarutan Terhadap Pengerasan Penuaan
Paduan Aluminium AC4B dengan Kandungan Unsur
0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr

Penambahan unsur stronsium dan titanium pada paduan aluminium AC4B yang biasa digunakan sebagai komponen *cylinder head*, bertujuan untuk mengurangi kegagalan yang terjadi pada proses pengecoran akibat cacat, diantaranya penyusutan, porositas, dan *misrun*. Selain itu, untuk meningkatkan kekerasan dari paduan perlu dilakukan pengerasan penuaan. Studi ini dilakukan untuk melihat pengaruh temperatur dan waktu tahan perlakuan pelarutan terhadap kekerasan puncak paduan AC4B dengan penambahan unsur Ti dan Sr.

Perlakuan pelarutan dilakukan pada temperatur 480, 500, dan 520 °C dengan waktu tahan 30 dan 120 menit pada paduan AC4B dengan kandungan 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr. Dilakukan pengamatan peningkatan kekerasan dan evolusi mikro sktruktur setelah proses penuaan pada temperatur 200 °C untuk waktu hingga 96 jam.

Hasil penelitian menunjukkan dengan meningkatnya temperatur serta waktu tahan lebih lama lebih melarutkan fasa-fasa kedua kedalam matriks. Sehingga pada waktu tahan yang lebih lama melarutkan fasa silikon dan fasa intermetalik yang berbentuk jarum menjadi lebih halus dan terjadi fragmentasi.

Kata Kunci : AC4B, titanium, stronsium, perlakuan pelarutan, pengerasan penuaan.

ABSTRACT

Nama : Abdul Latief
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Study on The Effect of Temperature and Holding Time
Solution Treatment to Age Hardening of Aluminium
AC4B Alloy with Addition 0.108wt. % Ti and 0.02 wt.%
Sr

Strontium and titanium added in AC4B aluminium alloys, which commonly used to produce a cylinder head, is to reduce reject in casting process, such as shrinkage, porosity, and misrun. To increase their hardness, the aluminium alloys are usually precipitation hardened. We study effect of combination of Ti and Sr addition during solution treatment process.

This research analyzed the solution treatment of 480, 500, and 520 °C with 30 and 120 minutes of holding time on AC4B alloys added with 0.108wt. % Ti and 0.02 wt.% Sr. Age hardening was followed during ageing at 200 °C for 96 hours and evolution of microstructure was observed.

Research results showed that the higher the temperature and longer the holding time dissolved more second phases into the matrix. Consequently, Longer holding time dissolved silicon and intermetallic phases, changing their morphology into finer and fragmented phases.

Key words: AC4B, titanium, strontium, solution treatment, age hardening.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Penelitian	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	3
1.3 Manfaat Penelitian.....	3
1.4 Ruang Lingkup Penelitian.....	3
1.4.1. Material Penelitian	3
1.4.2. Parameter Penelitian.....	3
1.4.3. Tempat Penelitian.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Paduan Aluminium Tuang	5
2.2 Aluminium Beserta Paduannya.....	6
2.3 Paduan Aluminium Silikon.....	8
2.4 Paduan Aluminium AC4B.....	9
2.5 Pengaruh Unsur Pada Paduan Aluminium Tuang	10
2.6 Pengaruh Penghalus Butir dan Modifikasi pada Aluminium Paduan	14
2.6.1 Pengaruh Penghalus Butir Terhadap Paduan Aluminium Tuang	15
2.6.2 Mekanisme Penghalus Butir.....	17
2.6.3 Pengaruh Modifikasi Terhadap Paduan Aluminium Tuang.....	19
2.6.4 Mekanisme Modifikasi.....	20
2.7 Proses Pengerasan Penuaan	23
2.7.1 Perlakuan Pelarutan (<i>Solution Treatment</i>).....	24
2.7.2 Pencelupan (<i>Quenching</i>)	26
2.7.3 Proses Penuaan (<i>Ageing</i>).....	27
2.8 Pengaruh Titanium dan Stronsium Terhadap Perlakuan Panas Paduan Aluminium.....	29
2.8.1Pengaruh Titanium Terhadap Perlakuan Panas pada Paduan Aluminium	29
2.8.2Pengaruh Stronsium Terhadap Perlakuan Panas pada Paduan Aluminium	30
BAB 3 METODE PENELITIAN	33
3.1 Diagram Penelitian	33
3.2 Bahan dan Peralatan	34
3.2.1 Bahan.....	34
3.2.2 Peralatan	34
3.3 Proses Pengujian.....	37
3.3.1 Pengujian Komposisi Kimia.....	37

3.3.2 Pengujian Kekerasan.....	37
3.3.3 Pengamatan Struktur Mikro	38
3.3.4 Pengujian <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	39
BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	40
4.1 Karakterisasi Hasil Pengecoran Paduan Aluminium AC4B.....	40
4.1.1 Analisis Komposisi Kimia.....	40
4.1.2 Pengamatan Struktur Mikro.....	41
4.2 Pengaruh Temperatur dan Waktu Tahan Perlakuan Pelarutan Terhadap Respon Penuaan Paduan Aluminium AC4B	42
4.2.1 Kurva Pengerasan Penuaan	42
4.2.2 Pengamatan Evolusi Struktur Mikro Menggunakan Mikroskop Optik 46	
4.2.3 Observasi Detail Struktur Mikro Menggunakan SEM / EDX.....	49
4.3 Pengaruh Temperatur dan Waktu Tahan Perlakuan Pelarutan Terhadap Respon Penuaan Paduan Aluminium AC4B Dengan Kandungan 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr.....	51
4.3.1 Kurva Pengerasan Penuaan	51
4.3.2 Pengamatan Evolusi Struktur Mikro Menggunakan Mikroskop Optik 56	
4.3.3 Observasi Detail Struktur Mikro Menggunakan SEM / EDX.....	62
4.4 Perbandingan Respon Penuaan Paduan Aluminium AC4B Sebelum dan Sesudah Penambahan dengan Kandungan 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr..	65
4.4.1 Kurva Pengerasan Penuaan	65
4.5 Perbandingan Pengaruh Temperatur Perlakuan Pelarutan dan Waktu Tahan Pelarutan Terhadap Kekerasan Puncak pada Paduan Aluminium AC4B Sebelum dan Sesudah Penambahan 0.108 wt.% Ti dan 0.02 wt.% Sr	67
BAB 5 KESIMPULAN	71
5.1 Kesimpulan	71
5.2 Saran	72
DAFTAR PUSTAKA	73
LAMPIRAN	77

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Diagram fasa paduan aluminium silikon (Al-Si)	8
Gambar 2.2	Pengaruh Mn terhadap kekuatan paduan aluminium	12
Gambar 2.3	Perbandingan kekuatan tarik pada temperatur tinggi dengan dan tanpa penambahan penghalus butir pada paduan Al-0.5%Mg-0.4%Si.....	16
Gambar 2.4	Pengaruh besar butir terhadap kecenderungan retak panas pada paduan Al-4.5Cu. Nilai dibawah 50 rentan terhadap retak panas17	
Gambar 2.5	Zona <i>undercooled</i> mendatar di depan daerah antarmuka pertumbuhan dendrit	19
Gambar 2.6	Skema pertumbuhan <i>acicular</i> silikon Kristal dari proses pembekuan tanpa modifikasi.....	20
Gambar 2.7	Pengaruh <i>over</i> modifikasi terhadap struktur mikro aluminium...22	
Gambar 2.8	Pengaruh waktu tahan terhadap kadar stronsium pada paduan aluminium-silikon.....	23
Gambar 2.9	Diagram Biner Al-Cu	25
Gambar 2.10	Efek perlakuan pelarutan terhadap bentuk morfologi dari partikel Si eutektik, etsa Dix-Keller, (a) sebelum perlakuan pelarutan, (b) 505 °C, selama 4 jam, (c) 515 °C, selama 4 jam, (d) 525 °C, selama 4 jam	26
Gambar 2.11	Pergerakan dislokasi pada endapan koheren	28
Gambar 2.12	Gerakan dislokasi pada endapan inkoheren.....	28
Gambar 2.13	Pengaruh penambahan titanium pada paduan aluminium A.356.2 setelah perlakuan pelarutan terhadap nilai elongasi.....	30
Gambar 2.14	Struktur mikro Si setelah dilakukan perlakuan pelarutan (<i>solution treatment</i>) tanpa ditambahkan unsur modifikasi stronsium pada aluminium A.413.1. (a) waktu pelarutan selama 0 jam (b) 8 jam, (c) 24 jam	31
Gambar 2.15	Struktur mikro Si setelah dilakukan perlakuan pelarutan (<i>solution treatment</i>) dengan ditambahkan unsur modifikasi stronsium pada aluminium A.413.1. (a) waktu pelarutan selama 0 jam (b) 8 jam, (c) 24 jam	31
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	33
Gambar 3.2	(a)Daerah pemotongan sampel (b) Hasil pemotongan dengan gerinda sampel tipis	35
Gambar 3.3	(a) mesin amplas, (b) mesin poles.....	36
Gambar 3.4	<i>Optical emission spectrometer</i> merk WAS	37
Gambar 3.5	Alat uji keras tipe Rockwell.....	38
Gambar 3.6	Mikroskop optik merek Olympus	39
Gambar 3.7	<i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM).....	39
Gambar 4.1	Struktur mikro paduan AC4B normal (a) dan AC4B dengan kandungan 0.108 wt.% Ti dan 0.02 wt. % Sr (b), menggunakan etsa Tucker.....	41
Gambar 4.2	Pengaruh waktu tahan terhadap respon pengerasan penuaan paduan AC4B dengan temperatur perlakuan pelarutan (a) 480 °C, (b) 500 °C, dan (c) 520 °C	44

Gambar 4.3	Pengaruh temperatur perlakuan pelarutan pada respon pengerasan penuaan pada paduan AC4B dengan waktu tahan (a) 30 menit dan (b) 120 menit.....	45
Gambar 4.4	Evolusi struktur mikro paduan Aluminium AC4B dengan temperatur perlakuan pelarutan: (a-b)480oC, (d-f)500oC, (g-i) 520°C selama 30 menit.....	48
Gambar 4.5	Evolusi struktur mikro paduan Aluminium AC4B dengan temperatur perlakuan pelarutan: (a-b)480oC, (d-f)500oC, (g-i) 520°C selama 120 menit.....	49
Gambar 4.6	Pengamatan struktur mikro dengan SEM pada paduan AC4B dengan perlakuan pelarutan 500°C selama 30 menit pada kondisi <i>peak-aged</i> , nomor menunjukkan titik pengujian EDX	50
Gambar 4.7	Pengamatan struktur mikro dengan SEM pada paduan AC4B dengan perlakuan pelarutan 500°C selama 120 menit pada kondisi <i>peak-aged</i> , nomor menunjukkan titik pengujian EDX.....	51
Gambar 4.8	Pengaruh waktu tahan terhadap respon pengerasan penuaan paduan AC4B dengan penambahan 0.108 wt % Ti dan 0.02 wt % Sr pada temperatur perlakuan pelarutan (a) 480 °C, (b) 500 °C, dan (c) 520 °C.....	56
Gambar 4.9	Pengaruh temperatur perlakuan pelarutan pada respon pengerasan penuaan pada paduan AC4B dengan penambahan 0.108 wt % Ti dan 0.02 wt % Sr pada waktu tahan (a) 30 menit dan (b) 120 menit.....	57
Gambar 4.10	Evolusi struktur mikro paduan aluminium AC4B dengan kandungan 0.108 wt % Ti dan 0.02 wt % Sr temperatur perlakuan pelarutan: (a-c)480 °C, (d-f) 500 °C, dan (g-i) 520 °C selama 30 menit.....	60
Gambar 4.11	Evolusi struktur mikro paduan aluminium AC4B dengan kandungan 0.108 wt % Ti dan 0.02 wt % Sr temperatur perlakuan pelarutan: (a-c)480 °C, (d-f) 500 °C, dan (g-i) 520 °C selama 120 menit.....	61
Gambar 4.12	Pengamatan struktur mikro dengan SEM pada paduan AC4B dengan penambahan 0.108 wt.% Ti dan 0.02 wt.% Sr dengan perlakuan pelarutan 500°C selama 30 menit pada kondisi <i>peak-aged</i> , nomor menunjukkan titik pengujian EDX.....	62
Gambar 4.13	Pengamatan struktur mikro dengan SEM pada paduan AC4B dengan penambahan 0.108 wt.% Ti dan 0.02 wt.% Sr dengan perlakuan pelarutan 500°C selama 120 menit pada kondisi <i>peak-aged</i> , nomor menunjukkan titik pengujian EDX	64
Gambar 4.14	Perbandingan kurva pengerasan penuaan paduan AC4B (sampel a) dan paduan AC4B dengan komposisi 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt.% Sr (sampel b) pada perlakuan pelarutan temperatur (a) 480°C, (b) 500°C, dan (c) 520°C, dengan waktu tahan pelarutan selama 30 menit dan 120 menit	67
Gambar 4.15	Perbandingan kekerasan puncak pada temperatur pelarutan 480oC, 500oC, dan 520oC dengan waktu tahan selama 30 menit dan 120 menit antara paduan AC4B normal (sampel A) dan	

	paduan AC4B dengan penambahan 0.108 wt.% Ti dan 0.02 wt.% Sr (sampel B)	68
Gambar 4.16	Perbandingan lama waktu penuaan untuk mendapatkan kekerasan puncak pada temperatur perlakuan pelarutan 480°C, 500°C, dan 520°C dan waktu tahan pelarutan selama 30 menit dan 120 menit antara paduan AC4B normal dan paduan AC4B dengan penambahan 0.108 wt.% Ti dan 0.02 wt.% Sr	69



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Penamaan paduan aluminium <i>as-cast</i> menurut standar AA.....	7
Tabel 2.2	Komposisi kimia paduan AC4B berdasarkan <i>Japan Industrial Standar</i>	10
Tabel 2.3	Karakteristik paduan aluminium AC4B	10
Tabel 2.4	Teori-teori mengenai mekanisme penghalusan butir	18
Tabel 2.5	Ukuran dan jarak <i>twinning</i> pada kondisi <i>modified</i>	21
Tabel 4.1	Hasil pengujian komposisi paduan aluminium AC4B dengan komposisi 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr dibandingkan dengan standar QA AHM dan <i>Aluminium Association</i> (AA).....	40
Tabel 4.2	Komposisi hasil analisis titik SEM / EDAX pada Gambar 4.6...50	
Tabel 4.3	Komposisi hasil analisis titik SEM / EDAX pada Gambar 4.7...52	
Tabel 4.4	Komposisi hasil analisis titik SEM / EDAX pada Gambar 4.12	63
Tabel 4.5	Komposisi hasil analisis titik SEM / EDAX pada Gambar 4.13	65

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Penelitian

Pada awal tahun 2000 hingga kini, perdagangan sektor otomotif mulai dari penjualan motor hingga mobil mengalami peningkatan yang sangat tajam^[1]. Untuk mempertahankan peningkatan tersebut, dibutuhkan pula peningkatan kualitas komponen dari motor atau mobil itu sendiri. Salah satu komponen yang penting pada motor adalah bagian *cylinder head* yang memiliki bahan dasar aluminium. Penggunaan aluminium pada pembuatan *cylinder head* didasari pada kelebihan dari aluminium itu sendiri, seperti ketahanan terhadap korosi yang sangat baik jauh lebih baik dibandingkan dengan logam baja, dan juga aluminium memiliki berat jenis yang lebih ringan, sekitar sepertiga dari berat jenis baja.

Aluminium paduan yang biasa digunakan pada pembuatan *cylinder head* adalah AC4B (Al-Si-Cu) dalam standar JIS H5202 (*Japan Industrial Standard*) atau setara dengan AA 333.0 as cast berdasarkan standar AA (*Aluminium Association*). Selain pada proses pengecoran komponen *cylinder head*, AC4B juga digunakan pada kipas pendingin, kotak bahan bakar, piston bertekanan udara, dan roda gigi^[2]. Pembuatan *cylinder head* ini menggunakan metode Low Pressure Die Casting (LPDC). Namun pada kenyataannya proses pembuatan *cylinder head* dengan menggunakan metode ini memiliki tingkat kegagalan yang cukup tinggi, sehingga diperlukan penambahan penghalus butir serta penambahan unsur modifikasi untuk meningkatkan kekuatan mekanis dari paduan tersebut^[3]. Penambahan unsur penghalus butir seperti titanium (Ti) pada paduan aluminium adalah sebagai pembentuk inti yang dapat menyebabkan pendinginan menjadi lebih terkontrol dan butir-butir yang dihasilkan menjadi lebih halus. Dengan adanya penghalus butir sifat mekanis paduan aluminium akan menjadi lebih baik. Sedangkan penambahan unsur modifikasi seperti stronsium (Sr) pada paduan aluminium dapat memodifikasi struktur silikon eutektik pada fasa Al-Si dari

bentuk *acicular* menjadi *fibrous* sehingga akan menyebabkan peningkatan terhadap fluiditas, keuletan, ketahanan impact, dan kekuatan tarik^[4].

Selain dengan penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi, untuk meningkatkan kekuatan mekanis dari aluminium paduan AC4B, dapat pula dilakukan dengan proses perlakuan panas. Perlakuan panas yang sesuai dengan paduan aluminium AC4B adalah temper T6^[5]. Proses perlakuan temper T6 diawali dengan perlakuan pelarutan. Pada proses perlakuan pelarutan, dilakukan pemanasan pada aluminium paduan. Proses pemanasan pada temperatur tertentu ini bertujuan melarutkan semua fasa yang terbentuk dan menghasilkan satu fasa α . Kegunaan dari perlakuan pelarutan ini adalah untuk menentukan kesempurnaan pelarutan dan dilakukan pada temperatur dan waktu tahan yang tepat^[6]. Selanjutnya setelah perlakuan pelarutan, dilakukan proses penuaan dengan temperatur penuaan tertentu dan waktu tahan penuaan tertentu. Pada proses ini akan menghasilkan endapan. Endapan tersebut yang nantinya berfungsi untuk menghambat pergerakan dislokasi^[3]. Endapan yang tumbuh dikendalikan oleh migrasi atom-atom dalam paduan, sehingga meningkatnya endapan terjadi karena seiring dengan lamanya waktu penuaan dan temperatur dalam proses penuaan. Jika pada temperatur tertentu dilakukan proses penuaan yang lama maka akan terjadi pengerasan endapan. Semakin besar kekuatan endapan maka semakin sulit dislokasi untuk melewati sehingga pergerakan dislokasi pun menjadi terhambat. Karena pergerakan dislokasi yang terhambat, maka terjadi penumpukan dislokasi dan dapat meningkatkan nilai kekerasan pada aluminium paduan tersebut. Penambahan unsur stronsium pada paduan Al-Si-Cu yang mengalami perlakuan panas adalah untuk mempersingkat waktu tahan perlakuan pelarutan untuk mencapai keseragaman dan meningkatkan sifat mekanik^[7]. Sedangkan dengan penambahan unsur titanium akan meningkatkan kekerasan setelah dilakukan perlakuan panas^[4].

Pada penelitian ini akan dilakukan pengamatan terhadap pengaruh perlakuan pelarutan terhadap proses pengerasan penuaan dan juga pengaruh kelarutan Sr dan Ti pada paduan aluminium AC4B. Sehingga dapat diketahui pengaruh waktu tahan pelarutan serta temperatur pelarutan pada proses pengerasan penuaan paduan aluminium AC4B. Proses perlakuan pelarutan

dilakukan dengan pengamatan dengan menggunakan parameter temperatur pelarutan 480°C, 500°C, dan 520°C dengan waktu tahan pelarutan selama, 30 menit dan 120 menit. Sedangkan proses *artificial ageing* dilakukan pada temperatur 200°C dengan waktu tahan sampai 96 jam, dimana pada waktu tertentu akan dilakukan pengamatan mikro struktur serta kekerasannya.

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk :

- 1) Mempelajari pengaruh temperatur laku pelarutan pada paduan aluminium AC4B dengan penambahan unsur 0.02 wt. % Sr dan 0.108 wt. % Ti.
- 2) Mempelajari pengaruh waktu tahan pada proses perlakuan pelarutan pada paduan aluminium AC4B dengan penambahan unsur 0.02 wt. % Sr dan 0.108 wt. % Ti.
- 3) Mempelajari pengaruh peran Sr dan Ti pada proses laku pelarutan paduan aluminium AC4B.
- 4) Mempelajari mekanisme penguatan dari paduan aluminium AC4B dengan penambahan unsur 0.02 wt. % Sr dan 0.108 wt. % Ti.

1.3 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan untuk mengetahui peran penghalus butir titanium dan *modifier* stronsium pada proses laku pelarutan sebagai bagian dari proses T6 pada aluminium AC4B dalam proses pembentukan endapan.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

1.4.1. Material Penelitian

- 1) Material yang digunakan adalah paduan aluminium tuang AC4B dengan penambahan unsur 0.02 wt. % Sr dan 0.108 wt. % Ti.

1.4.2. Parameter Penelitian

- 1) Variabel temperatur perlakuan pelarutan : 480°C, 500°C, dan 520°C
- 2) Variabel waktu tahan perlakuan pelarutan : 30 menit dan 120 menit

1.4.3. Tempat Penelitian

- 1) Pengujian komposisi di Laboratorium Metalografi dan HST Departemen Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia.
- 2) Pengamatan respon terhadap pengerasan penuaan di Laboratorium Metalografi dan HST Departemen Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia.
- 3) Pengujian kekerasan untuk variabel temperatur perlakuan pelarutan 480°C dan 500°C , di Laboratorium Metalurgi Fisik Departemen Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia.
- 4) Pengujian kekerasan untuk variabel temperatur perlakuan pelarutan 520°C di Laboratorium divisi MDEV PT. AHM Sunter.
- 5) Pengamatan struktur mikro dilakukan di Laboratorium Metalografi dan HST Departemen Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia.
- 6) Analisa struktur mikro dengan menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*) dilakukan di Laboratorium SEM Departemen Metalurgi dan Material Universitas Indonesia.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Paduan Aluminium Tuang

Setiap proses pengecoran dilakukan dengan menggunakan paduan aluminium tuang. Hal ini dikarenakan aluminium murni merupakan logam yang memiliki *castability* yang rendah. Aluminium tuang memiliki komposisi silikon yang lebih tinggi dibandingkan dengan aluminium tempa dimana penambahan silikon akan membuat aluminium memiliki karakteristik tuang yang lebih baik. Sebagai logam yang sering digunakan dalam proses pengecoran logam, aluminium tuang memiliki karakteristik-karakteristik sebagai berikut^[31]:

1. Aluminium memiliki berat jenis yang relatif rendah dibandingkan dengan berat jenis dari logam lain. Berat jenis aluminium hanya sekitar sepertiga dari berat jenis baja. Berat jenis aluminium 2.35 g/cm^3 sedangkan berat jenis untuk baja adalah sebesar 7.83 g/cm^3 ^[8]. Karena berat jenisnya yang ringan, maka dapat dilakukan untuk proses pengecoran logam untuk benda-benda yang berukuran kecil dan tekanan cetakan yang juga relatif rendah sehingga dapat dipakai peralatan cetakan yang ringan.
2. Temperatur lebur dan temperatur tuang yang relatif rendah bila dibandingkan dengan logam lain (memiliki temperatur lebur sekitar $650\text{-}750^\circ\text{C}$) dan dapat menggunakan peralatan peleburan yang sederhana.
3. Kelarutan gas yang rendah (kecuali terhadap gas hidrogen).
4. Sifat mampu cor yang baik, terutama di dekat komposisi eutektik.
5. Kemampuan permesinan dan penyelesaian permukaan yang baik.
6. Ketahanan terhadap korosi yang sangat baik pada hampir semua kondisi lingkungan dengan membentuk lapisan tipis aluminium oksida (Al_2O_3) yang bersifat pasif dan keras.

7. Konduktivitas panas dan listrik yang baik. Untuk berat yang diberikan, aluminium memiliki konduktivitas listrik yang paling tinggi pada temperatur tertentu dibandingkan dengan elemen lain. Konduktivitas listrik dari berat spesifik aluminium jika dihitung nilainya didapatkan sekitar dua kali lebih besar dari unsur tembaga. Hal ini yang mendasari bahwa ternyata aluminium digunakan secara ekstensif untuk beberapa bagian atas kabel listrik.
8. Terdapat cukup banyak paduan aluminium tuang yang relatif bebas dari kecenderungan retak pada temperatur tinggi yang dapat disebabkan oleh peristiwa mulur pada material.
9. Aluminium pada temperatur rendah tidak mengalami fenomena transisi ulet ke rapuh, yaitu perubahan sifat mekanis logam dari bersifat lunak menjadi getas pada temperatur rendah (temperatur transisi). Oleh karena itu, aluminium dapat digunakan pada kondisi temperatur rendah sekalipun.
10. Memiliki kekuatan yang cukup baik sebanding dengan rasio berat.

Selain memiliki kelebihan, paduan aluminium tuang juga memiliki beberapa kelemahan yang diantaranya adalah^[9] :

1. Berat jenis yang rendah, sehingga mudah tercampur dengan pengotor (*dross*) oksida yang memiliki berat jenis yang hampir sama dengan berat jenis paduan aluminium tuang tersebut. Misalnya Al_2O_3 yang memiliki berat jenis sebesar 2.1 g/cm^3
2. Sangat mudah mengikat gas hidrogen dalam kondisi cair. Sesuai dengan persamaan berikut ini:

$$3\text{H}_2\text{O} + 2\text{Al} \longrightarrow 6\text{H} + \text{Al}_2\text{O}_3$$
3. Mengalami penyusutan (*shrinkage*) yang cukup tinggi sebesar 3.5% - 8.5%

2.2 Aluminium Beserta Paduannya

Pada umumnya penambahan unsur pada suatu logam paduan bertujuan untuk meningkatkan kekuatan mekanis serta memperbaiki sifat fisik dari logam

paduan tersebut. Begitu juga penambahan unsur paduan pada aluminium bertujuan untuk membentuk suatu paduan dengan sifat tertentu yang lebih baik bila dibandingkan dengan aluminium tersebut dalam keadaan murni. Namun penambahan unsur paduan, selain menguntungkan dapat juga berakibat merugikan, salah satunya adalah terjadinya penurunan konduktifitas aluminium.

Menurut *Aluminium Association* (AA), terdapat berbagai macam penamaan material aluminium^[10]. Penamaan ini dilakukan bertujuan untuk memudahkan penggolongan sifat paduan, karena logam aluminium termasuk jenis logam yang mudah untuk dipadukan, sehingga terdapat banyak sekali jenis paduannya. Tabel 2.2 memuat penamaan paduan aluminium *as-cast* menurut standar AA:

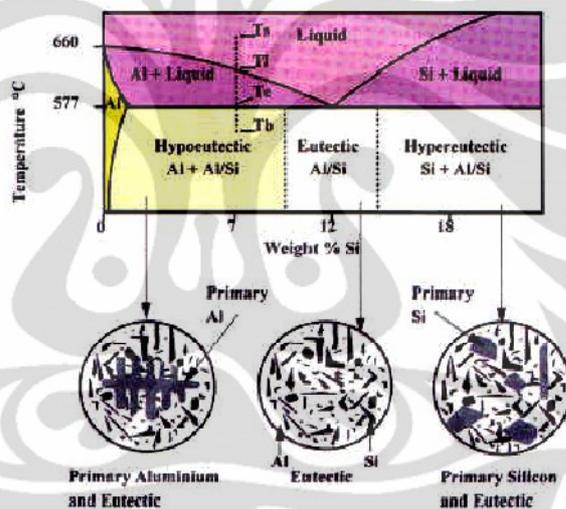
Tabel 2.1 Penamaan paduan aluminium *as-cast* menurut standar AA^[3].

No. Seri	Paduan
1xx.x	Aluminium murni ($\geq 99\%$)
2xx.x	Paduan aluminium - tembaga
3xx.x	Paduan aluminium silikon + tembaga / magnesium
4xx.x	Paduan aluminium silikon
5xx.x	Paduan aluminium magnesium
6xx.x	Tidak dipakai
7xx.x	Paduan aluminium - seng
8xx.x	Paduan aluminium - timah
9xx.x	Paduan aluminium + unsur lain

Pada nomor seri pada penamaan menurut standar AA, terdapat pola xxx.x. Dijit pertama adalah untuk menentukan jenis kelompok paduan aluminium tersebut. Contohnya 1xx.x untuk aluminium murni, 2xx.x untuk paduan aluminium – tembaga, dan seterusnya sampai 9xx.x untuk paduan aluminium dengan unsur lain. Dijit kedua dan ketiga menunjukkan kemurnian minimum untuk aluminium tanpa paduan dan sebagai nomor identifikasi untuk paduan tersebut. Sementara dijit keempat menunjukkan bentuk produk tersebut. Contohnya 0 untuk spesifikasi coran, 1 untuk spesifikasi ingot, dan 2 untuk spesifikasi ingot yang lebih spesifik lagi.

2.3 Paduan Aluminium Silikon

Paduan Aluminium-Silikon merupakan kelas paduan yang cukup penting dalam industri pengecoran aluminium dimana penggunaannya telah meluas untuk berbagai aplikasi seperti untuk komponen otomotif, industri penerbangan serta industri pertahanan karena memiliki karakteristik tuang yang baik. Dari total semua produk manufaktur berbahan aluminium, 90% diantaranya berasal dari paduan aluminium-silikon. Karakteristik dari paduan aluminium-silikon adalah memiliki variasi sifat fisik dan mekanik seperti sifat mampu cor, ketahanan korosi yang sangat baik dan sifat *machinability* yang baik^[11]. Diagram fasa dari paduan aluminium silikon dapat dilihat pada Gambar 2.1 berikut ini.



Gambar 2.1 Diagram fasa Al-Si^[11]

Berdasarkan kandungan silikon yang ada maka paduan aluminium-silikon dibagi menjadi paduan hipoeutektik (kadar Si < 11.7 %), paduan eutektik (Si 11.7-12 %) dan paduan hipereutektik (kadar Si > 12.2 %) dimana struktur utama dari ketiga komposisi ini berupa fasa α -Al yang sangat kaya akan aluminium^[12]. Selain fasa α -Al, terdapat juga fasa β yang merupakan partikel-partikel kristal silikon yang tidak terlarut dalam fasa α -Al. Pada kondisi hipereutektik, fasa tersebut menghasilkan silikon primer yang bentuknya kasar.

Pada rentang komposisi hipoeutektik, kadar silikon < 11.7 %. Pada daerah ini, terjadi pembekuan terjadi melalui fasa cair-padat. Struktur akhir dari

komposisi ini adalah struktur yang kaya aluminium, dan sebagai fasa utamanya adalah fasa α dengan struktur eutektik sebagai struktur tambahan.

Komposisi eutektik merupakan daerah dimana paduan Al-Si dapat membeku secara langsung dari fasa cair ke fasa padatnya. Komposisi eutektik mengandung kadar silikon antara 11.7 % - 12.2 %.

Komposisi hipereutektik didapat ketika paduan mengandung silikon lebih dari 12 %. Pada kondisi ini, silikon menjadi unsur primer.

2.4 Paduan Aluminium AC4B

Paduan Aluminium AC4B merupakan jenis paduan Al-Si-Cu berdasarkan standar JIS yang paduannya utamanya adalah aluminium, silikon dan tembaga. Penggunaannya pada umumnya pada industri otomotif seperti bahan pembuatan *cylinder head*, meskipun untuk pembuatan *cylinder head* itu sendiri juga digunakan paduan aluminium jenis AC2B. Selain paduan aluminium AC4B, paduan lain yang sering digunakan pada industri otomotif adalah^[9] :

- AC2B (Untuk pembuatan *cylinder head* dan *shock breaker*)
- AC8H (*pistons*)
- HD2G (*crankcase, plate oil separate, cylinder com*)

Meskipun sama-sama digunakan pada aplikasi *cylinder head*, namun AC4B lebih banyak digunakan dibandingkan dengan penggunaan AC2B. Hal ini didasari perbedaan unsur penyusunnya. Perbedaan antara AC4B dan AC2B adalah kadar dari silikon untuk AC4B (7.0 - 10.0 %) yang lebih besar daripada AC2B (5.0 – 7.0 %). Perbedaan itu dapat dilihat pada Tabel 2.3 dibawah ini, berikut pula data komposisi kimia untuk aluminium paduan jenis lainnya berdasarkan JIS (*Japan Industrial Standard*), serta dapat dilihat karakteristik dari aluminium paduan AC4B pada Tabel 2.4.

Tabel 2.2 Komposisi kimia paduan AC4B berdasarkan *Japan Industrial Standard*^[13]

Kelas	Simbol	Komposisi Kimia %								
		Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Al
Kelas 1A	AC1A	4.0-5.0	1.2 max	0.3 max	0.3 max	0.5 max	0.3 max	-	0.25max	Sisa
Kelas 2A	AC2A	3.5-4.5	4.0-5.0	0.2 max	0.5 max	0.8 max	0.5 max	-	0.2 max	Sisa
Kelas 2B	AC2B	2.0-4.0	5.0-7.0	0.5 max	1.0 max	1.0 max	0.5 max	0.3 max	0.2 max	Sisa
Kelas 3A	AC3A	0.2 max	10.0-13.0	0.1 max	0.3 max	0.8 max	0.3 max	-	-	Sisa
Kelas 4A	AC4A	0.2 max	8.0-10.0	0.4-0.8	0.2 max	0.5 max	0.3-0.8	-	0.2 max	Sisa
Kelas 4B	AC4B	2.0-4.0	7.0-10.0	0.5 max	1.0 max	1.0 max	0.5 max	0.3 max	0.2 max	Sisa
Kelas 4C	AC4C	0.2 max	6.5-7.5	0.2-0.4	0.3 max	0.5 max	0.5 max	-	0.2 max	Sisa
Kelas 4D	AC4D	1.0-1.5	4.5-5.5	0.4-0.6	0.3 max	0.6 max	0.5 max	-	0.2 max	Sisa
Kelas 5A	AC5A	3.5-4.5	0.6 max	1.2-1.8	0.1 max	0.8 max	0.5 max	1.2-2.3	0.2 max	Sisa
Kelas 7A	AC7A	0.1 max	0.3 max	3.5-5.5	0.1 max	0.4 max	0.6 max	-	0.2 max	Sisa
Kelas 7B	AC7B	0.1 max	0.3 max	9.5-11.0	0.1 max	0.4 max	0.1 max	-	0.2 max	sisa
Kelas 8A	AC8A	8.0-1.3	11.0-13.0	0.7-1.3	0.1 max	0.8 max	0.1 max	1.0-2.5	0.2 max	sisa
Kelas 8B	AC8B	2.0-4.0	8.5-10.5	0.5-1.5	0.5 max	1.0 max	0.5 max	0.5-1.5	0.2 max	sisa
Kelas 8C	AC8C	2.0-4.0	8.5-10.6	0.5-1.5	0.5 max	1.0 max	0.5 max	-	0.2 max	sisa

Tabel 2.3 Karakteristik paduan aluminium AC4B^[14].

Karakteristik	Nilai	Satuan
Kekuatan Tarik	≥ 193	MPa
Kekerasan	65 – 100	HB
Modulus Elastisitas	73000	MPa
Modulus Geser	27400	MPa
Kekuatan Geser	119	MPa
Titik Lebur	516 – 585	°C
Konduktivitas Panas	105	W/m-K
Difusi Panas	389	J/g

2.5 Pengaruh Unsur pada Paduan Aluminium Tuang

Unsur paduan utama yang terdapat pada aluminium memiliki pengaruh terhadap karakteristik dan sifat mekanis aluminium. Unsur paduan utama yang terdapat pada paduan aluminium diantaranya adalah Si, Cu, Mg, Fe, Mn, Zn, Sn, Cr, Sr, dan Ti.

1. Silikon (Si)

Pada aluminium murni penambahan silikon akan dapat meningkatkan mampu alir (fluiditas) dan ketahanan terhadap hot tear pada hasil cor. Penambahan unsur Si dari 0.5 sampai 4 wt% akan mengurangi kecenderungan retak (*cracking*). Selain itu penambahan silikon juga akan berdampak terhadap perubahan sifat mekanis. Silikon ini juga memiliki berat jenis yang lebih rendah daripada aluminium sehingga tidak memberikan kontribusi penambahan berat produk. Sifat silikon yang keras digunakan sebagai peningkat kekerasan dan menahan keausan pada aluminium, tetapi kadar paduan yang berlebih dapat menurunkan keuletan.

2. Tembaga (Cu)

Penambahan tembaga pada paduan aluminium cor berfungsi untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasan dalam kondisi as cast ataupun saat perlakuan panas. Namun penambahan tembaga secara umum akan menurunkan ketahanan terhadap korosi homogen. Selain itu tembaga juga dapat menurunkan ketahanan terhadap *hot tear* dan sifat mampu cor (*castability*).

3. Magnesium (Mg)

Magnesium merupakan elemen yang dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan paduan aluminium silikon. Hal tersebut disebabkan karena adanya fasa Mg_2Si yang berfungsi sebagai penguat. Fasa Mg_2Si tersebut memiliki batas kelarutan hingga 0.7 wt% Mg, jika melebihi maka yang terjadi bukannya mekanisme penguatan akan tetapi justru terjadinya pelunakan pada matriks aluminium. Biasanya komposisi paduan aluminium dengan kekuatan tinggi memiliki kandungan magnesium sekitar 0.4-0.7 wt%.

Paduan biner Al-Mg digunakan secara luas dalam aplikasi yang memerlukan hasil akhir permukaan yang halus dan ketahanan korosi serta kombinasi yang baik antara keuletan dan kekuatan. Magnesium meningkatkan kekuatan dengan penguatan solid solution, dan paduan yang mengandung lebih

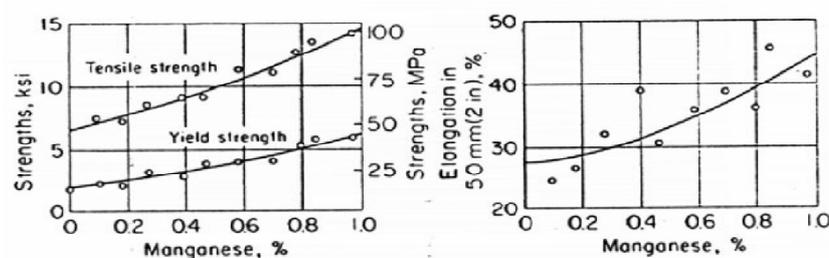
dari 0.7 wt% Mg akan mengalami penguatan presipitasi. Selain itu magnesium juga meningkatkan kemampuan las (*weldability*) dari aluminium cor.

4. Besi (Fe)

Besi merupakan merupakan elemen paduan pada aluminium yang dapat meningkatkan ketahanan *hot tear* dan menurunkan kecenderungan penempelan atau persambungan (efek *soldering*) dengan cetakan pada *die casting*. Unsur besi akan bereaksi membentuk fasa-fasa yang tidak larut (*insoluble*) dalam leburan paduan aluminium, yang pada umumnya berupa FeAl_3 , FeMnAl_6 , dan αAlFeSi . Fasa-fasa yang tidak larut ini berpengaruh pada peningkatan kekuatan, terutama pada kondisi kenaikan temperatur. Unsur yang secara alami adalah pengotor pada aluminium ini pada jumlah kecil akan mengurangi kecenderungan retak panas (*hot cracking*) dalam pengecoran. Namun adanya kadar besi pada paduan yang berlebihan secara substansial akan menurunkan sifat keuletan pada paduan aluminium.

5. Mangan (Mn)

Mangan biasanya dianggap sebagai pengotor dalam komposisi hasil cor. Mangan merupakan elemen penting dalam paduan aluminium tempa (*wrought alloys*) yang bisa di-*work hardened*. Namun mangan tidak memberikan efek yang signifikan pada paduan aluminium tuang yang tidak dapat di-*work hardening*. Dari beberapa bukti yang ada, jumlah MnAl_6 dalam paduan aluminium yang mengandung mangan 0.5 wt% dapat memberikan pengaruh mutu internal hasil coran yang baik. Mangan juga dapat digunakan untuk mengubah respon dalam perlakuan kimia dan *anodizing*.



Gambar 2.2 Pengaruh Mn terhadap kekuatan paduan aluminium^[4]

6. Zinc (Zn)

Seng biasanya hanya memberikan keuntungan berupa peningkatan kerentanan terhadap *stress corrosion cracking* dan *hot cracking*. Maka dari itu paduan aluminium-seng sudah jarang digunakan. Namun apabila ditambahkan elemen lain seperti magnesium dan tembaga maka akan menghasilkan kombinasi sangat tinggi dari *tensile properties* pada paduan aluminium tempa.

7. Timah (Sn)

Timah sangat efektif dalam meningkatkan sifat anti gesek dan umumnya banyak digunakan untuk aplikasi yang memerlukan ketahanan aus. Paduan tuang aluminium biasanya mengandung hingga 25% Sn. Penambahan timah juga dapat meningkatkan sifat mampu mesin (*machinability*).

8. Kromium (Cr)

Kromium memiliki laju difusi yang rendah dan membuat fasa halus yang terdispersi pada produk tempa. Fasa terdispersi ini mencegah nukleasi dan pertumbuhan butir. Kromium digunakan untuk mengontrol struktur butir, untuk menjaga pertumbuhan butir pada paduan aluminium selama proses *heat treatment*.

9. Stronsium (Sr)

Pada paduan aluminium, peran dari stronsium adalah sebagai unsur yang memodifikasi struktur mikro silikon eutektik dari bentuk *acicular* yang kasar menjadi bentuk *fibrous*^[3]. Penambahan unsur stronsium pada kekuatan mekanis adalah meningkatkan ketahanan impact, keuletan, serta kekuatan tarik^[4].

10. Titanium (Ti)

Pada paduan aluminium, peran dari titanium adalah sebagai unsur penghalus butir (*grain refiner*). Kelarutan titanium dalam paduan AC4B dibatasi sampai 0.2 wt% Ti^[13]. Sebagai penghalus butir, biasanya titanium dikombinasikan dengan unsur boron. Umumnya titanium diberikan pada kadar yang lebih dari yang diberikan untuk penghalusan butir. Tujuannya untuk mengurangi kecenderungan terhadap retak panas dan penyusutan panas. Untuk penghalusan butir,

penambahan kadar Ti antara 0.02 wt% sampai dengan 0.15 wt%, atau campuran Ti-B dengan kadar 0.01 wt% sampai 0.03 wt% Ti dan 0.01wt% B^[15]. Titanium juga dapat meningkatkan kekerasan paduan aluminium dengan membentuk presipitat Al₃Ti.

2.6 Pengaruh Penghalus Butir dan Modifikasi pada Aluminium Paduan

Untuk meningkatkan sifat fisik dan sifat mekanis dari aluminium paduan, salah satu caranya adalah dengan melakukan penghalusan butir selama pembekuan. Selama proses pembekuan, aluminium cair membentuk struktur dendrit. Kumpulan dari struktur dendrit-dendrit yang berawal dari nucleus disebut dengan butir. Jarak lengan dendrit (DAS) mempengaruhi nilai dan sifat-sifat mekanis dari paduan aluminium tuang^[15]. Pada butir yang berukuran kecil akan memberikan efek peningkatan kekuatan mekanis sedangkan pada butir yang berukuran besar tidak mengalami peningkatan karena ukuran butir berbanding lurus dengan nilai DAS. Untuk melakukan penghalusan butir perlu ditambahkan unsur-unsur yang berfungsi sebagai penghalus butir (*grain refiner*).

Selain dengan melakukan penghalusan butir, untuk meningkatkan sifat mekanis dan sifat fisik pada aluminium paduan dapat juga dilakukan dengan menambahkan unsur-unsur modifikasi. Proses modifikasi yaitu proses dimana dilakukan penambahan unsur modifikasi tertentu yang dapat merubah struktur mikro eutektik Si dari bentuk *acicular* menjadi bentuk *fibrous*^[3]. Penambahan unsur modifikasi biasanya pada konsentrasi yang kecil yakni antara 0.01-0.02 wt. %^[11]. Pengaruh dari penambahan unsur modifikasi adalah sebagai berikut^[16]:

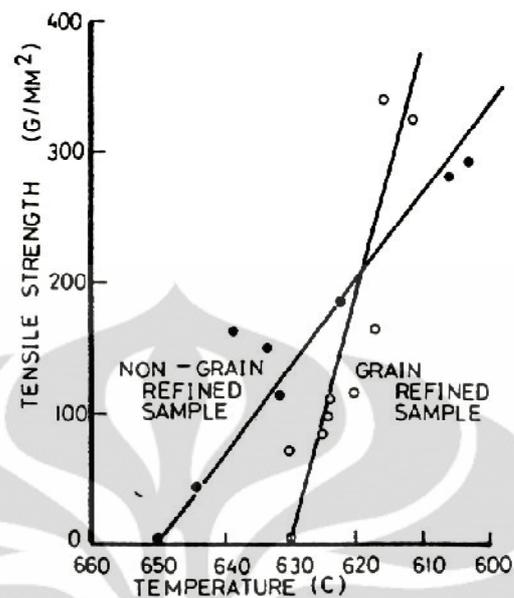
1. Meningkatkan kekuatan tarik dan keuletan
2. Meningkatkan kekuatan impak dan ketangguhan
3. Meningkatkan kekuatan fatik
4. Sifat mampu mesin menjadi lebih baik
5. Kecenderungan retak panas rendah
6. Meningkatkan fluiditas

2.6.1 Pengaruh Penghalus Butir Terhadap Paduan Aluminium Tuang

Paduan aluminium pada umumnya memiliki butir yang kasar saat pembekuan. Untuk itu diperlukan penambahan unsur yang dapat menghaluskan butir yang bertujuan untuk meningkatkan sifat mekanis dan sifat fisik dari paduan aluminium tersebut. Selama proses pembekuan aluminium cair membentuk struktur dendrit. Kumpulan dari dendrit-dendrit tersebut membentuk butir. Tiap dendrit memiliki jarak antar lengan dendrit (*Dendrite Arm Spacing/DAS*) yang mempengaruhi sifat mekanis dan sifat fisik paduan aluminium tuang pada nantinya. Hubungan antara DAS dan sifat mekanis dari paduan aluminium tuang berbanding lurus, semakin besar DAS semakin kurang baik sifat mekanisnya, begitu pula sebaliknya apabila semakin kecil DAS maka sifat mekanis yang dihasilkan lebih baik. Jenis penghalus butir yang biasa digunakan pada paduan aluminium tuang adalah yang mengandung unsur Ti dan B. Biasanya Ti dan B berbentuk senyawa $TiAl_3$ atau TiB_2 . Penambahan unsur penghalus butir Ti berkisar antara 0.02 - 0.15 wt. %, atau campuran Ti dan B dengan komposisi 0.01 – 0.03 wt. % Ti dan 0.01 wt. % B. Pengaruh penambahan penghalus butir pada paduan aluminium tuang adalah sebagai berikut :

1) Sifat mekanis

Sifat mekanis seperti kekuatan tarik dan elongasi akan meningkat seiring dengan ukuran butir yang semakin halus. Semakin halus butir maka semakin banyak batas butir yang akan menghalangi pergerakan dari dislokasi sehingga terjadi mekanisme penguatan yang disebut *grain boundary strengthening*^[16].



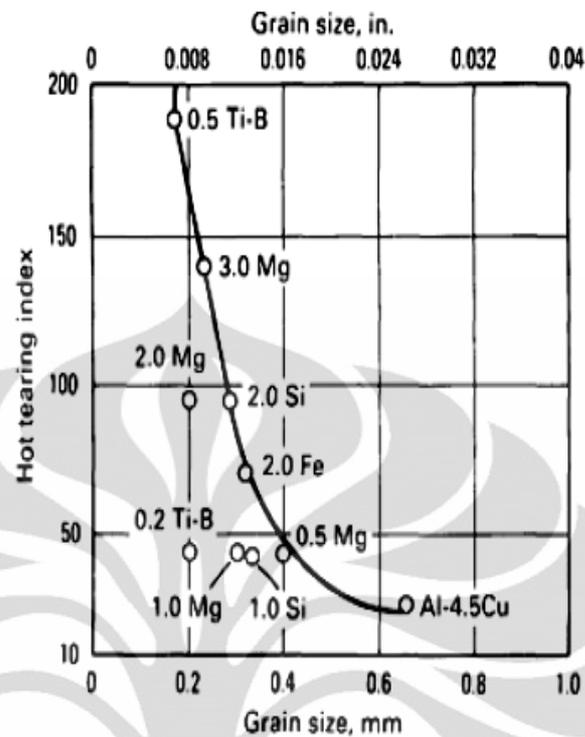
Gambar 2.3. Perbandingan kekuatan tarik pada temperatur tinggi dengan dan tanpa penambahan penghalus butir pada paduan Al-0.5%Mg-0.4%Si^[3]

2) Mengurangi fluiditas

Nukleasi awal yang diakibatkan oleh penambahan penghalus butir menimbulkan nukleus $TiAl_3$ sehingga menyebabkan terjadinya aliran lumpur (padatan dengan cairan) dari saat penuangan, dan karena lumpur dapat menyebabkan aliran logam cair menjadi lebih lambat dari cairan biasa, maka fluiditas dapat berkurang^[3].

3) Menurunkan terjadinya retak panas

Dengan penambahan penghalus butir akan mengurangi kecenderungan untuk terjadinya retak panas. Penghalusan butir akan berakibat setiap butir akan dikelilingi oleh lapisan tipis dari cairan yang menyebabkan turunnya temperatur saat penyusutan solid terjadi, dan juga menurunkan rentang temperatur dimana retak panas mudah terjadi.



Gambar 2.4 Pengaruh besar butir terhadap kecenderungan retak panas pada paduan Al-4.5Cu. Nilai dibawah 50 rentan terhadap retak panas^[12].

4) Kemampuan permesinan

Dengan ukuran butir yang semakin halus, fasa kedua dan porositas terdistribusi secara lebih merata akan meningkatkan kemampuan permesinan dari material^[3].

2.6.2 Mekanisme Penghalusan Butir

Mekanisme penghalusan butir yaitu dengan mempercepat laju nukleasi dan menghambat pertumbuhan kristal sehingga diperoleh butir yang kecil dan banyak. Mekanisme ini berlangsung disebabkan oleh reaksi yang ditimbulkan akibat penginkulasian *nucleating agent* seperti Titanium (Ti) dan Boron (B).

Penghalusan butir merupakan hasil dari dua proses yang terpisah, yaitu pengintian kristal baru dari cairan logam dan selanjutnya pertumbuhan kristal baru sampai ukuran tertentu. Ada beberapa teori mengenai mekanisme pembentukan

inti pada aluminium yang ditambahkan penghalus butir. Teori-teori mengenai penghalus butir secara ringkas dijabarkan pada Tabel 2.5 berikut ini.

Tabel 2.4 Teori-teori mengenai mekanisme penghalusan butir^[18]

Teori	Substrat pengintian
<i>The nucleant Paradigm</i> Teori Borida/ Karbida	terjadi pada borida atau karbida
<i>Phase diagram theories</i> <i>Peritectic hulk</i>	via reaksi peritektik terjadi pada Ti-B
<i>Hypernucleation</i>	via reaksi peritektik pada borida
<i>Duplex nucleation</i>	terjadi pada Al ₃ Ti dimana terbentuk pada permukaan partikel TiB ₂
<i>The solute Paradigm</i> Mekanisme <i>undercooling-driven</i>	borida (atau partikel lain)

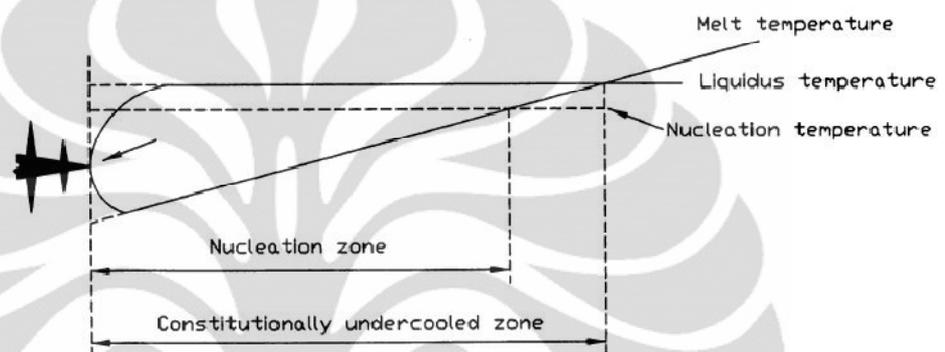
Teori paling terakhir adalah teori paradigma unsur terlarut yang dikemukakan oleh M. Johnsson. Dalam teori paradigma unsur terlarut dikemukakan dua hal penting mengapa elemen sangat penting dalam penghalusan butir, yaitu :

- 1) Unsur-unsur terlarut tersebut mampu membatasi laju dari pertumbuhan butir. Karena laju pertumbuhan butir terbatas sehingga waktu yang dibutuhkan untuk butir tumbuh menjadi lebih lama dan memberikan kesempatan untuk pembentukan inti terjadi, terutama apabila pengintian yang terjadi secara spontan dan tidak terarah. Kemampuan menahan laju pertumbuhan butir itu dinamakan kemampuan segregasi dari elemen ini dihitung melalui besarnya faktor pembatasan pertumbuhan (GRF) selama pembekuan. GRF dapat dihitung dengan menggunakan persamaan^[19]:

$$GRF = m \cdot C_0 \cdot (k-1) \dots\dots (2.1)$$

dimana m adalah kemiringan garis liquidus partikel TiAl₃ yang sebagai tempat pertumbuhan butir aluminium, C_0 adalah konsentrasi unsur terlarut yang terbesar (dalam hal ini adalah Ti), dan k adalah koefisien partisi kesetimbangan antara cairan dan padatan pada daerah antarmuka pertumbuhan butir.

- 2) Terciptanya zona *undercooled* mendatar di depan daerah antarmuka pertumbuhan. Zona *undercooled* mendatar tersebut mengaktifkan partikel pembentuk inti lain di depan daerah antarmuka pertumbuhan butir, sehingga mengganggu pertumbuhan dari butir tersebut sehingga memberikan waktu kepada butir lain untuk tumbuh. Mekanismenya dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Zona *undercooled* mendatar di depan daerah antarmuka pertumbuhan dendrit^[17]

2.6.3 Pengaruh Modifikasi Terhadap Paduan Aluminium Tuang

Unsur modifikasi (*modifier*) merupakan unsur tertentu yang ditambahkan ke dalam paduan logam aluminium silikon dan berfungsi untuk merubah struktur mikro eutektik Si dari bentuk *acicular* menjadi bentuk *fibrous*^[3]. Elemen modifikasi yang berasal dari unsur-unsur golongan IA, IIA dan unsur tanah jarang seperti Stronsium (Sr) dan Sodium (Na) untuk paduan Al-Si hipoeutektik, sedangkan Phospor (P) dan Antimony (Sb) untuk paduan Al-Si hipereutektik^[3]. Efektivitas dari perlakuan modifikasi dapat dilihat dari derajat dan lama waktu undercooling saat proses solidifikasi. Secara umum tujuan dilakukannya modifikasi adalah untuk^[16]:

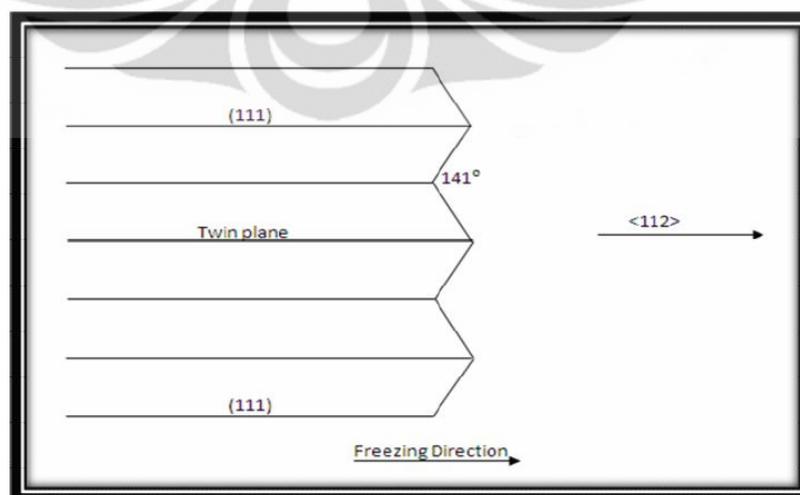
1. Meningkatkan kekuatan tarik dan keuletan.
2. Meningkatkan kekuatan impak dan ketangguhan.
3. Meningkatkan kekuatan fatik.
4. Sifat mampu mesin menjadi lebih baik.

5. Kecenderungan terhadap retak panas rendah.
6. Meningkatkan fluiditas.

2.6.4 Mekanisme Modifikasi

Dalam proses modifikasi, fasa silikon memiliki peranan penting dalam proses modifikasi. Silikon adalah unsur non-logam dan memiliki bentuk Kristal pada paduan aluminium. Kristal silikon hanya memiliki arah kristalografi tertentu dalam pertumbuhannya yaitu arah bidang $\langle 211 \rangle$, dan arah pertumbuhan $\langle 111 \rangle$ ^[3]. Prilaku ini disebut juga prilaku *faceted manner*. Arah bidang dan arah pertumbuhannya dapat dilihat pada Gambar 2.6.

Keunikan lain dari Kristal silikon yaitu mudah membentuk bidang kembar (berpasangan). Struktur silikon yang diperoleh setelah proses modifikasi berbeda dengan sebelum dilakukan proses modifikasi, yang artinya telah terjadi mekanisme pertumbuhan Kristal silikon yang berbeda dibandingkan dengan tanpa proses modifikasi. Pada saat digunakan elemen modifikasi, dihasilkan struktur kristalografi dengan jumlah bidang kembar yang lebih banyak daripada tanpa modifikasi. Keberadaan elemen modifikasi mengganggu tahapan pertumbuhan dari Kristal silikon, ini menyebabkan terjadinya kembaran^[15]. Untuk mengetahui jarak bidang kembar yang dihasilkan oleh setiap elemen modifikasi yang berbeda dapat dilihat pada Tabel 2.5.



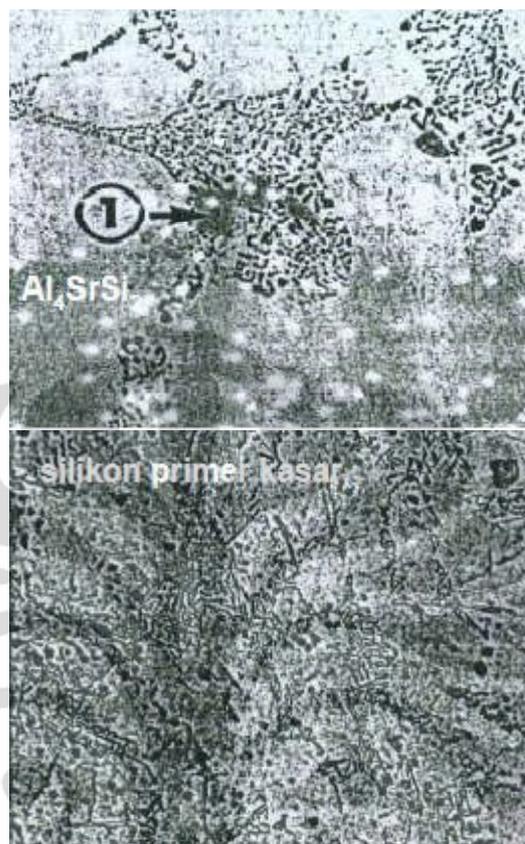
Gambar 2.6 Skema pertumbuhan *acicular* silikon Kristal dari proses pembekuan tanpa modifikasi^[3]

Tabel 2.5 Ukuran dan jarak *twinning* pada kondisi *modified*^[12]

Struktur	Modifier	Jarak kenbaran saat konstanta pembekuan tetap (nm)
Acicular	None	400
Fiber	Na	5
Fiber	Sr	30
Fiber	Ba	30
Fiber	Ca	100
Fiber	Yb	50

Selain mempengaruhi tahapan pertumbuhan Kristal silikon, unsur modifikasi juga menurunkan temperatur nukleasi dan temperatur pertumbuhan dari silikon^[12]. Sebagai Contoh pada penambahan stronsium terjadi penurunan temperatur nukleasi dan temperatur pertumbuhan sekitar 10°C, dan temperatur nukleasi mencapai titik minimum setelah ½ hingga 2 jam, setelah tercapai kondisi modifikasi optimum, grafik solidifikasi menjadi datar. Setelah efek modifikasi memudar (efek pemudaran), temperatur nukleasi dan pertumbuhan kembali naik^[15].

Penambahan unsur modifikasi yang berlebih dapat menurunkan kembali kekuatan mekanis dari paduan aluminium Al-Si^[3]. Peristiwa ini dinamakan *over* modifikasi. Pada peristiwa *over* modifikasi ini yang terjadi adalah struktur Si yang kembali menjadi bentuk jarum yang kasar, dan terbentuknya fasa intermetalik Al₄SrSi₂ sehingga menyebabkan tumbuhnya silikon primer kasar dan saling terhubung yang dapat dilihat pada Gambar 2.7^[19].

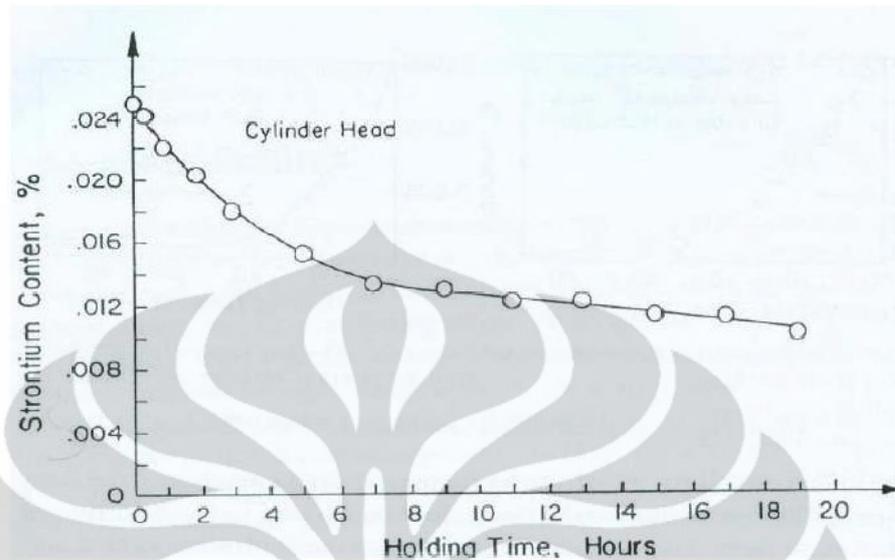


Gambar 2.7 Pengaruh *over* modifikasi terhadap struktur mikro aluminium^[19]

Sebelumnya sempat disinggung tentang efek modifikasi memudar (pemudaran) yaitu menghilangnya efek dari unsur modifikasi secara berkala seiring dengan berjalannya waktu. Pada saat pemudaran efektivitas reaksi antara unsur modifikasi dengan kristal silikon menurun dengan bertambahnya waktu tunggu. Hal ini disebabkan oleh teroksidasinya unsur modifikasi (stronsium) yang menyebabkan kadar stronsium terus berkurang seiring dengan bertambahnya waktu tunggu (lihat Gambar 2.8)^[3].

Setelah mekanisme pemudaran terjadi, unsur modifikasi masih berada di dalam paduan aluminium dalam bentuk persenyawaan dan tidak efektif lagi untuk menjadi unsur modifikasi. Unsur modifikasi yang baik adalah dalam bentuk atom bebas^[15]. Sebab-sebab terjadinya peristiwa pemudaran adalah:

1. Penguapan pada tekanan tinggi saat temperatur lebur
2. Oksidasi karena afinitas yang cukup tinggi terhadap oksigen
3. Bereaksi dengan unsur lain yang reaktif dengan unsur modifikasi



Gambar 2.8 Pengaruh waktu tahan terhadap kadar stronsium pada paduan aluminium-silikon^[3]

2.7 Proses Pengerasan Penuaan

Berbagai jenis perlakuan panas, dapat dilakukan terhadap paduan aluminium. Namun diantara beberapa metode perlakuan panas, metode perlakuan panas yang paling tepat untuk dilakukan pada paduan aluminium tipe AC4B adalah proses perlakuan panas T6. Berikut ini adalah pengklasifikasian aluminium berdasarkan perlakuan panasnya^[20]:

1. Orde F, *as-cast* (digunakan dalam proses pengecoran)
2. Orde O, *annealed*
3. T4, *solution treated and aged*
4. T5, *precipitation hardened*
5. T6, *solution heat treated, quenched, and precipitation hardened*
6. T7, *solution heat treated, quenched, and overaged*

Proses pengerasan penuaan merupakan proses pengerasan (*hardening*) yang memanfaatkan keberadaan endapan, yang terbentuk dari hasil proses perlakuan panas, untuk menjadi penghalang (*obstacle*) dislokasi bergerak pada

suatu paduan. Endapan pada matriks akan tumbuh di ruang kosong. Hal ini menghambat pergerakan dislokasi untuk bergerak. Dibutuhkan energi yang lebih besar dari energi endapan bagi dislokasi untuk dapat melewati endapan tersebut. Sebuah dislokasi dengan energi yang lebih rendah akan terhalang dan mencari ruang kosong lain untuk bergerak, demikian pula dislokasi yang lainnya sehingga akan terjadi penumpukan dislokasi dan pada akhirnya dislokasi tidak mampu lagi untuk bergerak.

Pengerasan yang dihasilkan dari presipitat dipengaruhi oleh jenis partikel yang berpresipitasi, besar rengangan, dan temperatur penuaan^[12]. Pada aluminium paduan, proses pengerasan penuaan akan terjadi dua fasa yaitu fasa matriks dari aluminium dan yang satunya lagi adalah endapan yang terdispersi di dalam matriks aluminium tersebut. Tahapan proses pengerasan penuaan yang dilakukan untuk membentuk endapan pada paduan aluminium adalah dengan proses perlakuan pelarutan (*solution treatment*), pencelupan (*quenching*), dan proses penuaan (*ageing*).

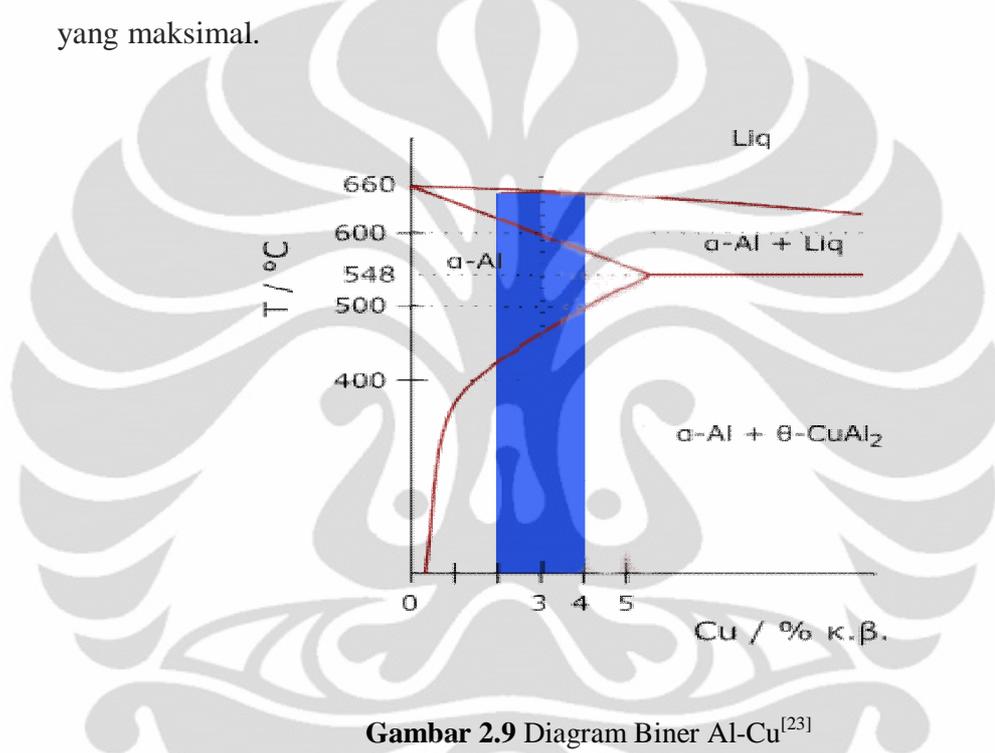
2.7.1 Perlakuan Pelarutan (*Solution Treatment*)

Perlakuan pelarutan adalah proses pemanasan yang dilakukan untuk mendapatkan fasa tunggal pada larutan padat. Pemanasan dilakukan pada temperatur fasa α lalu pemanasan ditahan pada temperatur tersebut. Penahanan temperatur dilakukan untuk membentuk fasa α dari fasa β yang terlarut sempurna^[21]. Pemanasan tersebut untuk membiarkan atom paduan seperti Cu untuk terdistribusi merata pada fasa tunggal.

Tujuan utama dari perlakuan pelarutan adalah memisahkan endapan sehingga menghasilkan paduan yang homogen (*homogenous solution*). Endapan dapat terbentuk dari larutnya unsur-unsur paduan dalam fasa tunggal yang akan tumbuh setelah dilakukan pencelupan dan didiamkan pada waktu tertentu^[22].

Temperatur yang digunakan pada proses perlakuan pelarutan harus tepat, karena setiap paduan memiliki temperatur pelarutan yang berbeda. Temperatur pelarutan pada suatu paduan tergantung pada komposisi paduannya itu sendiri. Untuk dapat mengetahui temperatur yang tepat, dapat dilakukan dengan melihat

diagram biner dari paduan tersebut. Misalkan pada paduan aluminium, untuk mengetahui temperatur pelarutan yang tepat dapat dilihat melalui diagram biner Al-Cu, atau Al-Si. Gambar 2.9 merupakan diagram biner Al-Cu. Berdasarkan diagram tersebut dapat diketahui daerah perbandingan komposisi tembaga pada paduan aluminium dengan temperatur pelarutan yang terjadi fasa tunggal serta yang dua fasa, sehingga dapat diketahui untuk komposisi tembaga yang ada, dibutuhkan temperatur pelarutan yang cocok untuk mendapatkan fasa tunggal yang maksimal.

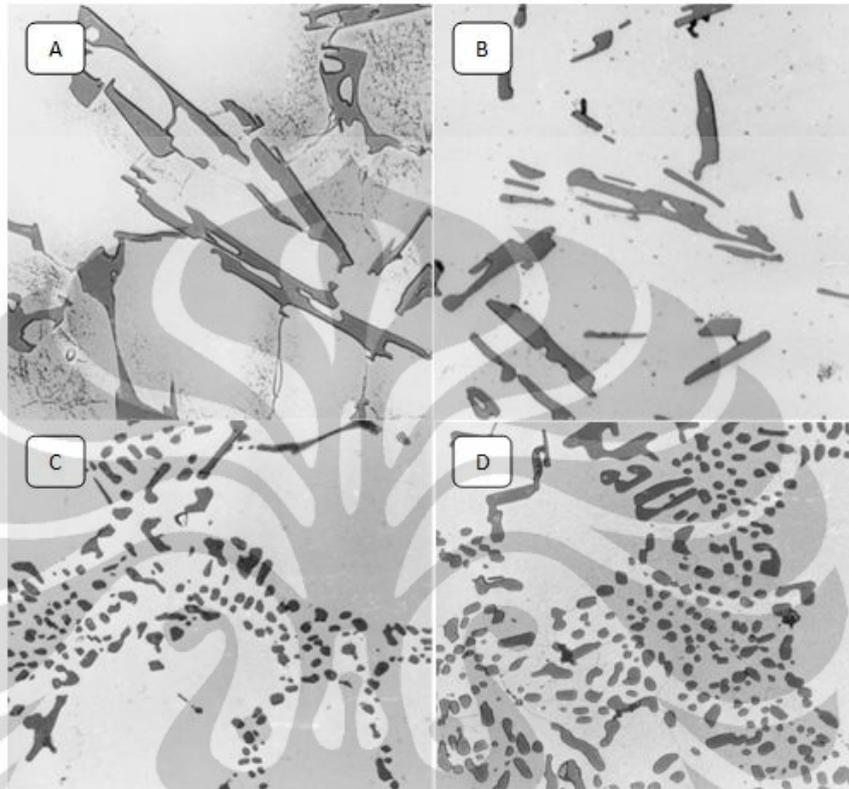


Gambar 2.9 Diagram Biner Al-Cu^[23]

Temperatur harus dijaga agar tidak melewati daerah fasa tunggal α karena dapat terjadi peleburan pada paduan aluminium, dan juga jangan terlalu rendah karena tidak dapat terbentuk homogenitas larutan padat yang maksimal.

Penelitian yang dilakukan oleh Tillova membuktikan bahwa partikel Si eutektik mengalami pembelahan menjadi ukuran yang lebih kecil dan tersebar pada matriks aluminium ketika dilakukan perlakuan pelarutan^[24]. Pada penelitian tersebut dilakukan perlakuan pelarutan pada paduan Al-Si-Cu pada temperatur 505 °C, 515 °C, 525 °C selama 4 jam. Berdasarkan penelitian tersebut, partikel Si eutektik mengalami pembelahan menjadi berukuran yang lebih kecil dan tersebar pada matriks aluminium seiring dengan bertambahnya temperatur pelarutan. Gambar 2.10 menunjukkan struktur mikro dari proses penelitian tersebut. Ketika

waktu tahan perlakuan dilanjutkan menjadi 16 jam, partikel Si yang mengalami pembulatan malah tumbuh menjadi kasar.



Gambar 2.10 Efek perlakuan pelarutan terhadap bentuk morfologi dari partikel Si eutektik, etsa Dix-Keller, (a) sebelum perlakuan pelarutan, (b) 505 °C, selama 4 jam, (c) 515 °C, selama 4 jam, (d) 525 °C, selama 4 jam^[24]

2.7.2 Pencelupan (*Quenching*)

Proses pencelupan dilakukan setelah proses pelarutan dilakukan. Pencelupan dilakukan untuk pendinginan cepat dimana larutan padat yang memiliki fasa α tunggal tidak sempat mengalami difusi. Apabila sempat terjadi difusi maka larutan padat super jenuh yang diinginkan tidak akan terbentuk. Media pendingin yang digunakan banyak jenisnya. Namun untuk penelitian ini digunakan media pendingin yaitu air. Pendinginan cepat dilakukan hingga temperatur larutan padat mencapai temperatur kamar.

Hal lain yang perlu diperhatikan pada proses pencelupan cepat ini adalah terbentuknya tegangan sisa karena perubahan volume pada matriks yang

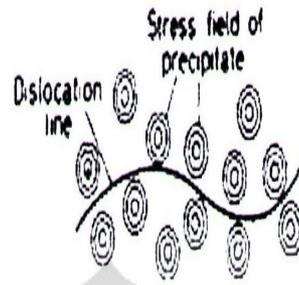
dihasilkan oleh pendinginan cepat. Gaya tarik dari tegangan sisa ini dapat mengakibatkan terjadinya *stress corrosion cracking*.

2.7.3 Proses Penuaan (*Ageing*)

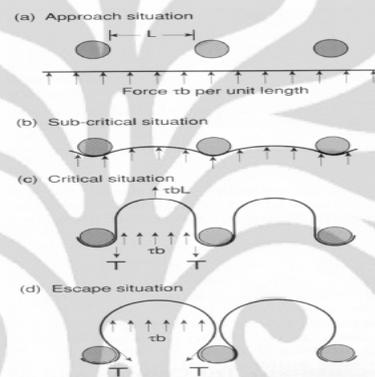
Setelah melakukan proses perlakuan pelarutan dan kemudian dilakukan pencelupan pada temperatur kamar, maka akan terbentuk larutan padat lewat jenuh. Untuk menghasilkan endapan yang diinginkan maka dilakukan proses penuaan. Proses penuaan adalah menahan larutan padat super jenuh pada waktu tertentu dapat dilakukan dalam temperatur kamar (*natural ageing*) atau pada temperatur tertentu (*artificial ageing*). Tujuan dari proses penuaan adalah untuk mendapatkan endapan yang tersebar merata.

Pemanasan dilakukan pada larutan padat lewat jenuh pada temperatur dibawah temperatur kelarutan, agar atom-atom yang terlarut berdifusi pada matriksnya. Pada mulanya, endapan membentuk sekumpulan atom atau *cluster* yang larut pada kisi atom dan membentuk zona yang koheren dengan matriksnya^[25]. Zona yang koheren ini disebut dengan *GP Zone*^[26]. Sifat koheren dari endapan ini dipengaruhi oleh lamanya waktu tahan serta peningkatan temperaturnya. Tahapan perubahannya adalah mulai dari sifat koheren, semi-koheren sampai dengan inkoheren.

Pada endapan yang koheren terjadi renggangan pada struktur Kristal, sehingga dislokasi dapat melewati endapan melalui ruang kosong (*vacancy*) yang tersedia. Ilustrasinya dapat dilihat pada Gambar 2.11. Sedangkan pada endapan semi-koheren, kisi-kisi diisi oleh endapan sehingga menyulitkan dislokasi untuk bergerak, yang pada akhirnya meningkatkan kekerasan paduan. Pada endapan yang bersifat inkoheren, jarak antar endapannya sangat jauh, sehingga dislokasi dapat lebih leluasa bergerak dengan memotong endapan. Gerakan dislokasi yang memotong endapannya ini dikenal dengan *orowan looping*. Ilustrasinya dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.11 Pergerakan dislokasi pada endapan koheren^[25]



Gambar 2.12 Gerakan dislokasi pada endapan inkoheren^[25]

Pada proses penuaan terjadi transformasi dari *GP Zone* membentuk θ'' yang bersifat koheren^[25]. Selanjutnya setelah θ'' dengan penambahan waktu tahan, maka akan terbentuk θ' yang bersifat koheren dan inkoheren. Lalu setelah itu bertransformasi kembali membentuk θ yang bersifat paling stabil yang menghasilkan peningkatan kekerasan pada paduan.

Pada proses penuaan, terdapat tiga kondisi yaitu kondisi *under-aged*, *peak-aged*, dan *over-aged*. Pada kondisi *under-aged* waktu tahan masih sangat singkat sehingga yang terjadi adalah *GP Zone* tidak terbentuk secara sempurna. Sehingga pada kondisi ini kekerasan yang didapat rendah. Pada kondisi *peak-aged*, endapan θ yang stabil terbentuk, sehingga pada kondisi ini kekerasan paduan yang didapat sangat tinggi. Namun apabila waktu tahan yang diberikan berlebihan, maka akan terjadi penuaan yang berlebihan. Kondisi ini disebut dengan *over-aged*. Kekerasan paduan pun kembali menurun, dikarenakan endapan θ tumbuh menjadi

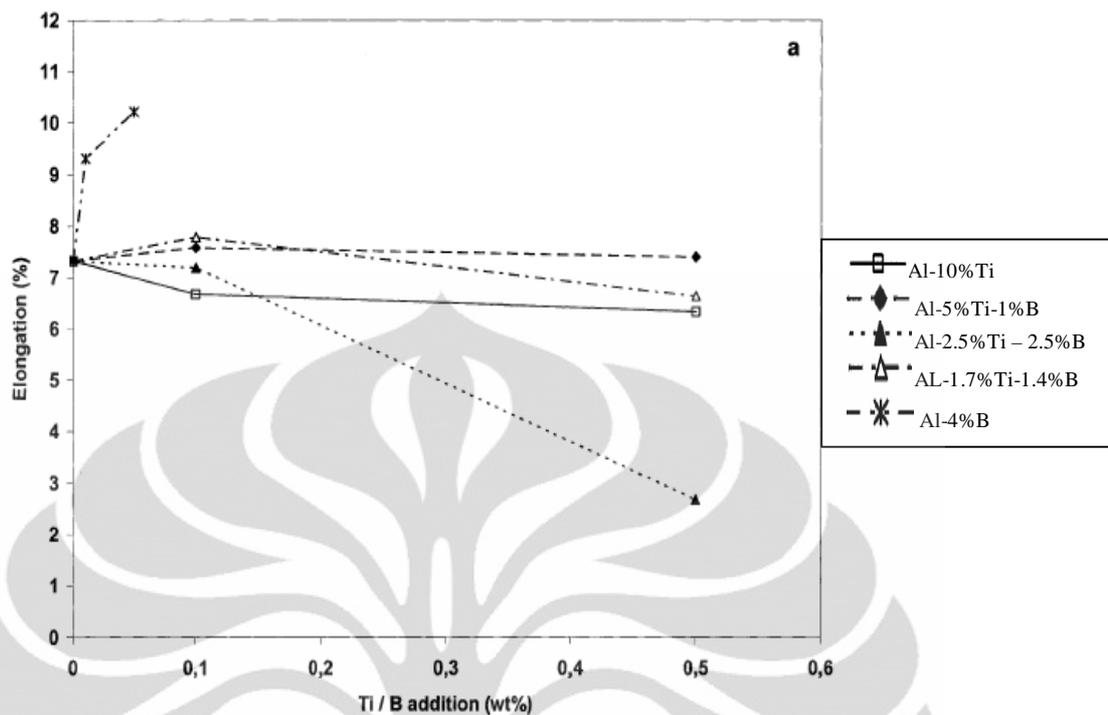
inkoheren. Perubahan menjadi inkoheren ini mengakibatkan jarak antar endapan menjadi jauh, sehingga dislokasi mudah melewati endapan dengan cara memotongnya (*orowan looping*). Selain itu, penurunan kekuatan ini juga disebabkan oleh perbesaran butir dan partikel yang halus terdispersi dalam jumlah banyak dan digantikan oleh partikel yang kasar dengan jumlah yang lebih sedikit yang akan mengakibatkan jarak antar partikel yang lebih besar^[25].

2.8 Pengaruh Titanium dan Stronsium Terhadap perlakuan Panas Paduan Aluminium

2.8.1 Pengaruh Titanium Terhadap Perlakuan Panas pada Paduan Aluminium

Penambahan titanium memiliki pengaruh terhadap perlakuan panas pada paduan aluminium. Penambahan unsur penghalus butir mengakibatkan waktu proses pelarutan yang lebih lama dibandingkan tanpa pemberian unsur penghalus butir^[4]. Waktu proses pelarutan yang lebih lama memberikan kesempatan proses homogenitas yang lebih baik. Salah satu tujuan perlakuan pelarutan adalah memisahkan endapan sehingga menghasilkan paduan yang homogen (*homogenous solution*). Selain itu penambahan unsur titanium pada paduan aluminium pada umumnya meningkatkan kekuatan mekanis pada paduan tersebut. Pada saat pembekuan, paduan aluminium memiliki butir yang kasar, sehingga diperlukan penambahan unsur titanium sebagai penghalus butir.

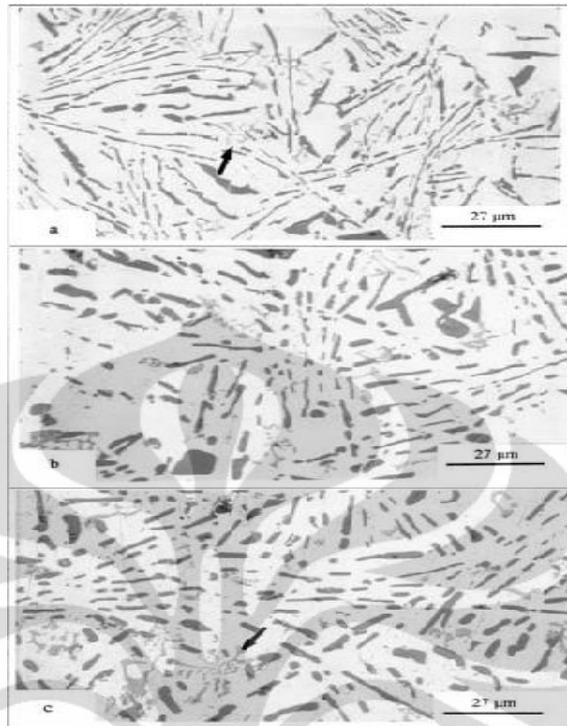
Pada percobaan Benham Golbahar^[4], yang menggunakan paduan aluminium A.356.2 dengan penambahan unsur penghalus sebesar Al-10% Ti dan Al-2.5%Ti-2.5%B menunjukkan penurunan nilai elongasi setelah perlakuan pemanasan T6. Nilai elongasi berbanding terbalik dengan kekerasan, sehingga penurunan nilai elongasi berdampak pada peningkatan kekerasan paduan tersebut. Gambar 2.13 menunjukkan efek penambahan unsur titanium serta perlakuan pemanasan T6 terhadap nilai elongasi paduan tersebut.



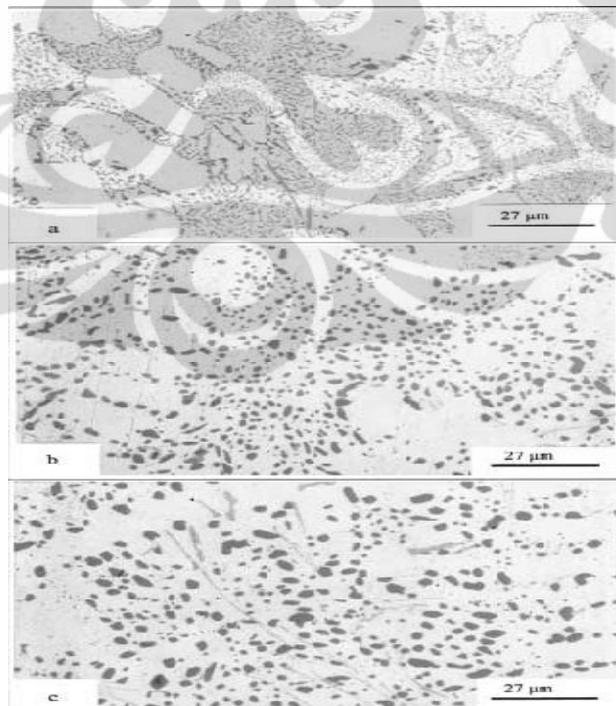
Gambar 2.13 Pengaruh penambahan titanium pada paduan aluminium A.356.2 setelah perlakuan pelarutan terhadap nilai elongasi^[4]

2.8.2 Pengaruh Stronsium Terhadap Perlakuan Panas pada Paduan Aluminium

Penambahan unsur stronsium pada paduan aluminium dapat memberikan peningkatan kekuatan mekanis. Stronsium merupakan unsur *modifier*, penambahannya dapat merubah struktur mikro eutektik Si dari berbentuk *acicular* menjadi berbentuk *fibrous*^[4]. Hal ini juga dibuktikan oleh F. H. Samuel, M.A Moustafa dkk^[7], bahwa terjadi perubahan bentuk struktur mikro dari eutektik Si yang dilakukan perlakuan pelarutan (*solution treatment*) pada temperatur 500°C tanpa ditambahkan unsur modifikasi dibandingkan dengan yang ditambahkan unsur modifikasi. Ketika tidak ditambahkan unsur modifikasi, struktur mikro eutektik Si tampak berbentuk panjang dan kasar, namun pada paduan yang ditambahkan unsur modifikasi bentuknya lebih halus dan berbentuk bulat. Lebih jelas perbandingan tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.14 dan Gambar 2.15.



Gambar 2.14 Struktur mikro Si setelah dilakukan perlakuan pelarutan (*solution treatment*) tanpa ditambahkan unsur modifikasi stronsium pada aluminium A.413.1. (a) waktu pelarutan selama 0 jam (b) 8 jam, (c) 24 jam^[7]



Gambar 2.15 Struktur mikro Si setelah dilakukan perlakuan pelarutan (*solution treatment*) dengan ditambahkan unsur modifikasi stronsium pada aluminium A.413.1. (a) waktu pelarutan selama 0 jam (b) 8 jam, (c) 24 jam^[7]

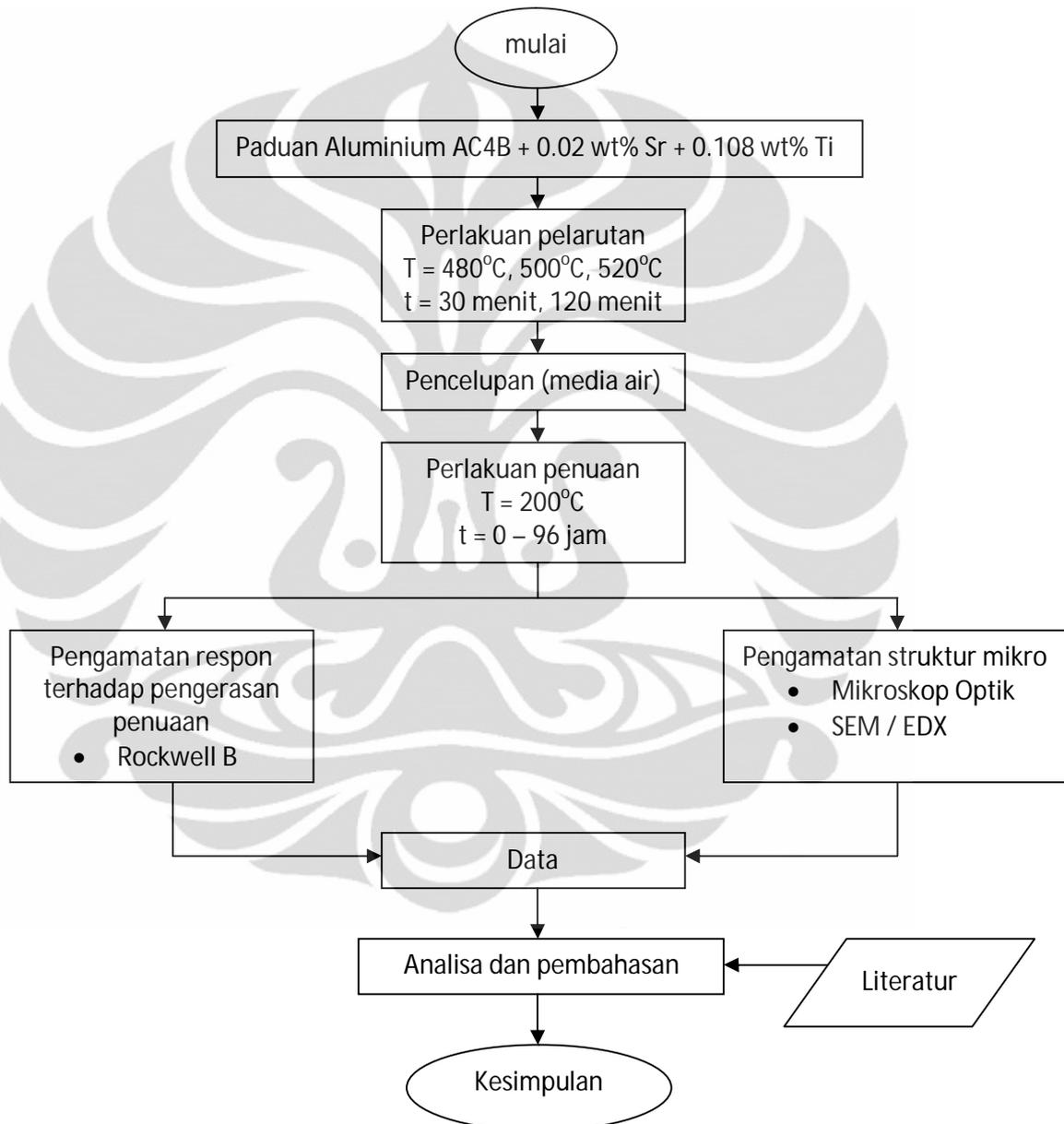
Berdasarkan penelitian F.H Samuel dkk tersebut^[7], dengan penambahan unsur Sr dapat meningkatkan volume fraksi α -Al sehingga pada proses perlakuan akan mempermudah mencapai daerah homogenitas dan proses perlakuan pelarutan akan semakin mudah. Selain itu, pada perlakuan panas penambahan unsur stronsium (Sr) dapat meningkatkan peran dari unsur lain yaitu Zn^[7]. Peran unsur Zn pada paduan aluminium adalah menghindari terjadinya *stress corrosion cracking* akibat adanya tegangan sisa pada saat proses pencelupan (*quenching*).



BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Bahan dan Peralatan

3.2.1 Bahan

Pada penelitian ini menggunakan bahan-bahan :

1. Paduan aluminium AC4B dengan penambahan 0.02 wt. % Sr dan 0.108 % wt. Ti.
2. Air untuk media pencelupan
3. Resin dan *hardener*
4. Kertas amplas *grid* 100 - 1500
5. Kain poles dan beludru
6. Zat poles alumina
7. Zat etsa (Tucker)

3.2.2 Peralatan

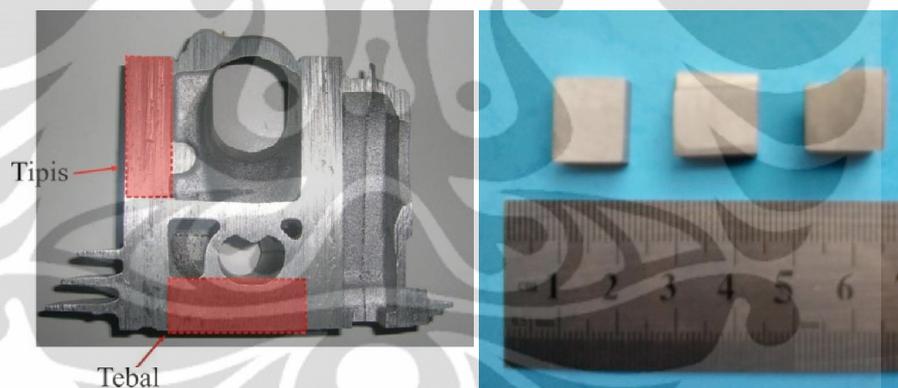
Peralatan yang digunakan untuk proses perlakuan panas pada sampel aluminium AC4B dengan penambahan 0.02 wt. % Sr dan 0.108 % wt. Ti, yaitu:

1. Dapur pemanas tipe *Carbolite* dan *Naberthem*.
2. *Tray*
3. Tang Penjepit
4. Ember (untuk tempat pencelupan).
5. Wadah keramik
6. Mesin potong (gerinda)
7. Mesin amplas *Ecomet*
8. Mesin poles *Ecomet*
9. Alat uji kekerasan type Rockwell B
10. Alat uji *spectometer*
11. Mikroskop optik *Olympus*
12. *Scanning Electron Microscope* (SEM)
13. Lain-lain : spidol, label, sarung tangan, masker

3.3 Persiapan Pengujian

3.3.1 Preparasi Sampel

Sampel yang tersedia memiliki dua tipe, yaitu sampel bagian tipis, dan sampel bagian tebal. Sampel yang akan digunakan nantinya pada pengujian adalah sampel tipe tipis. Sampel tipis yang diperoleh masih berupa batangan. Langkah awal preparasi sampel adalah dengan memotong sampel tersebut sehingga memiliki dimensi 1 cm x 1 cm x 1 cm. Sebenarnya ukuran dimensi sampel bebas, namun karena memperhitungkan keterbatasan sampel yang tersedia, dan juga dengan memperhitungkan besar permukaan yang bias diuji kekerasan, maka sampel di siapkan untuk ukuran dimensi 1 cm x 1 cm x 1 cm. Pemotongan sampel yang masih berbentuk batangan menjadi kecil-kecil dilakukan menggunakan mesin potong gerinda. Daerah pemotongan serta hasil pemotongannya dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 (a)Daerah pemotongan sampel (b) Hasil pemotongan dengan gerinda sampel tipis

Hasil pemotongan menggunakan alat potong gerinda menghasilkan permukaan yang kasar, oleh sebab itu dilakukan penghalusan permukaan sampel dengan menggunakan mesin amplas. Permukaan sampel harus dihaluskan karena untuk dilakukan pengujian kekerasan menggunakan mesin Rockwell, diperlukan dua sisi sampel yang rata dan sejajar. Proses penghalusan permukaan dengan mesin amplas menggunakan mesin amplas merk Ecomet. Mesin amplas serta mesin poles dapat dilihat pada Gambar 3.3. Prosesnya dilakukan di laboratorium HST Departemen Metalurgi dan Material Universitas Indonesia. Kertas amplas

yang digunakan adalah kertas amplas dengan ukuran 400. Penggunaannya berdasarkan efisiensi waktu dan juga memperhatikan material uji yaitu aluminium yang relatif lebih lunak dibandingkan baja. Salah satu dari sampel yang telah di preparasi, selanjutnya dilakukan pengujian komposisi kimia, untuk mengetahui kadar unsur-unsur yang membentuk aluminium AC4B. Sampel yang lainnya selanjutnya diberikan perlakuan panas sesuai dengan perlakuan panas T6.



Gambar 3.3 (a) mesin amplas, (b) mesin poles

3.3.2 Proses Perlakuan Panas

Perlakuan panas yang dilakukan adalah sesuai dengan T6, yaitu proses perlakuan pelarutan, pencelupan, dan penuaan. Proses perlakuan pelarutan dilakukan dengan menggunakan dapur *Carbolyte* pada 2 variabel temperatur dan empat variabel waktu tahan. Perlakuan pelarutan pertama dilakukan pada temperatur 480 °C selama 30 menit dan 120 menit. Perlakuan pelarutan selanjutnya pada temperatur 500 °C dan 520 °C dengan waktu tahan yang sama dengan perlakuan pelarutan pertama. Setelah proses perlakuan pelarutan maka sampel dilakukan pencelupan ke dalam media air dalam wadah plastik yang bawahnya telah diberikan tatakan keramik. Proses pencelupan dilakukan pada media air dengan temperatur air sekitar 20 °C. proses pencelupan dilakukan dengan cepat agar terbentuk larutan padat super jenuh.

Setelah proses pencelupan maka dilakukan proses penuaan pada dapur *Carbolyte* dengan temperatur 200 °C dengan waktu tahan yang variasi sehingga didapatkan kondisi kekerasan *under aged*, *peak aged*, dan *over aged* dimana akan

dilakukan pengujian kekerasan untuk mengetahui kondisi tersebut pada beberapa waktu tahan selama pengujian dengan mengambil sampel pada waktu tertentu untuk mengetahui respon sampel terhadap proses penuaan. Waktu tahan yang dilakukan pada proses penuaan samapai dengan 96 jam dengan pengambilan data pengujian kekerasan pada waktu tertentu agar didapatkan nilai kekerasan sesuai dengan tujuan.

3.3 Proses Pengujian

3.3.1 Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian komposisi dilakukan kembali pada penelitian ini dikarenakan akan berubahnya komposisi setelah dilakukan penelitian sebelumnya. Hal ini dilakukan agar mendapatkan data yang valid dan tidak terlalu bergantung pada data sebelumnya. Pengujian komposisi dilakukan dengan alat spektrometer. Titik penembakan pada alat spektrometer dilakukan sebanyak tiga kali dan diambil nilai rata-ratanya. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui komposisi paduan aluminium AC4B dengan komposisi dari titanium dan stronsium yang ditambahkan. Alat uji komposisi menggunakan *optical emission spectrometer* merk WAS yang ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 *Optical emission spectrometer* merk WAS

3.3.2 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode pengujian kekerasan dengan mesin uji Rockwell B yang ditunjukkan pada Gambar 3.5. Indentor yang digunakan yaitu bola baja berdiameter 1/16 inci dan beban 100 kg. Penjejakan dilakukan dengan lima titik yang berbeda dengan jarak

masing-masing jejak sekitar tiga kali diameter indenter. Nilai kekerasan muncul pada layar mesin ketika penjejakan telah selesai dilakukan.



Gambar 3.5 Alat uji keras tipe Rockwell

3.3.3 Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro dilakukan dengan pengamatan struktur mikro sebelum proses perlakuan panas dan setelah perlakuan panas agar didapatkan perbandingan struktur mikro. Pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik dengan merek Olympus. Pengamatan mikro struktur ini untuk mengetahui pengaruh unsur stronsium dan titanium setelah dilakukan proses perlakuan panas. Pengamatan dilakukan dengan perbesaran yang paling kecil, yaitu $50\times$. Setelah mendapatkan daerah yang bagus, bersih dari goresan, dan mudah diamati perbesaran dilanjutkan ke tingkat perbesaran $100\times$, $200\times$, dan seterusnya hingga didapat mikrostruktur yang dapat dibandingkan. Selain itu pengamatan mikro struktur juga untuk dapat menghitung butir pada kondisi *under aged*, *peak aged*, dan *over aged* pada saat proses penuaan.



Gambar 3.6 Mikroskop optik merek Olympus

3.3.4 Pengujian *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Pengujian SEM dilakukan sebelum perlakuan panas dan setelah perlakuan panas untuk membandingkan kedua proses tersebut. Pengujian ini dilakukan dengan *collector bias* sebesar 400 kV, kontras 40 %, *brightness* 30 %, dan EHT (M) sebesar 12 kV. Tujuan dari dilakukannya SEM adalah untuk mengamati perubahan struktur mikro selama proses perlakuan panas. Selain itu penggunaan SEM untuk menemukan presipitat yang terdapat pada paduan aluminium tersebut.



Gambar 3.7 *Scanning Electron Microscope* (SEM)

BAB 4

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakterisasi Hasil Pengecoran Paduan Aluminium AC4B

4.1.1 Analisis Komposisi Kimia

Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh M. Azi Fallah^[15], didapat data komposisi paduan aluminium AC4B yaitu 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr dibandingkan dengan komposisi QA AHM (berdasarkan JIS) dan standar *Aluminium Association* (AA). Pengujian komposisi dilakukan pada aluminium hasil pengecoran dengan metode *Low Pressure Die Casting* (LPDC). Data tersebut tertera pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil pengujian komposisi paduan aluminium AC4B dengan komposisi 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr dibandingkan dengan standar QA AHM dan *Aluminium Association* (AA)^[15]

Unsur paduan	Komposisi AC4B (wt. %)			
	Normal	0.108 Ti 0.02 Sr	Standar QA AHM	Standar AA 333
Si	9.580	8.849	7.00 - 10.00	8.0 - 10.0
Cu	2.780	2.800	2.00 - 4.00	3.0 - 4.0
Mg	0.261	0.264	0.50 maks	0.05 - 0.50
Fe	0.746	0.812	1.00 maks	1.0 maks
Mn	0.307	0.323	0.50 maks	0.5 maks
Ni	0.068	0.062	0.35 maks	0.5 maks
Ti	0.028	0.108	0.20 maks	0.25 maks
Pb	0.050	0.079	0.20 maks	-
Sn	0.023	0.049	0.10 maks	-
Cr	0.018	0.032	0.20 maks	0.20 maks
Sr	<0.0001	0.020	-	-
Al	Sisa	Sisa	Sisa	Sisa

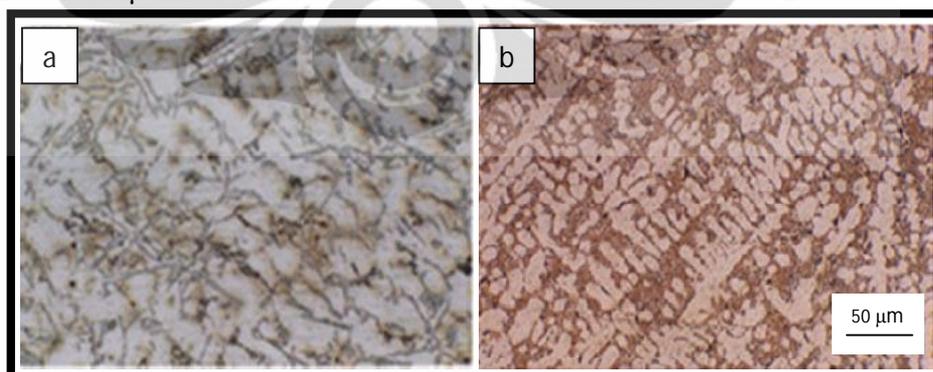
Berdasarkan Tabel 4.1 dapat dilihat bahwa semua paduan yang terdapat pada sampel normal yaitu paduan aluminium AC4B sebelum penambahan unsur Ti dan Sr serta pada sampel paduan AC4B dengan penambahan 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr sesuai dengan standar QA AHM dan juga standar *Aluminium Association* (AA) 333. Komposisi titanium pada paduan AC4B dengan kandungan 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr meningkat sebesar 0.080 dibandingkan dengan AC4B normal. Peningkatan titanium tersebut memiliki

pengaruh pada bentuk butir yang lebih halus dibandingkan dengan AC4B normal. Selain itu peningkatan titanium dapat berpengaruh pada kekuatan mekanis dari paduan, yaitu dapat meningkatkan kekuatan tariknya^[16]. Selain unsur Ti, terdapat unsur-unsur lain yang mengalami peningkatan yaitu Cu, Mg, Fe, Mn, Pb, Sn, dan Cr. Namun peningkatannya tidak terlalu besar sehingga tidak terlalu mempengaruhi kekuatan mekanis pada kedua paduan.

Untuk selanjutnya pada penulisan ini, paduan aluminium AC4B normal dan AC4B dengan kandungan 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr akan disebut masing-masing sebagai sampel A dan sampel B.

4.1.2 Pengamatan Struktur Mikro

Pada struktur mikro pada sampel A maupun sampel B, keduanya memiliki struktur dendritik. Perbandingan struktur mikro dari keduanya dapat dilihat pada Gambar 4.1. Sampel A memiliki DAS (*Dendrit Arm Spacing*) yang lebih besar dibandingkan dengan sampel B. Hal ini dikarenakan pengaruh unsur titanium sebagai penghalus butir pada sampel B. Penghalus butir mempercepat laju nukleasi dan menghambat pertumbuhan kristal sehingga diperoleh butir yang kecil dan banyak. Mekanisme ini berlangsung disebabkan oleh reaksi yang ditimbulkan akibat proses nukleasi *nucleating agent* seperti Titanium^[18]. Struktur mikro untuk sampel A memiliki DAS sebesar 31.16 μm , sedangkan sampel B sebesar 13.39 μm .



Gambar 4.1 Struktur mikro paduan AC4B normal (a) dan AC4B dengan kandungan 0.108 wt.% Ti dan 0.02 wt. % Sr (b), menggunakan etsa Tucker

Hubungan antara DAS dan sifat mekanis dari paduan aluminium tuang berbanding terbalik, semakin besar DAS semakin rendah sifat mekanisnya, begitu pula sebaliknya apabila semakin kecil DAS maka sifat mekanis yang dihasilkan

lebih baik. Salah satu sifat mekanis yang berubah adalah nilai kekerasan. Sampel A memiliki kekerasan sebesar 41.86 HRB, sedangkan sampel B yang ukuran butirnya lebih kecil memiliki kekerasan sebesar 52.48 HRB.

4.2 Pengaruh Temperatur dan Waktu Tahan Perlakuan Pelarutan Terhadap Respon Penuaan Paduan Aluminium AC4B

4.2.1 Kurva Pengerasan Penuaan

Perlakuan pelarutan memiliki pengaruh terhadap pengerasan penuaan. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.2 yang memuat pengaruh perlakuan pelarutan terhadap pengerasan penuaan paduan AC4B dengan tiga variabel temperatur pelarutan yakni 480, 500, dan 520 °C serta waktu pada waktu tahan 30 dan 120 menit. Pengerasan penuaan dilakukan pada temperatur 200 °C selama 96 jam. Dari Gambar 4.2 terlihat kenaikan nilai kekerasan pada setiap perlakuan sampai titik tertentu (*peak-aged*) dan akan turun setelah menyentuh kekerasan puncak. Peningkatan kekerasan selama pengerasan penuaan hingga sampai pada *peak-aged* hingga kemudian terjadi penurunan kekerasan terjadi berbeda-beda pada setiap temperatur perlakuan pelarutan.

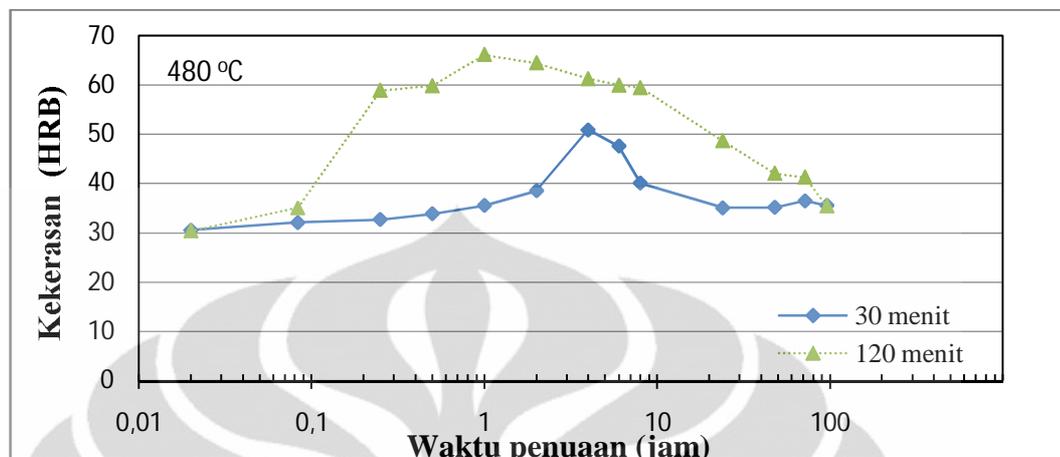
Untuk mengetahui pengaruh waktu tahan terhadap respon pengerasan penuaan pada paduan AC4B normal dengan temperatur pelarutan yang berbeda yaitu pada 480 °C, 500 °C dan 520 °C, dapat dilihat pada Gambar 4.2. Pada temperatur 480 °C terdapat perbedaan kekerasan yang didapat setelah perlakuan penuaan antara waktu tahan 30 menit dan 120 menit. Pada Gambar 4.2 (a) tampak dengan waktu tahan selama 30 menit, nilai kekerasan terus mengalami kenaikan dari 30.56 HRB naik 66.56% menjadi 50.90 HRB. Kekerasan sebesar 50.90 HRB merupakan kekerasan tertinggi yang dicapai pada pengerasan penuaan selama 4 jam. Setelah mencapai titik kekerasan tertinggi kekerasan perlahan turun kembali hingga waktu penuaan 96 jam dengan kekerasan 35.50 HRB. Pada waktu tahan selama 120 menit, nilai kekerasan yang didapat lebih tinggi dibandingkan dengan waktu tahan selama 30 menit. Nilai kekerasan terus mengalami kenaikan dari 30.38 HRB naik 117.57% menjadi 66.1 HRB. Kekerasan sebesar 66.1 HRB merupakan kekerasan tertinggi yang dicapai pada pengerasan penuaan selama 1 jam. Setelah mencapai titik kekerasan tertinggi kekerasan perlahan turun kembali hingga waktu penuaan 96 jam dengan kekerasan 35.40 HRB.

Pada temperatur 500 °C juga terdapat perbedaan kekerasan yang didapat setelah perlakuan penuaan antara waktu tahan 30 menit dan 120 menit. Pada Gambar 4.2 (b) tampak dengan waktu tahan selama 30 menit, nilai kekerasan terus mengalami kenaikan dari 30.16 HRB naik 96.28% menjadi 59.2 HRB. Kekerasan sebesar 59.2 HRB merupakan kekerasan tertinggi yang dicapai pada pengerasaan penuaan selama 8 jam. Setelah mencapai titik kekerasan tertinggi kekerasan perlahan turun kembali hingga waktu penuaan 96 jam dengan kekerasan 44.18 HRB. Pada waktu tahan selama 120 menit, nilai kekerasan terus mengalami kenaikan dari 29.66 HRB naik 97.5% menjadi 58.58 HRB. Kekerasan sebesar 58.58 HRB merupakan kekerasan tertinggi yang dicapai pada pengerasaan penuaan selama 4 jam. Setelah mencapai titik kekerasan tertinggi kekerasan perlahan turun kembali hingga waktu penuaan 96 jam dengan kekerasan 38.12 HRB.

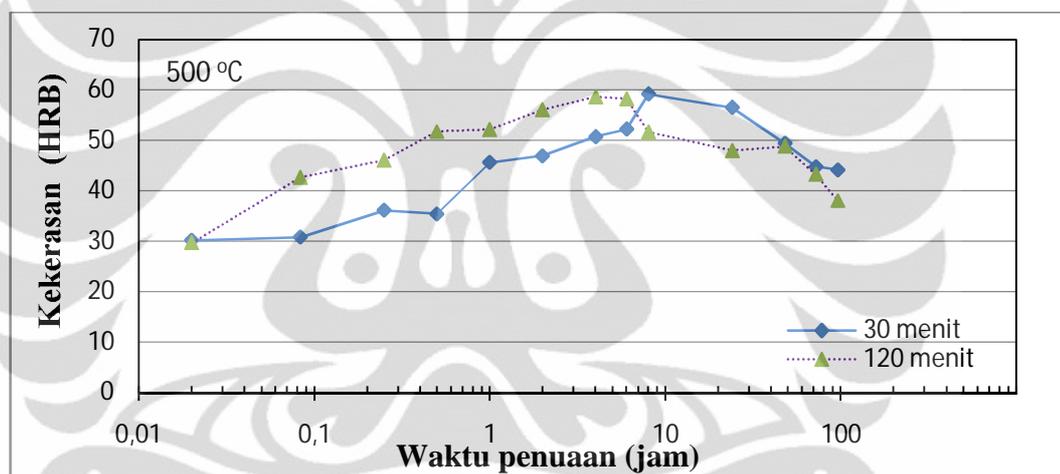
Pada temperatur 520 °C juga terdapat perbedaan kekerasan yang didapat setelah perlakuan penuaan antara waktu tahan 30 menit dan 120 menit. Pada Gambar 4.2 (c) tampak dengan waktu tahan selama 30 menit, nilai kekerasan terus mengalami kenaikan dari 32.16 HRB naik 85.26% menjadi 59.58 HRB. Kekerasan sebesar 59.58 HRB merupakan kekerasan tertinggi yang dicapai pada pengerasaan penuaan selama 30 menit. Setelah mencapai titik kekerasan tertinggi kekerasan perlahan turun kembali hingga waktu penuaan 96 jam dengan kekerasan 38.12 HRB. Pada waktu tahan selama 120 menit, nilai kekerasan terus mengalami kenaikan dari 28.18 HRB naik 111.07% menjadi 59.48 HRB. Kekerasan sebesar 59.48 HRB merupakan kekerasan tertinggi yang dicapai pada pengerasaan penuaan selama 2 jam. Setelah mencapai titik kekerasan tertinggi kekerasan perlahan turun kembali hingga waktu penuaan 96 jam dengan kekerasan 37.17 HRB.

Berdasarkan Gambar 4.2 tersebut dapat disimpulkan bahwa kekerasan puncak pada proses penuaan akan lebih cepat didapat pada perlakuan pelarutan dengan temperatur yang lebih tinggi. Pada temperatur 520 °C kekerasan puncak didapat pada waktu penuaan selama 30 menit untuk waktu tahan 30 menit dan waktu penuaan selama 120 menit untuk waktu tahan 120 menit. Hal ini dikarenakan pada temperatur yang lebih tinggi dapat lebih mudah melarutkan fasa

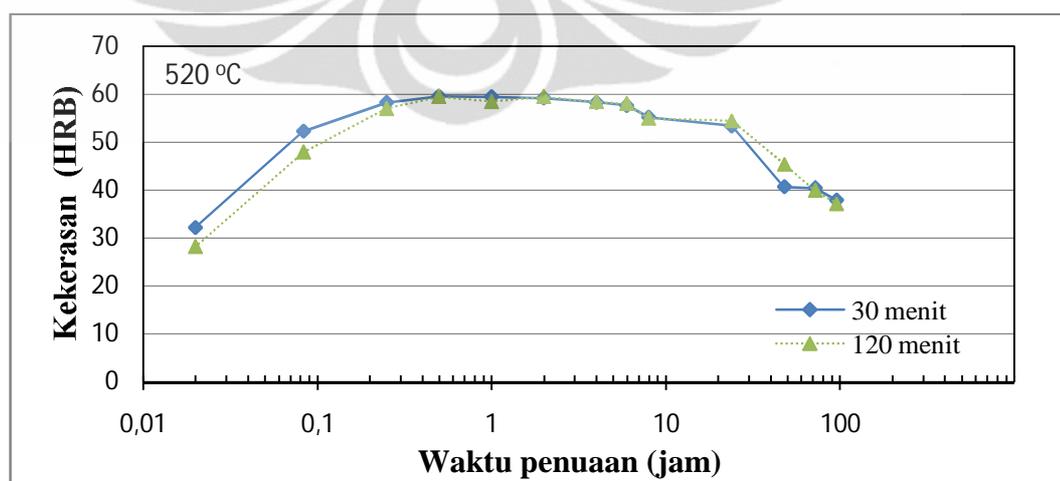
yang kaya akan Cu dalam matriks aluminium^[26]. Fasa kaya Cu yang terlarut ini akan tumbuh menjadi presipitat ketika dilakukan proses penuaan.



(a)

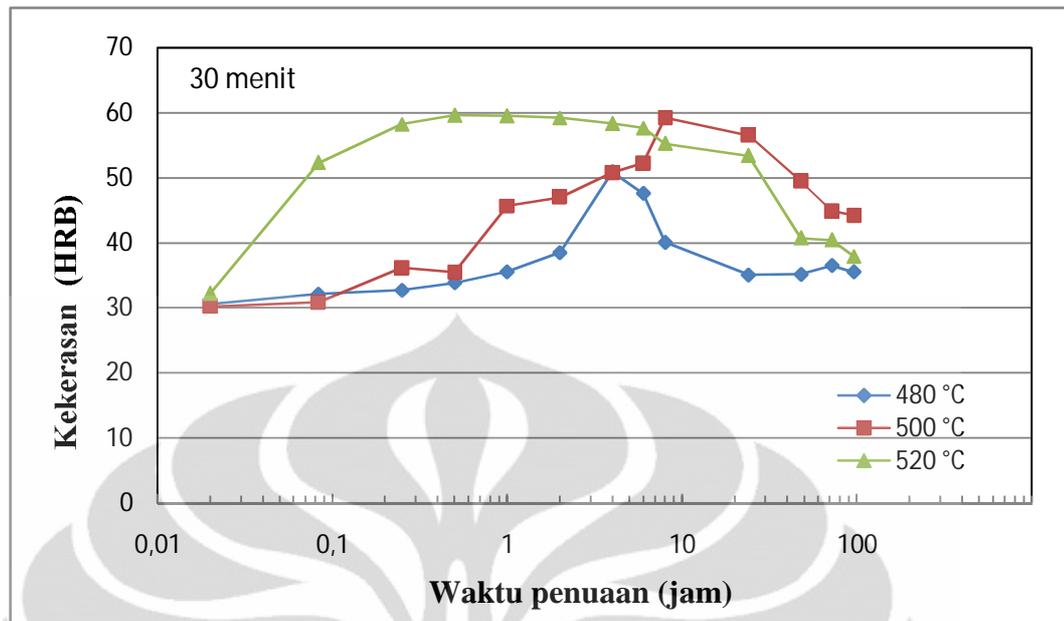


(b)

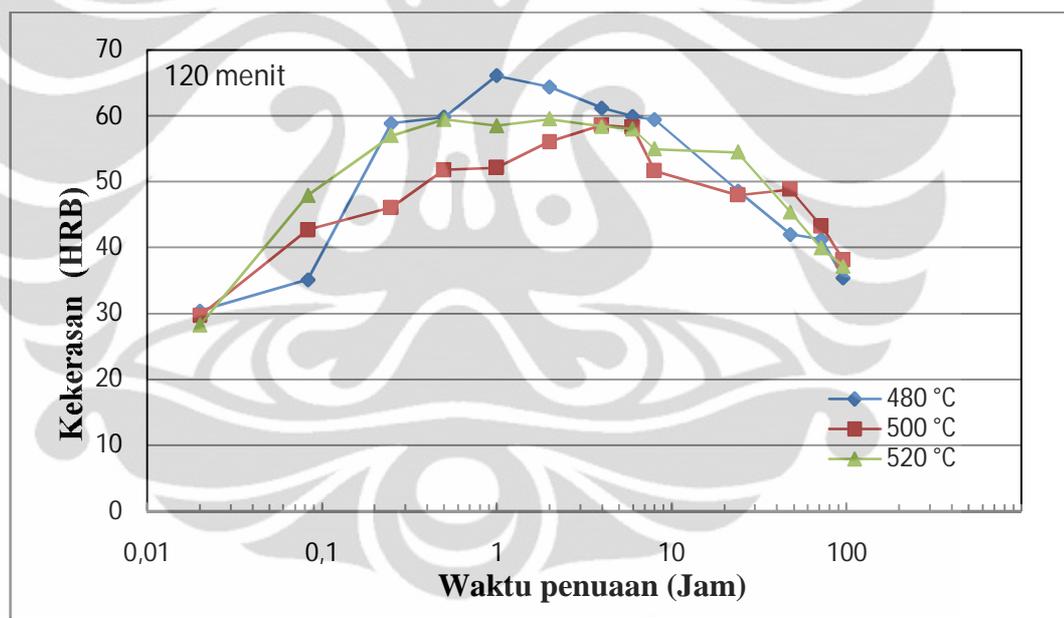


(c)

Gambar 4.2 Pengaruh waktu tahan terhadap respon pengerasan penuaan paduan AC4B dengan temperatur pelarutan (a) 480 °C, (b) 500 °C, dan (c) 520 °C



(a)



(b)

Gambar 4.3 Pengaruh temperatur perlakuan pelarutan pada respon pengerasan penuaan pada paduan AC4B dengan waktu tahan (a) 30 menit dan (b) 120 menit

Gambar 4.3 menunjukkan perbedaan waktu tahan perlakuan pelarutan 30 menit dan 120 menit. Pada Gambar 4.3 (a) dan (b) dapat dilihat pada umumnya peningkatan temperatur pelarutan dapat meningkatkan kekerasan. Hal ini disebabkan oleh semakin tinggi temperatur mengakibatkan semakin banyak *vacancy* yang terbentuk sehingga jumlah presipitat yang terbentukpun semakin banyak. Namun ada sedikit perbedaan pada Gambar 4.3 (b). Pada gambar tersebut

tampak bahwa temperatur pelarutan 480 °C dapat menghasilkan kekerasan yang cukup tinggi disbanding temperatur yang lainnya. Hal ini kemungkinan disebabkan proses *quenching* yang tidak cepat yang dilakukan pada sampel dengan temperatur pelarutan 500 °C dan 520 °C.

4.2.2 Pengamatan Evolusi Struktur Mikro Menggunakan Mikroskop Optik

Pengamatan struktur mikro dilakukan pada paduan AC4B normal pada kondisi *under-aged*, *peak-aged*, dan *over-aged*. Perubahan struktur mikro pada perlakuan pelarutan dengan temperatur 480, 500, dan 520 °C, dan pada waktu tahan selama 30 menit mulai dari kondisi *under-aged*, *peak-aged*, dan *over-aged* dapat dilihat pada Gambar 4.4. Sedangkan untuk perlakuan pelarutan dengan temperatur 480, 500, dan 520 °C, dan pada waktu tahan selama 120 menit mulai dari kondisi *under-aged*, *peak-aged*, dan *over-aged* dapat dilihat pada Gambar 4.5.

Pada temperatur pelarutan 480 °C dan waktu tahan 30 menit, struktur mikro kondisi *under-aged* didapat pada waktu penuaan 15 menit, *peak-aged* pada waktu 6 jam, dan *over-aged* pada 72 jam. Pada temperatur pelarutan 500 °C dan waktu tahan 30 menit, struktur mikro kondisi *under-aged* didapat pada waktu penuaan 30 menit, *peak-aged* pada waktu 8 jam, dan *over-aged* pada 72 jam. Sedangkan pada temperatur pelarutan 520 °C dan waktu tahan 30 menit, struktur mikro kondisi *under-aged* didapat pada waktu penuaan 15 menit, *peak-aged* pada waktu 1 jam, dan *over-aged* pada 24 jam.

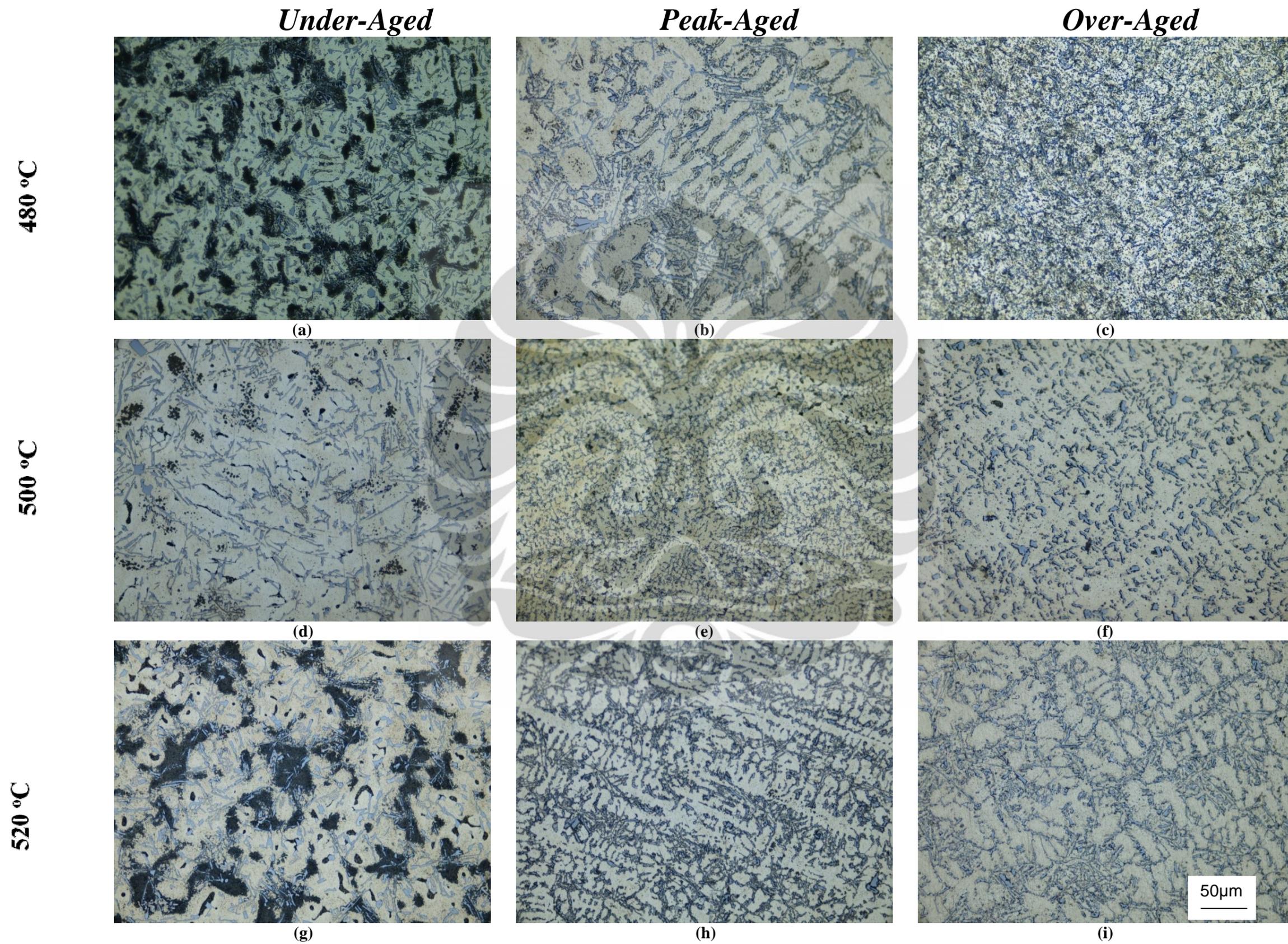
Pada awal proses penuaan struktur dendritik terlihat besar dan fasa-fasa lain (fasa interdendritik) banyak terdapat didalam matriks Al. Fasa-fasa tersebut kemungkinan diantaranya, struktur kristal silikon eutektik, Al-(Fe, Mn)-Si, Al-Fe-Si, Al₂Cu. Pada kondisi *peak-aged* fasa-fasa yang terdapat pada matrik Al berdistribusi pada bagian antar dendrit, fasa-fasa tersebut mengisi rongga-rongga yang terdapat pada antar dendrit Al. Rongga-rongga tersebut kaya akan presipitat. Sedangkan struktur mikro pada kondisi *over-aged* dendrit Al mengalami pemutusan.

Pada temperatur pelarutan 480 °C dan waktu tahan 120 menit, struktur mikro kondisi *under-aged* didapat pada waktu penuaan 15 menit, *peak-aged* pada

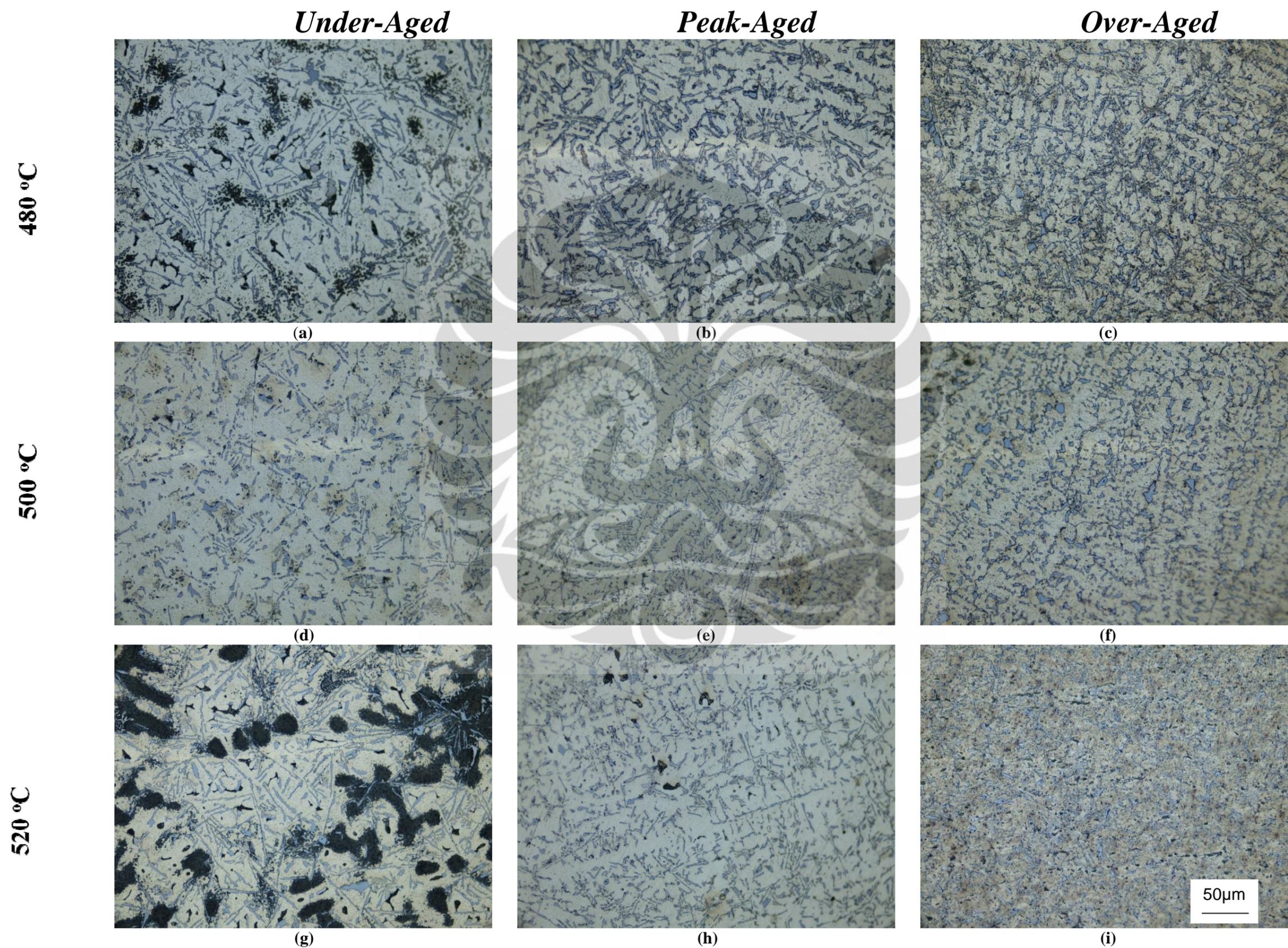
waktu 1 jam, dan *over-aged* pada 72 jam. Pada temperatur pelarutan 500 °C dan waktu tahan 120 menit, struktur mikro kondisi *under-aged* didapat pada waktu penuaan 30 menit, *peak-aged* pada waktu 6 jam, dan *over-aged* pada 72 jam. Sedangkan pada temperatur pelarutan 520 °C dan waktu tahan 120 menit, struktur mikro kondisi *under-aged* didapat pada waktu penuaan 15 menit, *peak-aged* pada waktu 1 jam, dan *over-aged* pada 24 jam.

Pada kedua bentuk struktur mikro dengan waktu tahan 30 menit dan waktu tahan 120 menit, tampak bahwa struktur mikro silikon eutektik terlihat lebih kecil pada waktu tahan 120 menit dibandingkan dengan waktu tahan 30 menit. Pada Gambar 4.4 maupun 4.5 terlihat bahwa semakin lama waktu penuaan mengakibatkan fasa interdendritik semakin menipis. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh kembali berdifusinya paduan pembentuk fasa interdendritik ke matriks Al.

Dari evolusi struktur mikro selama proses penuaan hanya dapat dilakukan perbandingan dari bentuk dendrit pada kondisi *under-aged*, *peak-aged*, dan *over-aged*. Tampak pada saat *peak-aged* pada umumnya jarak lengan dendrit cenderung lebih kecil, yang berarti memiliki kekerasan lebih tinggi dibandingkan dengan yang memiliki jarak lengan dendrit yang lebih besar. Gambar 4.4 dan 4.5 dengan pengambilan menggunakan mikroskop optik tidak dapat menunjukkan adanya presipitat yang dapat membandingkan sifat mekanis dari ketiga kondisi tersebut. Untuk mengetahui presipitat yang terbentuk dan sifat koherensi dari presipitat dapat dilakukan dengan pengamatan menggunakan *Transmission Electron Microscope* (TEM).



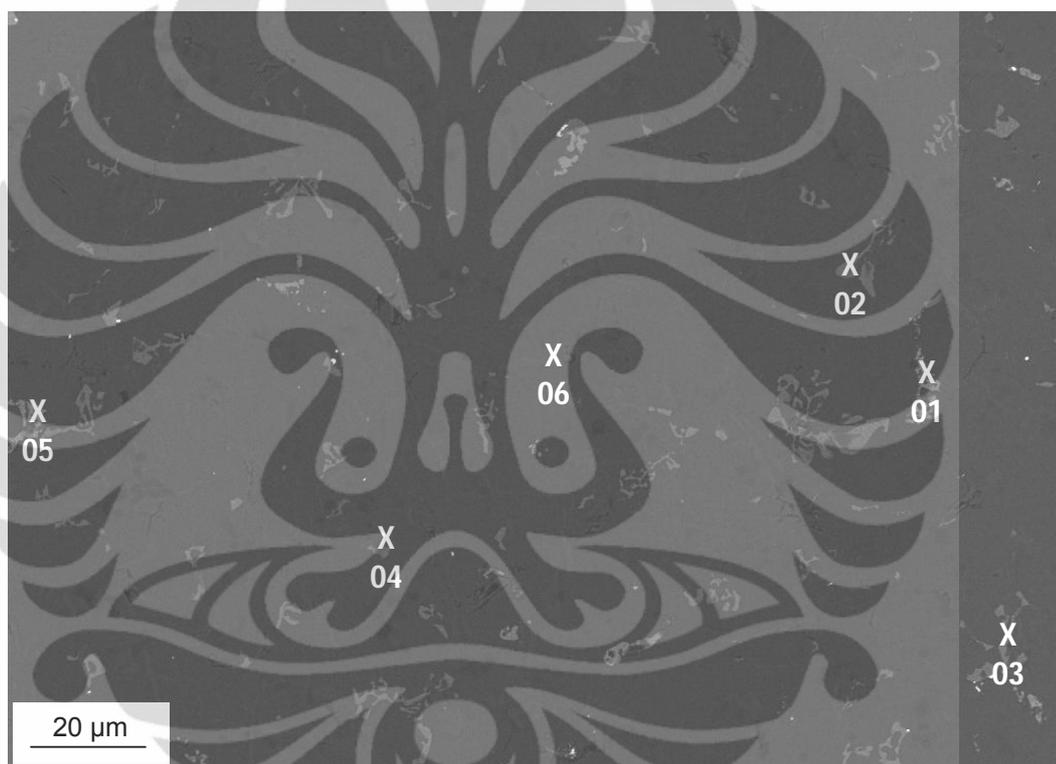
Gambar 4.4 Evolusi struktur mikro paduan aluminium AC4B dengan temperatur perlakuan pelarutan: (a-c) 480 °C, (d-f) 500 °C, dan (g-i) 520 °C selama 30 menit



Gambar 4.5 Evolusi Evolusi struktur mikro paduan aluminium AC4B dengan temperatur perlakuan pelarutan: (a-c) 480 °C, (d-f) 500 °C, dan (g-i) 520 °C selama 120 menit

4.2.3 Observasi Detail Struktur Mikro Menggunakan SEM / EDX

Pengamatan struktur mikro menggunakan SEM / EDX memungkinkan untuk memperkirakan fasa yang terbentuk pada paduan aluminium AC4B normal. Gambar 4.6 menjelaskan hasil pengamatan struktur mikro dengan menggunakan SEM / EDX pada saat kondisi *peak-aged* pada paduan AC4B normal yang diberikan perlakuan pelarutan pada temperatur 500 °C dan waktu tahan 30 menit, serta Tabel 4.2 yang menjelaskan komposisi hasil analisa titik SEM / EDAX pada Gambar 4.6 tersebut.

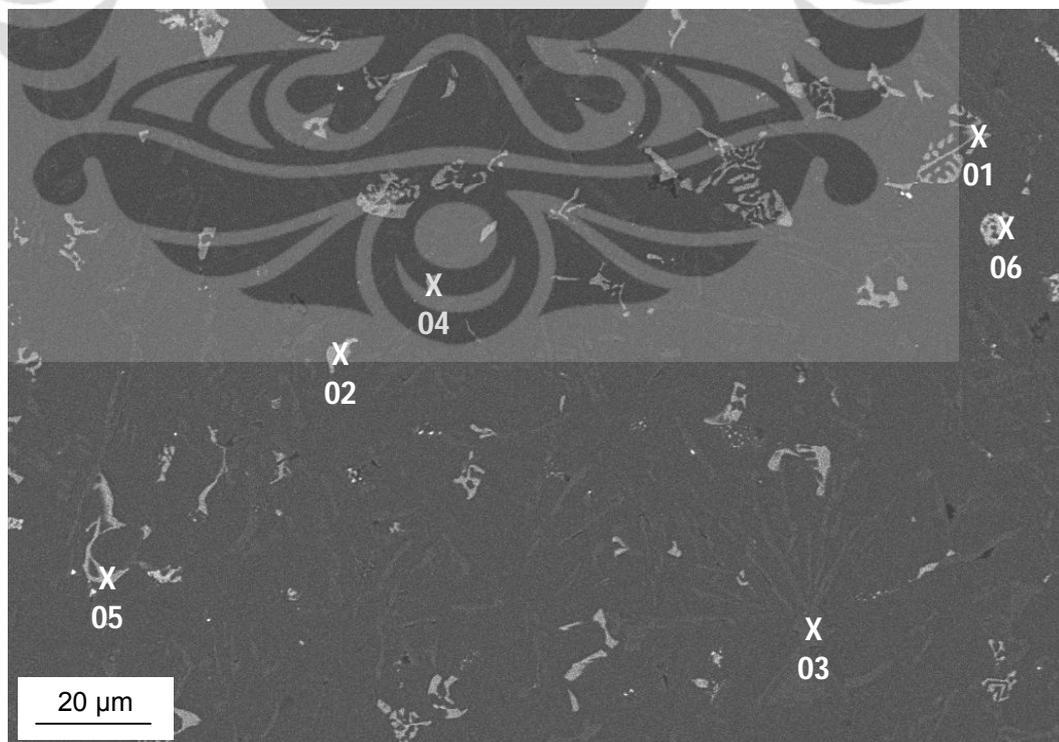


Gambar 4.6 Pengamatan struktur mikro dengan SEM pada paduan AC4B dengan perlakuan pelarutan 500°C selama 30 menit pada kondisi *peak-aged*, nomor menunjukkan titik pengujian EDX

Tabel 4.2 Komposisi hasil analisis titik SEM / EDAX pada Gambar 4.6

No	Komposisi								Warna	Fasa yang Mungkin Terbentuk
	Al	Si	Cu	Ti	Fe	Mn	C	O		
1	25.80	73.20	-	-	-	-	-	0.96	abu-abu	Al-Si
2	58.50	5.38	9.20	-	19.10	6.45	-	1.42	abu-abu muda	Al(Fe,Mn)Si
3	56.10	5.68	8.23	-	20.90	7.44	0.94	0.65	abu-abu muda berbentuk jarum	Al(Fe,Mn)Si, FeMnAl ₆
4	88.50	1.56	5.37	1.38	-	0.91	1.43	0.87	abu-abu muda	Al ₂ Cu, Ti tersegregasi
5	85.40	1.48	7.06	-	-	-	1.68	4.34	abu-abu muda	Al ₂ Cu
6	13.10	75.70	9.48	-	-	-	-	1.26	abu-abu tua	silikon eutektik

Pada fasa nomor 1 diketahui bahwa kandungan Al dan Si cukup tinggi di sana. Kadar Al sebesar 25.80 % serta kadar Si sebesar 73.20 % cukup dominan. Diindikasikan pada fasa nomor 1 ini adalah fasa Al-Si. Fasa tersebut berwarna abu-abu. Pada fasa nomor 2 diketahui kandungan Al yang cukup tinggi sebesar 58.50 % disertai Fe (19.10 %), Cu (9.20 %), Mn (6.45 %), dan Si (5.38 %). Fasa nomor 2 ini diindikasikan sebagai fasa intermetalik Al(Fe,Mn)Si. Kesimpulan ini diperkuat dengan bentuknya yang memanjang. Fasa nomor 3 diketahui bahwa kandungan Al, Fe, Cu, Mn, dan Si yang cukup tinggi. Fasa ini kemungkinan adalah fasa intermetalik Al(Fe,Mn)Si, sama seperti fasa nomor 2. Kesimpulan ini juga diperkuat dengan bentuknya yang memanjang menyerupai jarum. Pada fasa nomor 4 diketahui bahwa kandungan Al yang cukup tinggi sebesar 88.50 % dan unsur-unsur lain yang memiliki kadar yang sangat rendah. Disini kadar Cu memiliki komposisi yang sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan unsur lainnya, yaitu sebesar 5.37%. Kemungkinan untuk fasa nomor 4 ini adalah fasa Al_2Cu . Fasa nomor 6 diindikasikan sebagai fasa silikon eutektik dilihat dari komposisi dan dengan bentuk panjang dengan warna abu-abu gelap.



Gambar 4.7 Pengamatan struktur mikro dengan SEM pada paduan AC4B dengan perlakuan pelarutan 500°C selama 120 menit pada kondisi *peak-aged*, nomor menunjukkan titik pengujian EDX

Gambar 4.7 menjelaskan hasil pengamatan struktur mikro dengan menggunakan SEM / EDX pada saat kondisi *peak-aged* pada paduan AC4B normal yang diberikan perlakuan pelarutan pada temperatur 500 °C dan waktu tahan 120 menit, serta Tabel 4.3 yang menjelaskan komposisi hasil analisa titik SEM / EDAX pada Gambar 4.7 tersebut. Pada fasa nomor 1 diketahui bahwa kandungan Al dan Si cukup tinggi di sana. Kadar Al sebesar 51.60 % serta kadar Si sebesar 36.20 % cukup dominan. Diindikasikan pada fasa nomor 1 ini adalah fasa Al-Si. Fasa tersebut berwarna abu-abu. Meskipun pada fasa 1 ini terdapat kandungan Cu, Fe, dan Mn, namun kadar ketiga unsur tersebut terlalu kecil. Pada fasa nomor 2 diketahui kandungan Al yang cukup tinggi sebesar 63.10 % disertai Fe (13.90 %), Cu (15.10 %), Mn (2.59 %), dan Si (4.04 %). Fasa nomor 2 ini diindikasikan sebagai fasa intermetalik Al(Fe,Mn)Si. Kesimpulan ini diperkuat dengan bentuknya yang memanjang. Kemungkinan lain untuk fasa terbentuk pada nomor 2 ini adalah Al₂Cu, melihat begitu besarnya kadar Cu yang ada. Nomor 3 kemungkinan besar adalah matriks Al melihat kadar Al yang sangat besar dan kadar unsur-unsur lainnya yang sangat kecil. Pada fasa nomor 4 diketahui bahwa kandungan Al yang cukup tinggi sebesar 89.90 % dan unsur-unsur lain yang memiliki kadar yang sangat rendah. Disini kadar Cu memiliki komposisi yang sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan unsur lainnya , yaitu sebesar 7.67%. Kemungkinan untuk fasa nomor 4 ini adalah fasa Al₂Cu. Fasa yang kemungkinan terbentuk di nomor 5 kemungkinan adalah sama seperti pada fasa nomor 2 yaitu Al₂Cu, atau kemungkinan lainnya adalah fasa intermetalik Al(Fe, Mn)Si. Fasa nomor 6 diindikasikan sebagai fasa Al₂Cu sama seperti pada fasa nomor 4.

Tabel 4.3 Komposisi hasil analisis titik SEM / EDAX pada Gambar 4.7

No	Komposisi									Warna	Fasa yang Mungkin Terbentuk
	Al	Si	Cu	Ti	Fe	Mn	Cr	C	O		
1	51.60	36.20	5.510	-	3.56	1.18	-	1.20	0.75	abu-abu muda	Al-Si
2	63.10	4.04	15.10	-	13.90	2.59	-	-	1.31	abu-abu muda	Al ₂ Cu, Al(Fe,Mn)Si
3	95.00	1.93	2.29	-	-	-	-	-	0.75	abu-abu tua	Matriks Al
4	89.90	1.51	7.67	-	-	-	-	-	0.88	abu-abu muda	Al ₂ Cu
5	51.20	5.84	16.60	-	20.00	5.34	0.50	-	0.48	putih abu-abu	Al ₂ Cu, Al(Fe,Mn)Si
6	89.60	1.81	6.90	-	-	-	-	-	1.65	putih abu-abu	Al ₂ Cu

4.3 Pengaruh Temperatur dan Waktu Tahan Perlakuan Pelarutan Terhadap Respon Penuaan Paduan Aluminium AC4B Dengan Penambahan 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr

4.3.1 Kurva Pengerasan Penuaan

Perbedaan waktu pelarutan serta temperatur pelarutan memberikan pengaruh pada kekerasan paduan aluminium ketika dilakukan perlakuan penuaan. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.8 yang memuat pengaruh perlakuan pelarutan terhadap pengerasan penuaan paduan AC4B dengan penambahan 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr pada tiga variabel temperatur pelarutan yakni 480, 500, dan 520 °C serta waktu pada waktu tahan 30 dan 120 menit, serta Gambar 4.9 yang memuat pengaruh terhadap waktu tahan perlakuan pelarutan. Pengerasan penuaan dilakukan pada temperatur 200 °C selama 96 jam. Dari Gambar 4.8 terlihat kenaikan nilai kekerasan pada setiap perlakuan sampai titik tertentu (*peak-aged*) dan akan turun setelah menyentuh kekerasan puncak. Peningkatan kekerasan selama pengerasan penuaan hingga sampai pada *peak-aged* hingga kemudian terjadi penurunan kekerasan terjadi berbeda-beda pada setiap temperatur perlakuan pelarutan.

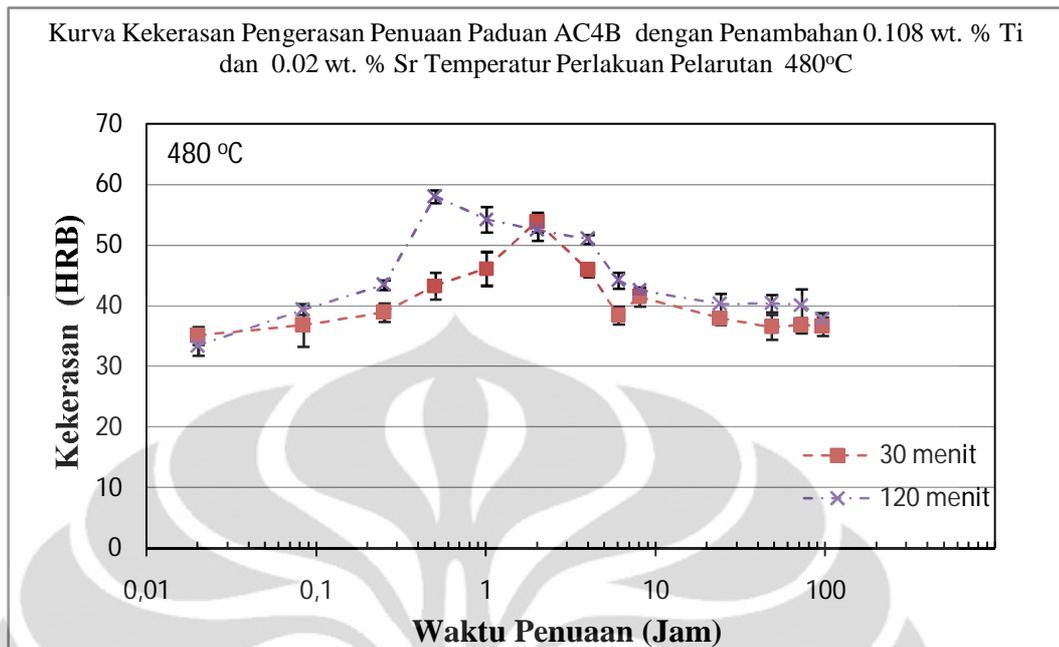
Pada temperatur 480 °C terdapat perbedaan kekerasan yang didapat setelah perlakuan penuaan antara waktu tahan 30 menit dan 120 menit. Pada Gambar 4.8 (a) tampak dengan waktu tahan selama 30 menit, nilai kekerasan terus mengalami kenaikan dari 35.06 HRB naik 53.45% menjadi 53.80 HRB. Kekerasan sebesar 53.80 HRB merupakan kekerasan tertinggi yang dicapai pada pengerasan penuaan selama 2 jam. Setelah mencapai titik kekerasan tertinggi kekerasan perlahan turun kembali hingga waktu penuaan 96 jam dengan kekerasan 36.64 HRB. Pada waktu tahan selama 120 menit, nilai kekerasan yang didapat lebih tinggi dibandingkan dengan waktu tahan selama 30 menit. Nilai kekerasan terus mengalami kenaikan dari 33.38 HRB naik 73.82% menjadi 58.02 HRB. Kekerasan sebesar 58.02 HRB merupakan kekerasan tertinggi yang dicapai pada pengerasan penuaan selama 30 menit. Setelah mencapai titik kekerasan tertinggi kekerasan perlahan turun kembali hingga waktu penuaan 96 jam dengan kekerasan 37.78 HRB.

Pada temperatur 500 °C juga terdapat perbedaan kekerasan yang didapat setelah perlakuan penuaan antara waktu tahan 30 menit dan 120 menit. Pada

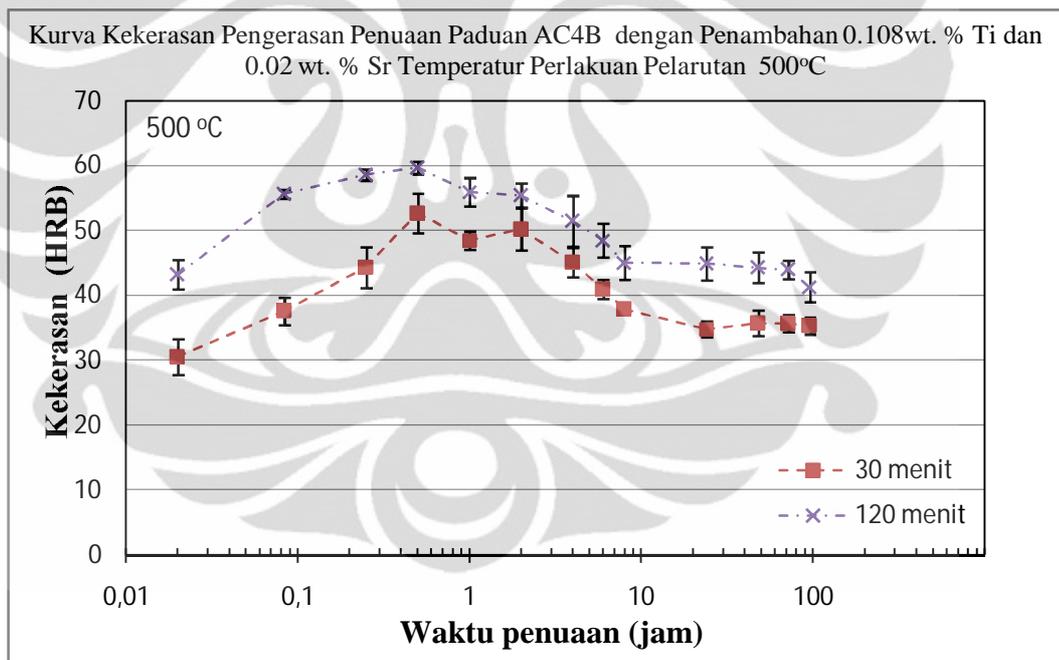
Gambar 4.8 (b) tampak dengan waktu tahan selama 30 menit, nilai kekerasan terus mengalami kenaikan dari 30.52 HRB naik 71.03% menjadi 52.20 HRB. Kekerasan sebesar 52.20 HRB merupakan kekerasan tertinggi yang dicapai pada pengerasaan penuaan selama 30 menit. Setelah mencapai titik kekerasan tertinggi kekerasan perlahan turun kembali hingga waktu penuaan 96 jam dengan kekerasan 35.32HRB. Pada waktu tahan selama 120 menit, nilai kekerasan terus mengalami kenaikan dari 43.20 HRB naik 97.5% menjadi 59.66 HRB. Kekerasan sebesar 59.66 HRB merupakan kekerasan tertinggi yang dicapai pada pengerasaan penuaan selama 30menit. Setelah mencapai titik kekerasan tertinggi kekerasan perlahan turun kembali hingga waktu penuaan 96 jam dengan kekerasan 41.28 HRB.

Pada temperatur 520 °C juga terdapat perbedaan kekerasan yang didapat setelah perlakuan penuaan antara waktu tahan 30 menit dan 120 menit. Pada Gambar 4.8 (c) tampak dengan waktu tahan selama 30 menit, nilai kekerasan terus mengalami kenaikan dari 30.58 HRB naik 86.59% menjadi 57.06 HRB. Kekerasan sebesar 57.06 HRB merupakan kekerasan tertinggi yang dicapai pada pengerasaan penuaan selama 30 menit. Setelah mencapai titik kekerasan tertinggi kekerasan perlahan turun kembali hingga waktu penuaan 96 jam dengan kekerasan 36.28 HRB. Pada waktu tahan selama 120 menit, nilai kekerasan terus mengalami kenaikan dari 40.88 HRB naik 62.77% menjadi 66.54 HRB. Kekerasan sebesar 66.54 HRB merupakan kekerasan tertinggi yang dicapai pada pengerasaan penuaan selama 1 jam. Setelah mencapai titik kekerasan tertinggi kekerasan perlahan turun kembali hingga waktu penuaan 96 jam dengan kekerasan 46.82 HRB.

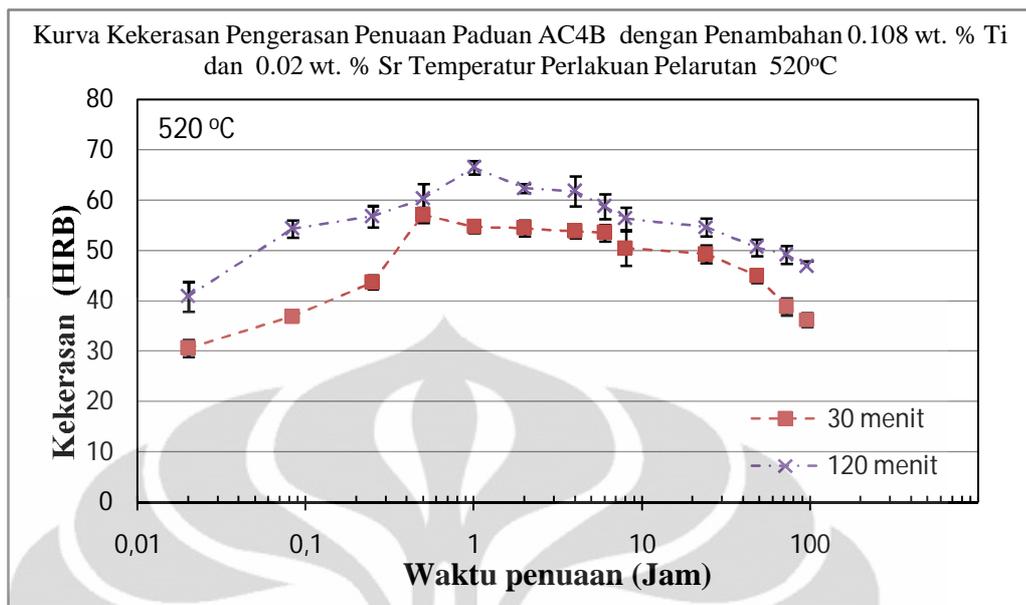
Berdasarkan Gambar 4.8 tersebut dapat disimpulkan bahwa kekerasan puncak pada proses penuaan akan didapat paling tinggi pada perlakuan pelarutan dengan waktu tahan yang lebih lama. Hal ini dikarenakan pada waktu tahan yang lebih lama dapat memberikan kesempatan pembentukan paduan homogen yang lebih baik dengan fasa β yang terlarut sempurna^[21]. Kekerasan tertinggi didapat ketika paduan aluminium dilakukan perlakuan pelarutan dengan temperatur 520°C dan waktu tahan pelarutan selama 120 menit. Kekerasan yang didapat sebesar 66.54 HRB pada pengerasaan penuaan selama 1 jam.



(a)

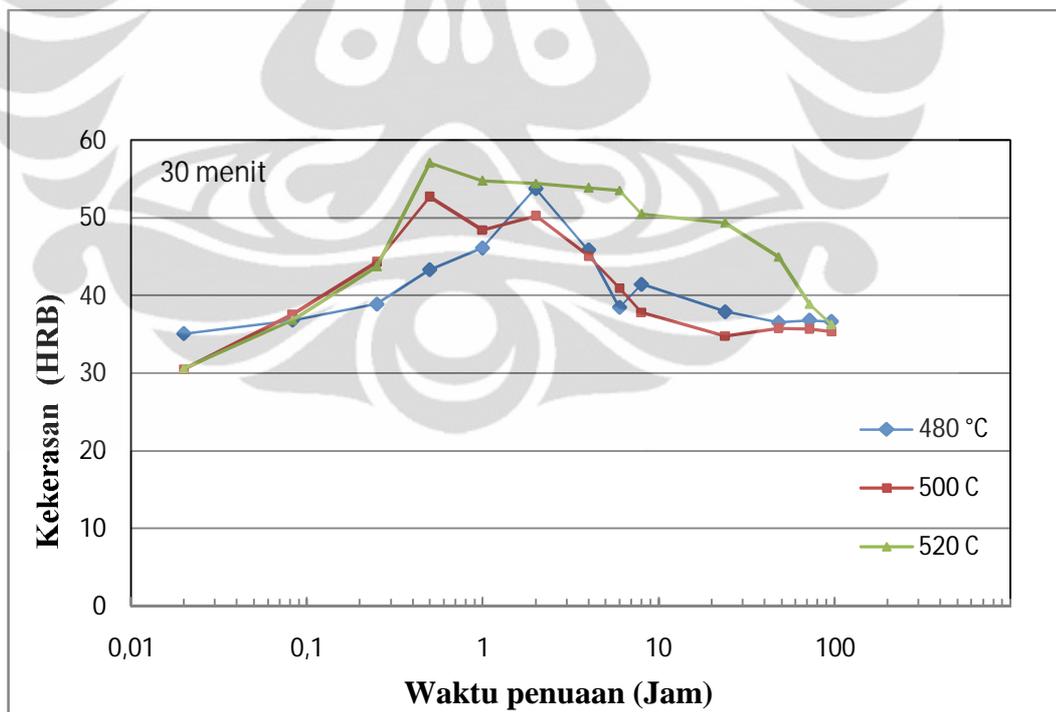


(b)

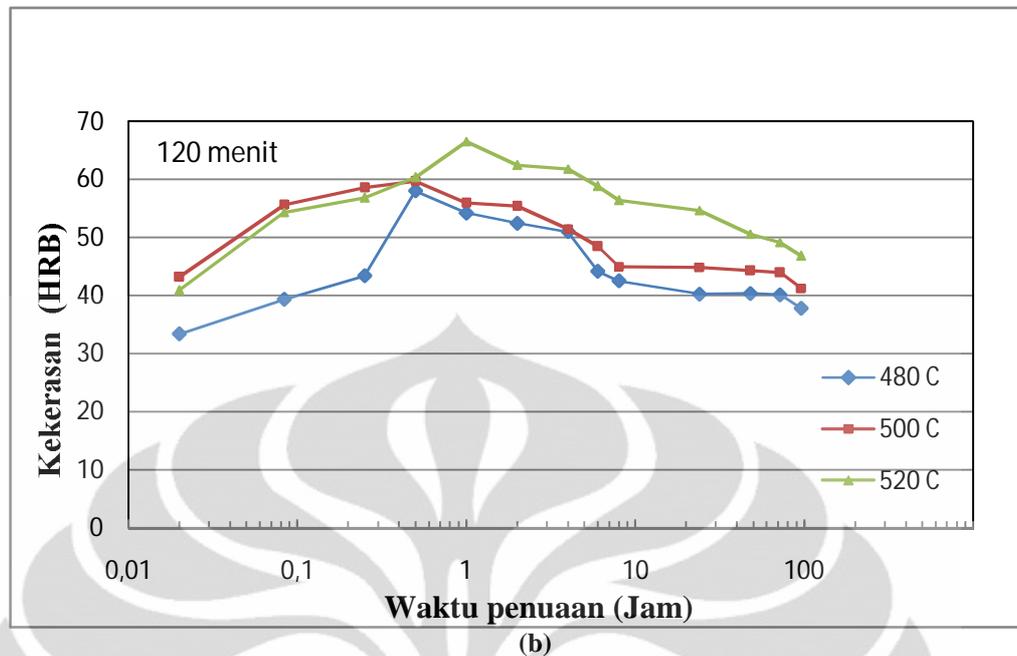


(c)

Gambar 4.8 Pengaruh waktu tahan terhadap respon pengerasan penuaan paduan AC4B dengan penambahan 0.108 wt % Ti dan 0.02 wt % Sr pada temperatur perlakuan pelarutan (a) 480 °C, (b) 500 °C, dan (c) 520 °C



(a)



Gambar 4.9 Pengaruh temperatur perlakuan pelarutan pada respon pengerasan penuaan pada paduan AC4B dengan penambahan 0.108 wt % Ti dan 0.02 wt % Sr pada waktu tahan (a) 30 menit dan (b) 120 menit

Gambar 4.9 menunjukkan perbedaan waktu tahan perlakuan pelarutan 30 menit dan 120 menit. Pada Gambar 4.3 (a) dan (b) dapat dilihat pada umumnya peningkatan temperatur pelarutan dapat meningkatkan kekerasan. Hal ini disebabkan oleh semakin tinggi temperatur mengakibatkan semakin banyak *vacancy* yang terbentuk sehingga jumlah presipitat yang terbentukpun semakin banyak dan juga pada temperatur yang lebih tinggi dapat lebih mudah melarutkan fasa yang kaya akan Cu dalam matriks aluminium^[26]. Fasa kaya Cu yang terlarut ini akan tumbuh menjadi presipitat ketika dilakukan proses penuaan. Namun ada sedikit perbedaan pada Gambar 4.9 (a). Pada gambar tersebut tampak bahwa temperatur pelarutan 480 °C dapat menghasilkan kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan temperatur 500 °C. Hal ini kemungkinan pada temperatur pelarutan 500 °C dihasilkan *vacancy* dengan jumlah yang lebih sedikit dibandingkan dengan pada temperatur 480 °C karena disebabkan proses *quenching* yang tidak cepat yang dilakukan pada sampel dengan temperatur pelarutan 500 °C. Proses *quenching* yang tidak cepat memberi kesempatan bagi *vacancy* untuk kembali berdifusi.

4.3.2 Pengamatan Evolusi Struktur Mikro Menggunakan Mikroskop Optik

Gambar 4.10 menunjukkan evolusi sktruktur mikro pada paduan aluminium AC4B dengan penambahan 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr pada waktu tahan pelarutan selama 30 menit, sedangkan Gambar 4.11 menunjukkan evolusi struktur mikro pada dapuan yang sama dengan waktu tahan pelarutan selama 120 menit. Pengamatan struktur mikro dilakukan pada kondisi *under-aged*, *peak-aged*, dan *over-aged*.

Pada temperatur pelarutan 480 °C dan waktu tahan 30 menit, struktur mikro kondisi *under-aged* didapat pada waktu penuaan 5 menit, *peak-aged* pada waktu 2 jam, dan *over-aged* pada 4 jam. Pada temperatur pelarutan 500 °C dan waktu tahan 30 menit, struktur mikro kondisi *under-aged* didapat pada waktu penuaan 5 menit, *peak-aged* pada waktu 30 menit, dan *over-aged* pada 4 jam. Sedangkan pada temperatur pelarutan 520 °C dan waktu tahan 30 menit, struktur mikro kondisi *under-aged* didapat pada waktu penuaan 5 menit, *peak-aged* pada waktu 30 menit, dan *over-aged* pada 2 jam.

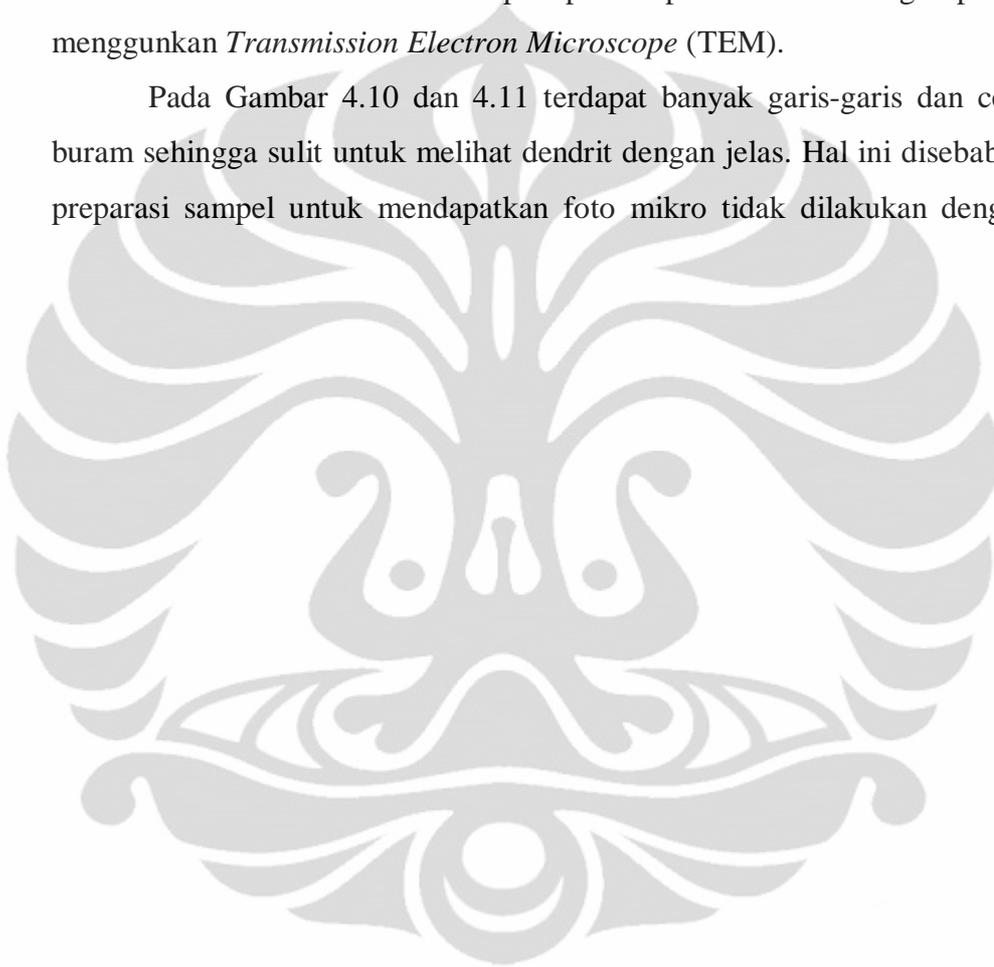
Pada temperatur pelarutan 480 °C dan waktu tahan 120 menit, struktur mikro kondisi *under-aged* didapat pada waktu penuaan 5 menit, *peak-aged* pada waktu 30 menit, dan *over-aged* pada 2 jam. Pada temperatur pelarutan 500 °C dan waktu tahan 120 menit, struktur mikro kondisi *under-aged* didapat pada waktu penuaan 5 menit, *peak-aged* pada waktu 30 menit, dan *over-aged* pada 2 jam. Sedangkan pada temperatur pelarutan 520 °C dan waktu tahan 120 menit, struktur mikro kondisi *under-aged* didapat pada waktu penuaan 5 menit, *peak-aged* pada waktu 1 jam, dan *over-aged* pada 4 jam.

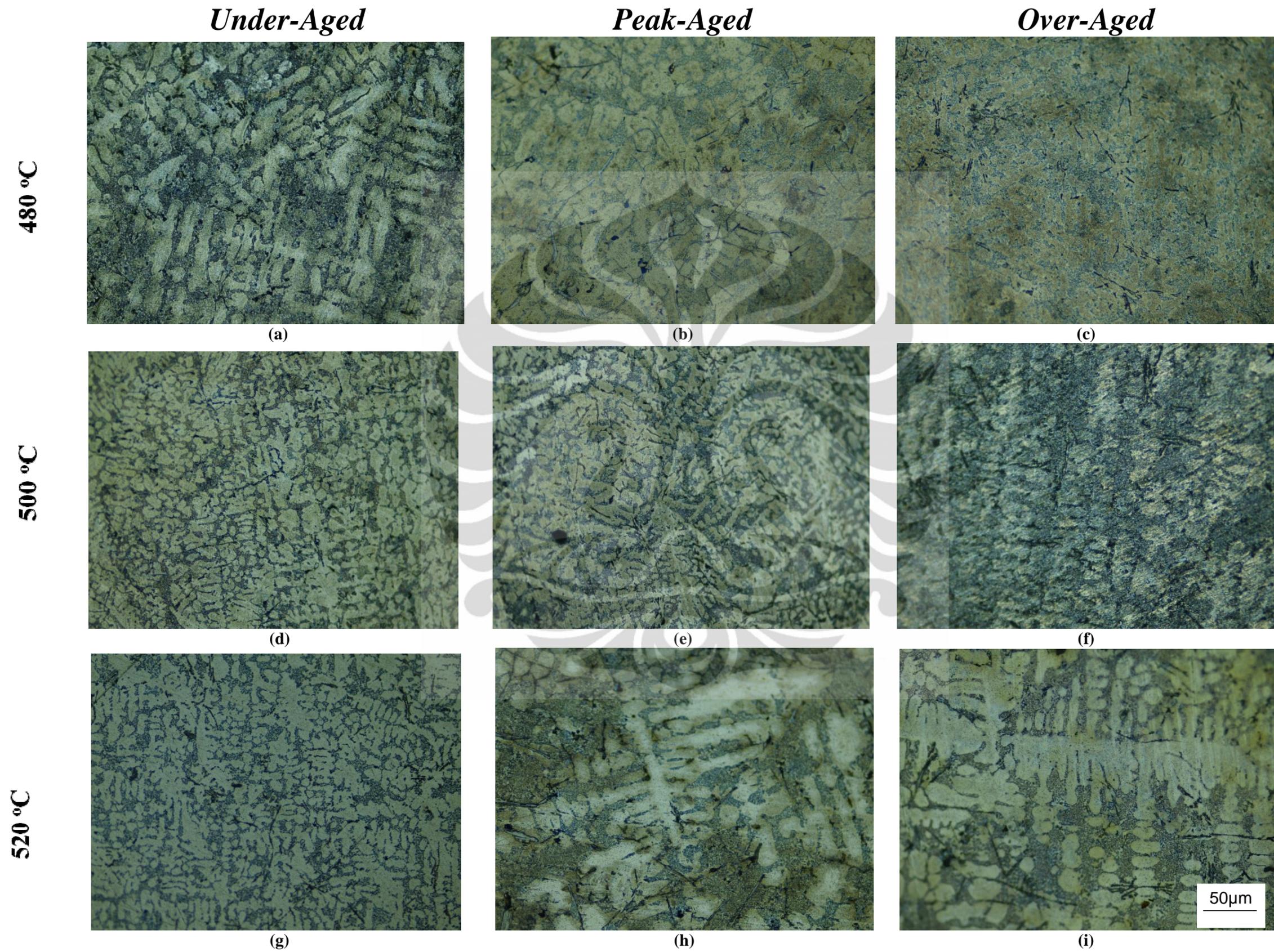
Pada kedua bentuk struktur mikro dengan waktu tahan 30 menit dan waktu tahan 120 menit, tampak pada kondisi *under-aged* memiliki struktur dendrit dengan sedikit fasa yang ada pada jarak antar dendrit. Sedikitnya jumlah fasa kemungkinan disebabkan belum sempurnanya proses difusi yang dilakukan oleh fasa β . Pada kondisi *peak-aged*, fasa yang terdapat pada jarak antar dendrit cukup banyak dan fasa-fasa tersebut berkumpul diantara dendrit. Fasa ini kemungkinan presipitat yang terbentuk karena proses penuaan setelah dilakukannya proses pelarutan dilanjutkan pendinginan cepat. Fasa-fasa yang terdapat pada kondisi *peak-aged* ini kemungkinan adalah fasa silikon eutektik,

$\text{Al}(\text{Mn,Fe})\text{Si}$, Al_5FeSi , Al_3Ti dan Al_2Cu . Sedangkan struktur mikro pada kondisi *over-aged* dendrit Al mengalami pemutusan.

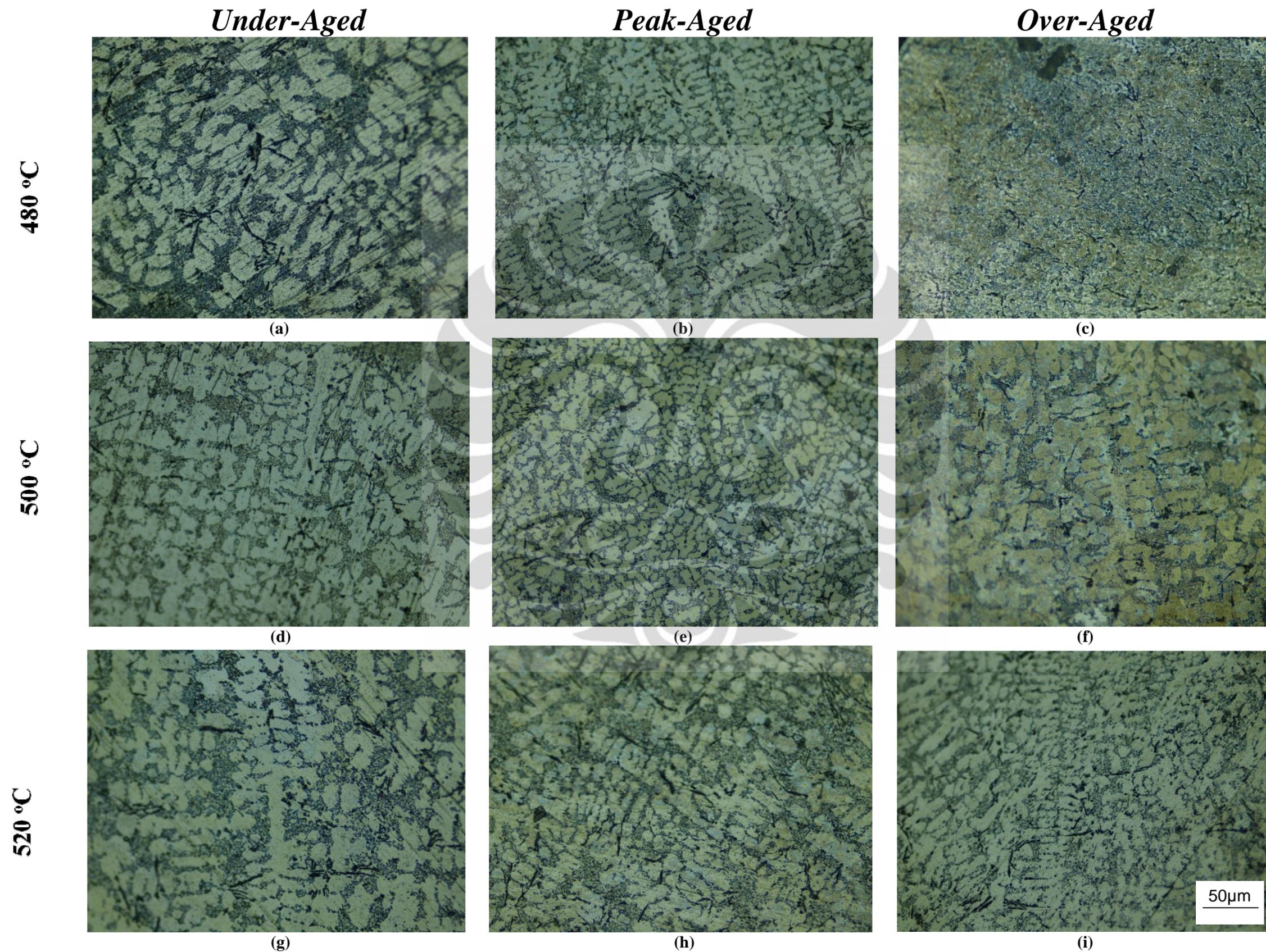
Gambar 4.10 dan 4.11 dengan pengambilan menggunakan mikroskop optik tidak dapat menunjukkan adanya presipitat yang dapat membandingkan sifat mekanis dari ketiga kondisi tersebut. Untuk mengetahui presipitat yang terbentuk dan sifat koherensi dari presipitat dapat dilakukan dengan pengamatan menggunakan *Transmission Electron Microscope* (TEM).

Pada Gambar 4.10 dan 4.11 terdapat banyak garis-garis dan cenderung buram sehingga sulit untuk melihat dendrit dengan jelas. Hal ini disebabkan oleh preparasi sampel untuk mendapatkan foto mikro tidak dilakukan dengan baik.





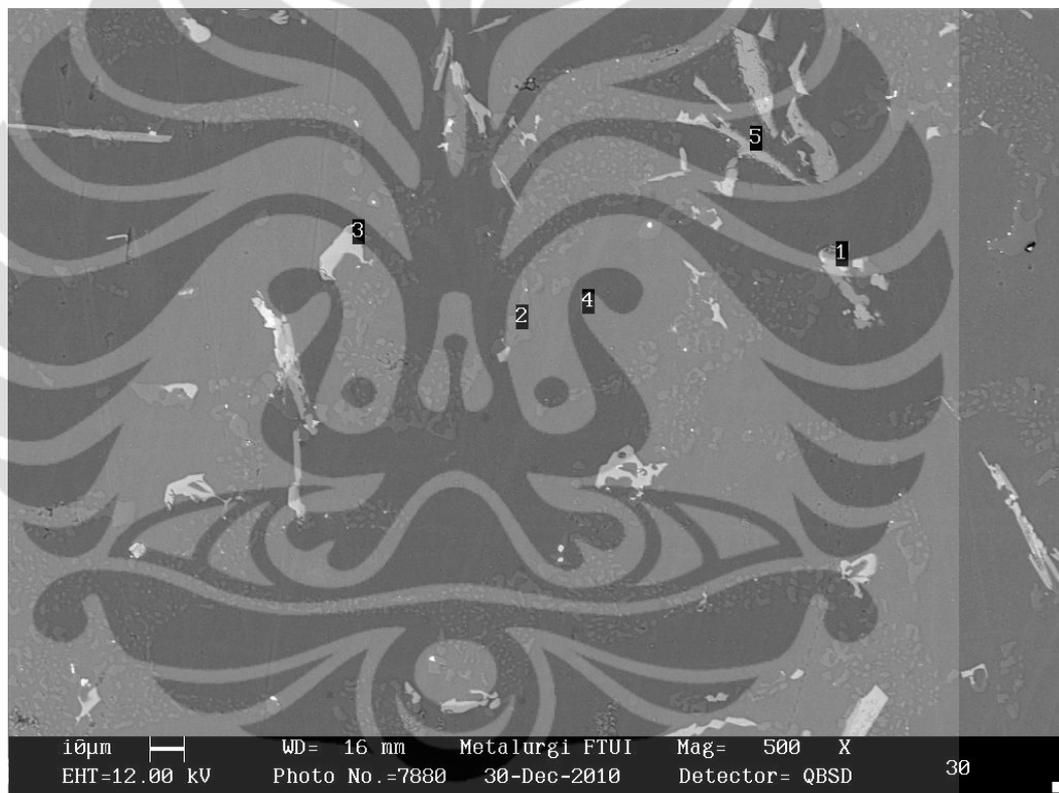
Gambar 4.10 Evolusi struktur mikro paduan aluminium AC4B dengan kandungan 0.108 wt % Ti dan 0.02 wt % Sr temperatur perlakuan pelarutan: (a-c)480 °C, (d-f) 500 °C, dan (g-i) 520 °C selama 30 menit



Gambar 4.11 Evolusi struktur mikro paduan aluminium AC4B dengan kandungan 0.108 wt % Ti dan 0.02 wt % Sr temperatur perlakuan pelarutan: (a-c)480 °C, (d-f) 500 °C, dan (g-i) 520 °C selama 120 menit

4.3.3 Observasi Detail Struktur Mikro Menggunakan SEM / EDX

Pengamatan struktur mikro menggunakan SEM / EDX memungkinkan untuk memperkirakan fasa yang terbentuk pada paduan aluminium AC4B dengan paduan 0.108 wt.% Ti dan 0.02 wt.% Sr. Gambar 4.12 menjelaskan hasil pengamatan struktur mikro dengan menggunakan SEM / EDX pada saat kondisi *peak-aged* pada paduan AC4B dengan paduan 0.108 wt.% Ti dan 0.02 wt.% Sr yang diberikan perlakuan pelarutan pada temperatur 500 °C dan waktu tahan 30 menit, serta Tabel 4.4 yang menjelaskan komposisi hasil analisa titik SEM / EDAX pada Gambar 4.12 tersebut.

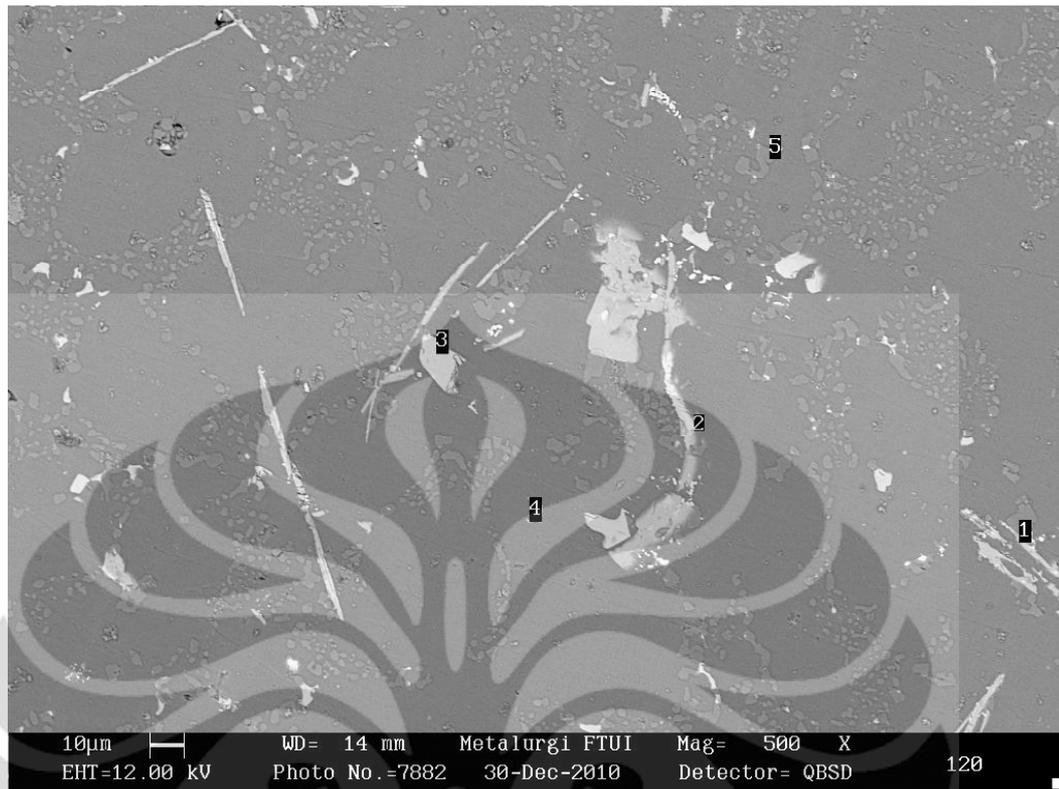


Gambar 4.12 Pengamatan struktur mikro dengan SEM pada paduan AC4B dengan penambahan 0.108 wt.% Ti dan 0.02 wt.% Sr dengan perlakuan pelarutan 500°C selama 30 menit pada kondisi *peak-aged*, nomor menunjukkan titik pengujian EDX

Tabel 4.4 Komposisi hasil analisis titik SEM / EDAX pada Gambar 4.12

No	Komposisi								Warna	Fasa yang Mungkin Terbentuk
	Al	Si	Cu	Ti	Fe	Mn	C	O		
1	57.32	12.09	-	-	24.73	3.65	0.2	2.01	abu-abu muda	Al(Fe,Mn)Si
2	27.74	71.10	-	-	-	-	-	1.16	abu-abu	Al-Si, silikon eutektik
3	47.70	6.35	13.96	-	16.23	10.32	-	2.62	abu-abu muda	Al ₂ Cu, Al(Fe,Mn)Si
4	84.80	1.66	10.76	0.86	-	-	-	1.83	abu-abu tua	Al ₂ Cu
5	48.99	46.03	3.69	-	-	-	-	1.30	abu-abu muda	Al-Si

Pada fasa nomor 1 diketahui bahwa kandungan Al, Mn, Fe dan Si cukup tinggi di sana. Kadar Al sebesar 57.32 %, kadar Si 12.09 %, Fe 24.73 %, dan Mn sebesar 3.65 %. Diindikasikan pada fasa nomor 1 ini adalah fasa intermetalik Al(Fe,Mn)Si. Fasa tersebut berwarna abu-abu muda. Pada fasa nomor 2 diketahui kandungan Al yang cukup tinggi sebesar 27.73 %, namun unsur lain yaitu Si memiliki kadar yang jauh lebih tinggi sebesar 71.10 %. Fasa nomor 2 ini diindikasikan sebagai silikon eutektik atau kemungkinan lainnya adalah Al-Si. Pada fasa nomor 3 diketahui bahwa kandungan Al yang tinggi sebesar 47.70 %, Cu sebesar 13.96%, Si sebesar 6.35%, Fe sebesar 16.23%, dan Mn sebesar 10.32%. Kemungkinan pada fasa nomor 3 ini adalah fasa Al₂Cu. Kemungkinan lainnya adalah Al(Fe,Mn)Si. Fasa nomor 4, kemungkinan besar adalah Al₂Cu. Hal ini didasari oleh kandungan Al yang cukup tinggi mencapai 84.80% diikuti oleh kadar Cu sebesar 10.76%. Fasa nomor 4 ini berwarna abu-abu tua. Fasa nomor 5 diindikasikan sebagai Al-Si. Hal ini didasari oleh kadar Al sebesar 48.99% serta kadar Si yang cukup tinggi pula sebesar 46.03%. Fasa nomor 5 ini berwarna abu-abu muda.



Gambar 4.13 Pengamatan struktur mikro dengan SEM pada paduan AC4B dengan penambahan 0.108 wt.% Ti dan 0.02 wt.% Sr dengan perlakuan pelarutan 500°C selama 120 menit pada kondisi *peak-aged*, nomor menunjukkan titik pengujian EDX

Gambar 4.13 menjelaskan hasil pengamatan struktur mikro dengan menggunakan SEM / EDX pada saat kondisi *peak-aged* pada paduan AC4B dengan tambahan 0.108 wt.% Ti dan 0.02 wt.% Sr yang diberikan perlakuan pelarutan pada temperatur 500 °C dan waktu tahan 120 menit, serta Tabel 4.5 yang menjelaskan komposisi hasil analisa titik SEM / EDAX pada Gambar 4.13 tersebut. Pada fasa nomor 1 diketahui bahwa kandungan Al, Mn, Si, dan Fe yang cukup dominan. Kemungkinan pada nomor 1 ini, fasa yang terbentuk adalah fasa intermetalik Al(Fe,Mn)Si dengan warna abu-abu muda. Fasa tersebut berwarna abu-abu muda. Fasa nomor 2 kemungkinan adalah Silikon eutektik, karena kandungan silikon yang cukup tinggi dibandingkan unsur-unsur lainnya. Kandungan silikon mencapai 95.03%. Fasa nomor 3, kemungkinan adalah Al₂Cu, karena kadar Al dan Cu yang cukup tinggi. Pada nomor 3 ini, kemungkinan fasa lainnya yang terbentuk adalah fasa intermetalik Al(Fe,Mn)Si. Fasa nomor 4 dan 5 kemungkinan besar adalah Al₂Cu. Hal ini diperkuat dengan kandungan Al dan Cu yang cukup tinggi pada keduanya.

Tabel 4.5 Komposisi hasil analisis titik SEM / EDAX pada Gambar 4.13

No	Komposisi									Warna	Fasa yang Mungkin Terbentuk
	Al	Si	Cu	Ti	Fe	Mn	Cr	C	O		
1	84.90	2.58	-	-	8.69	2.09	-	-	1.75	abu-abu muda	Al(Fe,Mn)Si
2	2.16	95.03	-	-	0.88	0.17	-	-	1.76	abu-abu	Silikon eutektik
3	44.34	5.17	20.05	-	19.11	8.02	0.94	-	2.36	abu-abu muda	Al ₂ Cu, Al(Fe,Mn)Si
4	87.94	1.31	9.64	-	-	-	-	-	-	abu-abu tua	Al ₂ Cu
5	85.80	1.54	11.07	-	-	-	-	-	1.60	abu-abu tua	Al ₂ Cu

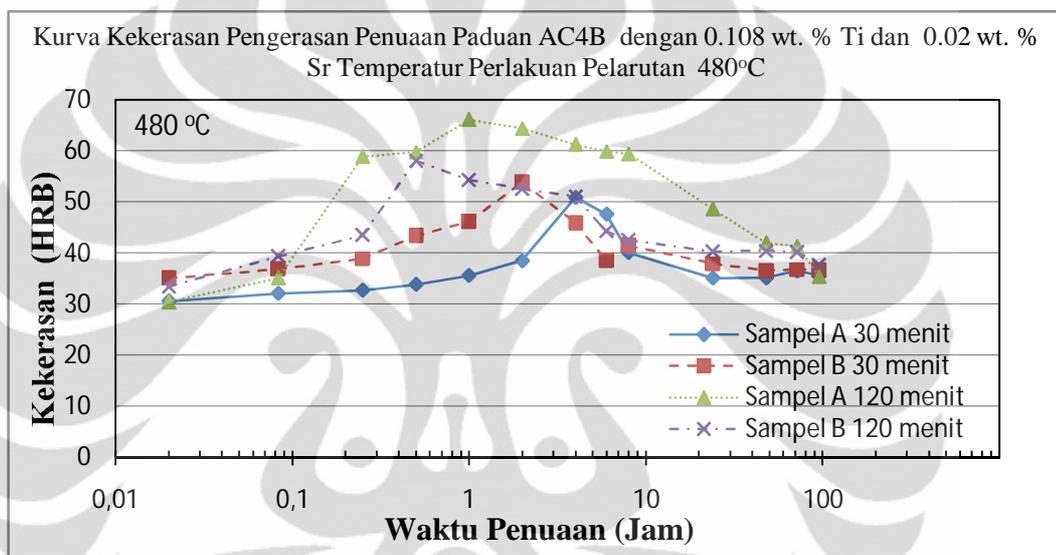
4.4 Perbandingan Respon Penuaan Paduan Aluminium AC4B Sebelum dan Sesudah Penambahan dengan Kandungan 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr.

4.4.1 Kurva Pengerasan Penuaan

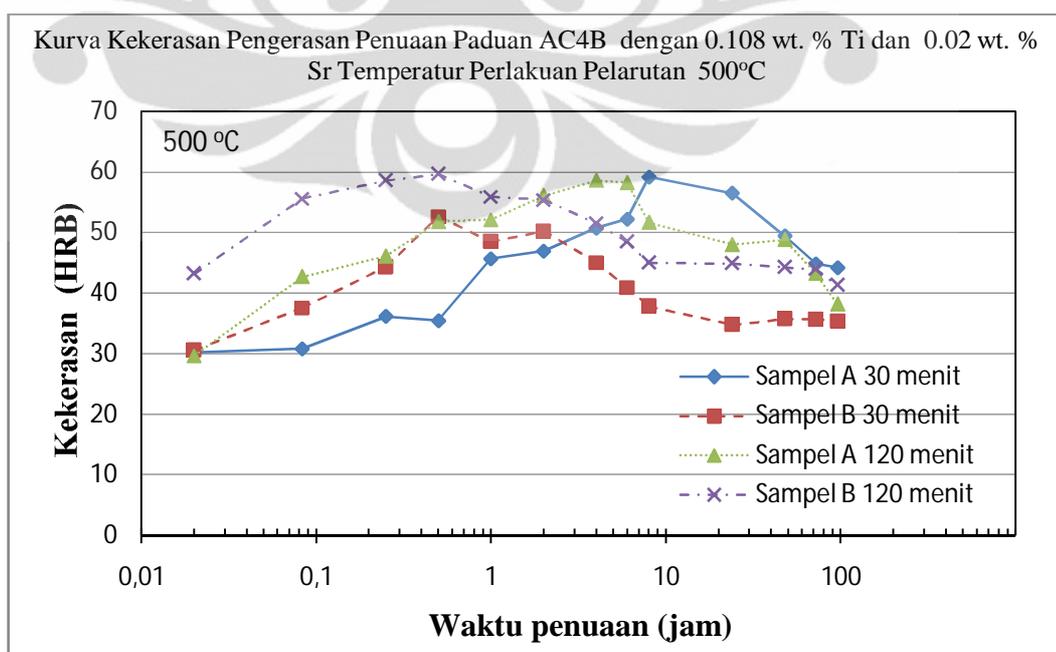
Paduan aluminium AC4B normal dibandingkan dengan penambahan 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr memiliki kekerasan yang berbeda ketika proses pengerasan penuaan yang dapat dilihat pada Gambar 4.14. Pada Gambar 4.14 (a) terdapat kurva pengerasan penuaan pada perlakuan pelarutan dengan temperatur 480°C, Gambar 4.14 (b) pada temperatur 500°C, dan Gambar 4.14 (c) pada temperatur 520°C.

Kekerasan yang didapatkan pada paduan aluminium AC4B dengan penambahan 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan paduan AC4B normal ketika dilakukan proses pengerasan penuaan, baik ketika waktu tahan dilakukan selama 30 menit maupun 120 menit. Hal ini disebabkan oleh penambahan titanium sebagai penghalus butir. Semakin halus butir suatu paduan, semakin baik kekuatan mekanisnya^[15]. Penambahan penghalus butir pada proses perlakuan pelarutan juga dapat mengakibatkan waktu proses pelarutan yang lebih lama dibandingkan tanpa pemberian penghalus butir^[4]. Waktu proses pelarutan yang lebih lama memberikan kesempatan proses homogenitas yang lebih baik. Tetapi pada Gambar 4.14 (a) paduan AC4B tanpa penambahan dengan perlakuan pelarutan 480 °C dan waktu tahan 120 menit memiliki kekerasan yang cukup tinggi. Hal ini dimungkinkan karena paduan AC4B pada waktu tahan 120 menit pada temperatur tersebut dapat memerangkap *vacancy* lebih baik sebagai tempat tumbuh

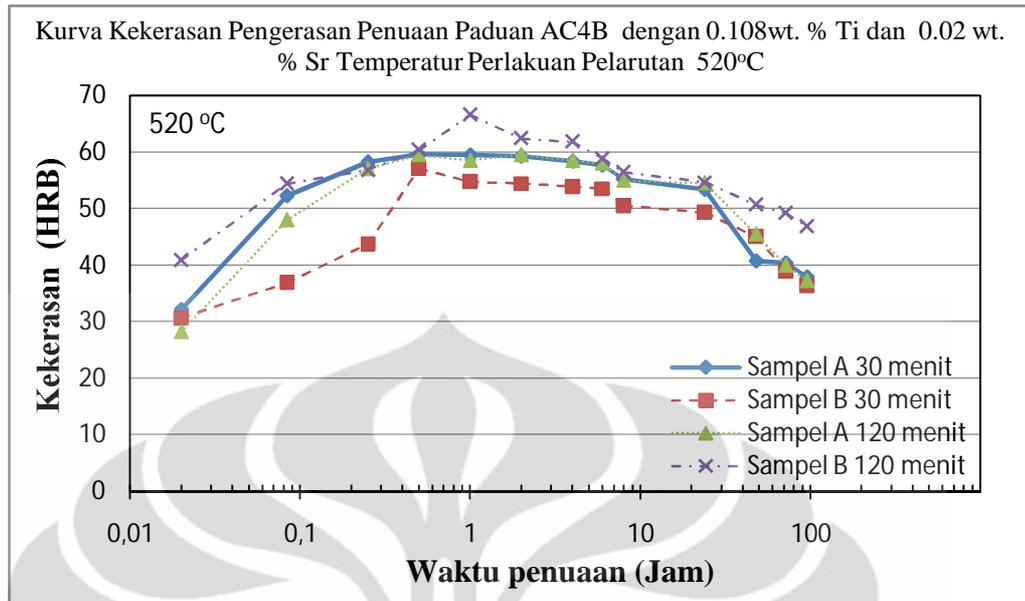
presipitat. Sehingga presipitat yang dihasilkan akan lebih banyak terdistribusi. Perbedaan jumlah *vacancy* yang terperangkap ini dipengaruhi oleh proses *quenching* yang dilakukan setelah proses perlakuan pelarutan. *Quenching* yang dilakukan dengan lebih cepat memungkinkan memerangkap *vacancy* yang lebih banyak dibandingkan dengan *quenching* yang lambat. Hal yang sama juga terjadi pada paduan AC4B normal dengan perlakuan pelarutan 500°C dan waktu tahan 30 menit memiliki kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan paduan AC4B dengan penambahan 0.108 wt.% Ti dan 0.02 wt. % Sr.



(a)



(b)



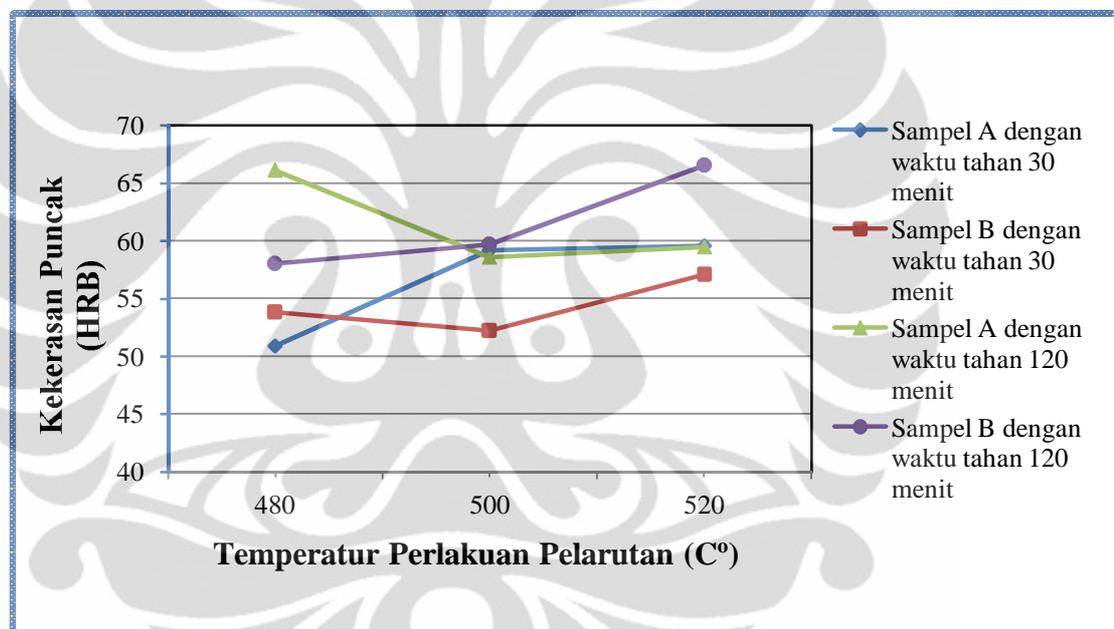
(c)

Gambar 4.14 Perbandingan kurva pengerasan penuaan paduan AC4B (sampel A) dan paduan AC4B dengan komposisi 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr (sampel B) pada perlakuan pelarutan temperatur (a) 480 °C, (b) 500 °C, dan (c) 520 °C, dengan waktu tahan pelarutan selama 30 menit dan 120 menit

4.5 Perbandingan Pengaruh Temperatur Perlakuan Pelarutan dan Waktu Tahan Pelarutan Terhadap Kekerasan Puncak pada Paduan Aluminium AC4B Sebelum dan Sesudah Penambahan 0.108 wt.% Ti dan 0.02 wt.% Sr

Gambar 4.15 merupakan perbandingan kekerasan puncak pada temperatur pelarutan 480°C, 500°C, dan 520°C dan waktu tahan selama 30 menit dan 120 menit antara paduan aluminium AC4B dengan penambahan unsur titanium serta stronsium (sampel B) dan paduan aluminium tanpa penambahan (sampel A). Berdasarkan Gambar 4.15 tersebut, pada waktu tahan selama 30 menit didapat kekerasan puncak untuk sampel A lebih tinggi dibandingkan dengan sampel B pada temperatur pelarutan 500°C dan 520°C. Sampel B memiliki kekerasan puncak melebihi sampel A hanya pada temperatur pelarutan 480°C. Begitu pula yang terjadi pada waktu tahan 120 menit, sampel A memiliki kekerasan puncak yang lebih tinggi dibandingkan dengan sampel B pada temperatur pelarutan 480°C. Seharusnya, paduan aluminium dengan penambahan unsur stronsium dan titanium memiliki kekerasan puncak yang lebih tinggi dibandingkan dengan

paduan aluminium tanpa penambahan kedua unsur tersebut. Hal ini dikarenakan terdapat perbedaan jari-jari atom antara unsur tersebut dengan jari-jari atom Al yang mempengaruhi dalam memerangkap *vacancy*. Hal ini karena dengan adanya perbedaan jari-jari atom membuat terbentuknya ikatan dan akan menciptakan rongga diantara atom tersebut. Apabila semakin ikatan yang terbentuk maka *vacancy* yang dihasilkanpun semakin banyak, dan ketika dilakukan proses penuaan dapat membentuk presipitat dengan jumlah yang lebih banyak. Semakin banyak dan tersebar meratanya presipitat yang terbentuk, maka akan dapat meningkatkan kekuatan mekanis dari paduan tersebut. Titanium memiliki jari-jari atom $0.140 \mu\text{m}$, Sr $0.215 \mu\text{m}$, Al $0.143 \mu\text{m}$, Fe $0.126 \mu\text{m}$, dan Cu $0.128 \mu\text{m}$ ^[6].



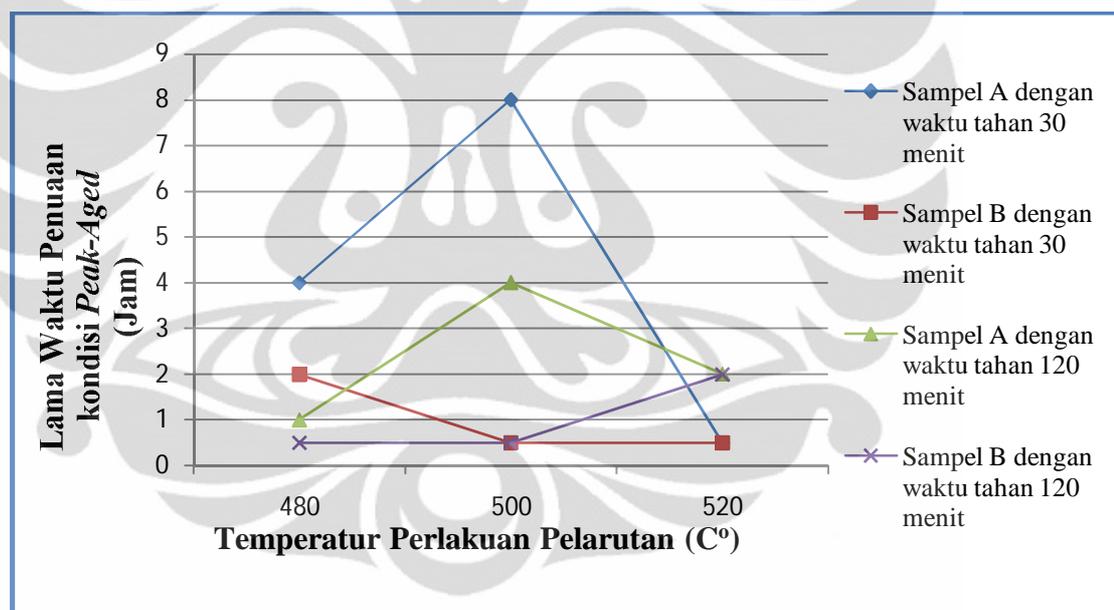
Gambar 4.15 Perbandingan kekerasan puncak pada temperatur pelarutan 480°C , 500°C , dan 520°C dengan waktu tahan selama 30 menit dan 120 menit antara paduan AC4B normal (sampel A) dan paduan AC4B dengan penambahan $0.108 \text{ wt.}\%$ Ti dan $0.02 \text{ wt.}\%$ Sr (sampel B)

Selain itu, kekerasan puncak dari kedua paduan tersebut seharusnya semakin meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur pelarutan. Menurut Tillova^[24], semakin tinggi temperatur pelarutan maka semakin tinggi kekerasan puncak yang didapat, hingga mencapai kekerasan maksimum pada temperatur pelarutan 515°C , setelah itu kekerasan menurun karena partikel Si kembali menjadi kasar dan terjadi *melting* pada Al_2Cu .

Ketidaksesuaian data yang didapat ini kemungkinan besar disebabkan proses T6 yang dilakukan tidak baik. Pada proses penuaan dengan menggunakan

dapur Nabertherm, ternyata didapat temperatur proses pada dapur tersebut yang tidak stabil. Seharusnya pada proses T6 untuk aluminium AC4B, pemanasan penuaan dilakukan pada temperatur yang stabil sebesar 200°C ^[5]. Oleh karena ketidakstabilan itu, maka pengerasan yang dihasilkan dari presipitat menjadi tidak baik. Pengerasan yang dihasilkan dari presipitat dipengaruhi oleh jenis partikel yang berpresipitasi, besar regangan, dan temperatur penuaan^[12].

Dengan penambahan unsur titanium dan stronsium juga menyebabkan proses penuaan untuk mendapatkan kekerasan puncak menjadi lebih cepat. Berdasarkan hasil dari pengujian, kekerasan puncak paduan aluminium AC4B dengan penambahan unsur titanium dan stronsium didapat dengan waktu penuaan yang relatif lebih singkat dibandingkan dengan paduan AC4B normal. Perbedaan tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.16 berikut ini.



Gambar 4.16 Perbandingan lama waktu penuaan untuk mendapatkan kekerasan puncak pada temperatur perlakuan pelarutan 480°C , 500°C , dan 520°C dan waktu tahan pelarutan selama 30 menit dan 120 menit antara paduan AC4B normal dan paduan AC4B dengan penambahan 0.108 wt.% Ti dan 0.02 wt.% Sr

Relatif singkatnya waktu penuaan yang dibutuhkan oleh paduan aluminium AC4B dengan penambahan unsur titanium dan stronsium ini adalah karena pengaruh dari unsur stronsium. Penambahan unsur stronsium sebagai *modifier* akan mengakibatkan penurunan energi permukaan pada antarmuka aluminium-silikon solid^[15]. Energi antarmuka yang rendah memudahkan

pendistribusian presipitat menjadi lebih merata^[28], sehingga kondisi *peak-aged* lebih cepat didapat.



BAB 5

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada paduan AC4B normal dan paduan AC4B dengan penambahan 0.108 wt.% Ti dan 0.02 wt.% Sr, secara umum semakin tinggi temperatur perlakuan pelarutan mengakibatkan kekerasan puncak yang didapat semakin tinggi
2. Pada paduan AC4B normal dan paduan AC4B dengan penambahan 0.108 wt.% Ti dan 0.02 wt.% Sr, secara umum semakin lama waktu tahan perlakuan pelarutan mengakibatkan kekerasan puncak yang didapat semakin tinggi
3. Penambahan unsur titanium pada paduan aluminium AC4B memberikan pengaruh meningkatkan kekerasan pada paduan setelah dilakukan proses pengerasan penuaan
4. Penambahan unsur stronsium pada paduan aluminium AC4B mempercepat paduan mencapai puncak kekerasan ketika dilakukan proses pengerasan penuaan
5. Pada paduan AC4B tanpa penambahan 0.108 wt.% Ti dan 0.02 wt.% Sr, kekerasan tertinggi pada waktu tahan selama 30 menit didapat ketika temperatur pelarutan 520°C sebesar 59.58 HRB, dan kekerasan tertinggi pada waktu tahan 120 menit di dapat pada temperatur pelarutan 480°C sebesar 66.10 HRB
6. Pada paduan AC4B dengan penambahan 0.108 wt.% Ti dan 0.02 wt.% Sr, kekerasan tertinggi didapat ketika temperatur pelarutan 520°C pada waktu tahan pelarutan 30 menit sebesar 57.06 HRB, dan kekerasan tertinggi pada waktu tahan 120 menit di dapat pada temperatur pelarutan 520°C sebesar 66.54 HRB
7. Kekerasan puncak tertinggi dari seluruh variabel perlakuan pelarutan pada paduan AC4B tanpa penambahan didapat pada temperatur perlakuan pelarutan sebesar 480°C dan waktu tahan 120 menit dengan kekerasan sebesar 66.10 HRB

8. Kekerasan puncak tertinggi dari seluruh variabel perlakuan pelarutan pada paduan AC4B dengan penambahan 0.108 wt.% Ti dan 0.01 wt.% Sr didapat pada temperatur perlakuan pelarutan 520°C dan waktu tahan 120 menit dengan kekerasan sebesar 66.54 HRB
9. Pada paduan AC4B tanpa penambahan unsur titanium dan stronsium, fasa-fasa yang banyak terbentuk adalah Al-Si, Al₂Cu, dan Al(Mn,Fe)Si.
10. Pada paduan AC4B dengan penambahan 0.108 wt.% Ti dan 0.01 wt.% Sr, fasa-fasa yang terbentuk adalah Al₂Cu, Al-Si, Al(Fe,Mn)Si, dan Si-eutektik.
11. Penambahan unsur titanium dan stronsium pada paduan AC4B mengakibatkan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kekerasan puncak menjadi lebih singkat

5.2 Saran

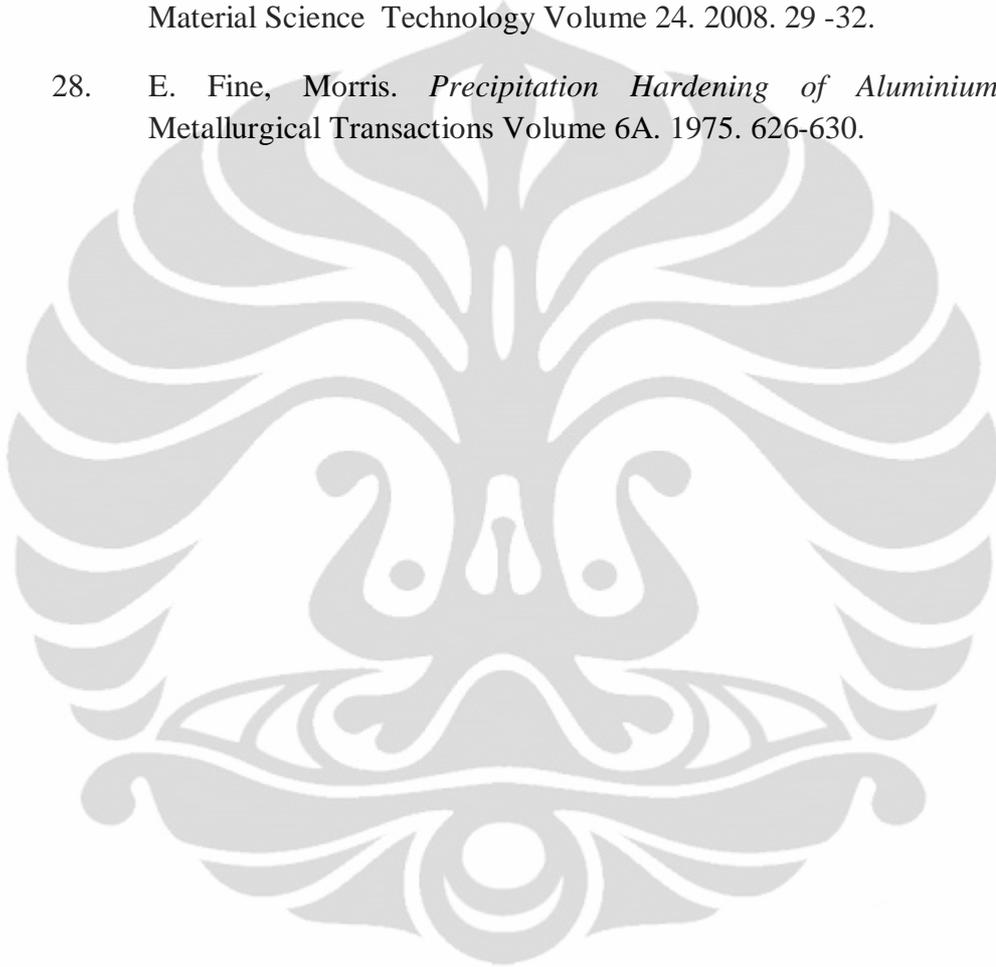
1. Proses *quenching* dilakukan secepat mungkin begitu sampel keluar dari dapur, sehingga semakin banyak *vacancy* yang dapat diperangkap dan kekerasan yang lebih baik lagi bisa didapat ketika dilakukan pengerasan penuaan.
2. Preparasi sampel dengan lebih baik lagi sebelum dilakukan perlakuan pelarutan, karena mengamplas sampel sebelum dilakukan pengujian keras dapat menyebabkan sampel terdeformasi terlebih dahulu, sehingga kekerasan menjadi lebih rendah dari seharusnya.
3. Menggunakan dapur dengan tipe yang sama ketika perlakuan pelarutan dan perlakuan penuaan.
4. Menggunakan *dry ice* ketika sampel akan dipindahkan dari dapur yang digunakan untuk perlakuan pelarutan ke dapur untuk perlakuan penuaan, agar kondisi *Supersaturated Solid Solution* dari sampel benar-benar terjaga.
5. Pengujian kekerasan setelah penuaan sebaiknya dilakukan pada tiap sisi yang berbeda.
6. Melakukan pengujian *Transmission Electron Microscope* (TEM) untuk mengetahui presipitat yang terbentuk dan koherensi dari presipitat.
7. Dilakukan pengawasan secara ketat pada temperatur penuaan selama proses pengerasan penuaan berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

1. <http://astra-honda.com/index.php/about/index/1> diakses pada senin, 8 November 2010, pukul 14.51 WIB
2. Kaufman, Gilbert J, Elwin L. Rooy. *Aluminium Alloy Casting: Properties, Processes, and Applications*. Ohio : ASM Internasional (The Materials Information Society). 2005.
3. Gruzleski, John E & Closset, Bernard M. *The Treatment of Liquid Aluminium – Silicon Alloys*. Illinois : American Foundrymen Society, 1999.
4. Golbahar, Benham. *Effect of Grain Refinement – Modification Interaction on performance of A.356.2 Alloy*. Canada : University of Quebec. 2008.
5. ASM Handbook Volume 2: *Properties and Selection Non-Ferrous Alloy and Special Purpose Material*. 1990. ASTM International
6. Fani Indarto, Mochamad. *Studi Pengaruh Temperatur dan Waktu Tahan Perlakuan Pelarutan Terhadap pengerasan Penuaan Paduan Aluminium AC4B Dengan Kandungan Unsur 0.078 wt.% Ti dan 0.02 wt.% Sr*. Depok : Departemen Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia. 2010.
7. Samuel, A.M. Liu L. Samuel, F.H. Doty. Valtiera. *Characteristic of a dendritic and eutectic structure in Sr treated Al-Si containing Alloy*. Journal of Material Science. 38. 2003. 4507 - 4522.
8. Surdia, Tata & Kenji Chijiwa. *Teknik Pengecoran Logam*. Cetakan kesembilan. Jakarta. Pradnya Paramita. 2006.
9. Suharno, Bambang. *Pengecoran Paduan Aluminium (Aluminium Alloys Casting)*. Departemen Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia. 2007.
10. ASM Handbook, *Casting*, Volume 15. Ohio : ASM International Metals Park. 1992.
11. Hatch, John E. *Aluminium Properties and Physical Metallurgy*. American Society for Metals : Metal Parks, Ohio. 1995.
12. Backeurd, Lennart; Chai, Goucai; Tamminen, Jarmo. *Solidification Characteristics of Aluminium Alloys : Volume 2 Foundry Alloys*. Stockholm : Skan Aluminium. 1990.

13. JIS Handbook. 1977. *Non Ferrous Metals & Metallurgy*. Tokyo: Japanese Standard Association.
14. Bringas, John E. *Nonferrous Metals 4th Edition*. Kanada: CASTI Publishing. 2003.
15. Falah, M. Azi. *Studi Pengaruh Kombinasi Komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti Terhadap Karakteristik Paduan Aluminium AC4B Hasil Proses Low Pressure Die Casting*. Depok : Departemen Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia. 2009.
16. Callister, William D. *Material Science and Engineering An Introduction 6th Edition*. John Wiley & Sons, Inc : New York. 2003.
17. Fuoco, R. Fuoco, E.R Correa, M. de Andrade Bastos. (2001). Microporosity Morphology in A 356 Aluminium Alloy in unmodified and in Sr-modified conditions , AFS Transactions 01-168 (p 1-20) IPT =Technological research Institute-Metallurgy Divison Sao Pauli-Brazil.
18. A.K. Dahle, L. Arnberg, P.A. Tondel, C.J. Paradies, Met. Trans. A 8 (1996) 2305.
19. Jorstad, John.L; Rasmussen, Wayne.M. *Aluminium Casting Technology-2nd edition*. Illinois: The American Foundry Society. 1993.
20. Syafza, Oktafinaldo. *Studi Pemudaran Kombinasi Penambahan 0.07 wt.% Ti dan 0.02 wt.% Sr Pada Paduan AC4B Hasil Low Pressure Die Casting*. Depok : Departemen Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia. 2009.
21. Apelian, D. *Aluminium Cast Alloys : Enabling Tools for Improved Performance*. Illinois : North American Die Casting Assosiation. 2009.
22. Abdulwahab. *Studies of the Mechanical Properties of Age-hardened Al-Si-Fe-Mn Alloy*. Department of Metallurgical and Materials Engineering, Ahmadu Bello University :Zaria:Nigeria. 2008.
23. <http://images.google.co.id/imglanding?q=phase%20diagram%20Al-Cu>
diakses pada senin, 8 November 2010, pukul 14.55 WIB
24. Tillova, E, M. Panuskova. *Effect of Solution Treatment on Intermetallic Phases Morphology in AlSi₉Cu₃ Cast Alloy*. Metalurgija. 47. 2008. 207 – 210.

25. Smallman. R.E. *Metalurgi Fisik Modern edisi keempat* terjemahan Sriati Djaprie, Bustanul Arifin, Myrna A. Gramedia : Jakarta. 1991
26. Murizam. D & J.B. Shamsul. *Effect of Solution Treatment Temperature on Recycled Aluminium Alloy 319*. ICoSM. 2007. 226 – 228.
27. Eidhed, Witthaya. *Effects of Solution Treatment Time and Sr-Modification on Micostructure and Mechanical Properties of Al-Si Piston Alloy*. Journal Material Science Technology Volume 24. 2008. 29 -32.
28. E. Fine, Morris. *Precipitation Hardening of Aluminium Alloys*. Metallurgical Transactions Volume 6A. 1975. 626-630.



Lampiran 1: Hasil Pengujian Kekerasan**Paduan Aluminium AC4B Normal**

T: 480°C t: 30 menit

30 menit							
waktu aging	Kekerasan (HRB)						
	1	2	3	4	5	AVG	S.Dev
0.02	31.2	29.8	30.4	31.2	30.2	30.56	0.6229
0.08333333	30.9	32.1	28.3	34.9	34.2	32.08	2.6518
0.25	33.4	31.3	33.9	32.1	32.8	32.7	1.032
0.5	34.3	32.3	33.5	33.8	35.2	33.82	1.0663
1	34.5	36.5	35.8	35.6	35.3	35.54	0.7301
2	38.8	38.9	39.6	38.2	36.9	38.48	1.0134
4	51.8	48.6	51.5	50.2	52.4	50.9	1.5166
6	46.7	47.9	45.7	49.7	47.8	47.56	1.496
8	38.2	39.2	39.9	41.6	41.4	40.06	1.4484
24	36.3	35.4	33.7	35.1	34.8	35.06	0.945
48	36.9	34.9	33.5	34.2	36.2	35.14	1.4011
72	39.7	34.6	38.4	35.5	34.2	36.48	2.4366
96	34.6	34.8	35.6	35.7	36.8	35.5	0.8718

T: 480°C t: 120 menit

120 menit							
waktu aging	Kekerasan (HRB)						
	1	2	3	4	5	AVG	S.Dev
0.02	30.2	31.2	30.4	29.8	30.3	30.38	0.512
0.08333333	38.3	38.4	36	33	29.8	35.1	3.689
0.25	60	61.4	58.4	54.5	60	58.86	2.659
0.5	62	57.2	60	64.7	55.1	59.8	3.799
1	68.3	63.5	63.3	68.4	67	66.1	2.527
2	58.3	64.7	65.4	65.5	68.2	64.42	3.672
4	61.2	60.4	62.5	60.3	61.6	61.2	0.908
6	59.7	61.2	59.4	60.4	58.9	59.92	0.898
8	58.5	57.3	60.6	60.9	59.8	59.42	1.506
24	47	44.3	51	50.5	50.2	48.6	2.871
48	40.7	42.1	43.6	41.2	42.3	41.98	1.117
72	43.8	37.9	43	43.4	38.1	41.24	2.972
96	31	36.7	38.6	34.5	36.2	35.4	2.861

(Lanjutan)

T: 500°C t: 30 menit

30 menit							
waktu aging	Kekerasan (HRB)						
	1	2	3	4	5	AVG	S.Dev
0.02	29.3	30.1	31.1	30.2	30.1	30.16	0.6387
0.083333333	30.3	31.6	29.1	32.5	30.6	30.82	1.295
0.25	34.8	36.6	34.8	35.6	38.8	36.12	1.6709
0.5	37.7	36.1	35.4	35.4	32.6	35.44	1.8447
1	46.1	43.1	43.9	47.7	47.5	45.66	2.0852
2	44.1	46.1	49.2	47.5	47.9	46.96	1.9437
4	48	53.3	50.2	51	51.3	50.76	1.9191
6	52.9	52.6	50.3	52	53.3	52.22	1.1735
8	57.9	59.9	60.2	56.7	61.3	59.2	1.8601
24	55.9	58.3	50.3	56.1	61.9	56.5	4.2237
48	50	48.3	48.2	50.9	49.7	49.42	1.1563
72	44.1	46	44.4	45.2	44.5	44.84	0.7635
96	39.3	45	45.3	46.8	44.5	44.18	2.8595

T: 500°C t: 120 menit

120 menit							
waktu aging	Kekerasan (HRB)						
	1	2	3	4	5	AVG	S.Dev
0.02	29.8	30.2	28.7	29.2	30.4	29.66	0.70569
0.083333333	42.2	41.8	43.5	43.3	42.5	42.66	0.72319
0.25	47.4	45.5	47.5	45.5	44.5	46.08	1.31605
0.5	50.2	53.1	53.5	52.7	49.5	51.8	1.81934
1	51.4	52.1	53.2	51.6	52.4	52.14	0.71274
2	57.6	56.5	55.4	55.6	55.2	56.06	0.99398
4	58.7	57.4	58.9	59.3	58.6	58.58	0.71204
6	57.1	58.3	58.2	58.5	59.1	58.24	0.72664
8	49.8	49.9	52.3	54.8	51.4	51.64	2.05499
24	46.4	45.6	46.2	48.9	52.8	47.98	2.97523
48	49.2	48.9	48.7	49.8	47.5	48.82	0.84676
72	44.5	43.9	40.6	42.5	44.7	43.24	1.70822
96	40	38.3	36.4	37.2	38.7	38.12	1.38816

(Lanjutan)

T: 520°C t: 30 menit

30 menit							
waktu aging	Kekerasan (HRB)						
	1	2	3	4	5	AVG	S.Dev
0.02	32.7	33.5	32.4	30.1	32.1	32.16	1.2641
0.083333333	53.2	53.3	52.3	50.4	52.2	52.28	1.1649
0.25	60	57.9	59	57.2	57.1	58.24	1.2422
0.5	61.1	61.4	57.4	60.2	57.8	59.58	1.866
1	61.6	56.2	59.4	58.9	61.3	59.48	2.1742
2	61.8	59.1	56.9	60.3	58	59.22	1.9176
4	57.7	58.2	58.4	57.8	59.4	58.3	0.6782
6	58.2	57.9	58.2	56.7	57.2	57.64	0.6656
8	56.7	56	54.3	55.6	53.5	55.22	1.2988
24	51.9	53.5	52.4	55.3	53.8	53.38	1.3255
48	41.4	39.4	39.6	43.4	39.7	40.7	1.7088
72	35.9	38.5	45.8	46.8	35.1	40.42	5.5242
96	34.2	39.1	37.5	40.5	38.2	37.9	2.3527

T: 520°C t: 120 menit

120 menit							
waktu aging	Kekerasan (HRB)						
	1	2	3	4	5	AVG	S.Dev
0.02	28.8	29.2	28.5	26.9	27.5	28.18	0.952365
0.083333333	49.5	46.7	48.7	46.7	47.9	47.9	1.232883
0.25	56.9	57.5	55.1	57.7	57.8	57	1.118034
0.5	59.4	58.5	60	59.6	59.7	59.44	0.568331
1	58.8	56.9	58.9	59.7	58	58.46	1.059717
2	60.4	59.3	58.7	59.5	59.5	59.48	0.609918
4	60.2	57.7	59.1	55.5	59.5	58.4	1.860108
6	60.2	56.4	57.2	59	57.1	57.98	1.569076
8	55.1	54.4	56.3	53.5	55.4	54.94	1.054988
24	54.2	55.6	53.7	53.6	55.3	54.48	0.920326
48	47.7	42.8	45.2	45.8	45.6	45.42	1.752712
72	34.9	48.9	37.7	40.1	37.9	39.9	5.359104
96	38.7	36.5	38.8	35.1	36.8	37.18	1.570669

Paduan Aluminium AC4B dengan penambahan 0.108 wt.% Ti dan 0.02 wt.% Sr

T: 480°C t: 30 menit

30 menit							
waktu aging	Kekerasan (HRB)						
	1	2	3	4	5	AVG	S.Dev
0.02	36.2	36.6	34.2	35.5	32.8	35.06	1.5582
0.08333333	35.7	37.2	36.3	37.6	37.3	36.82	0.7918
0.25	39.1	38.8	39.9	37.7	39	38.9	0.7906
0.5	41.5	43.5	44.2	43.8	43.5	43.3	1.0464
1	44.4	48.2	45.2	44.3	48.6	46.14	2.0971
2	53.8	51.7	55.2	52.5	55.8	53.8	1.7364
4	45	46.7	45.5	46.5	45.6	45.86	0.7162
6	38	40.1	39.5	37.6	37	38.44	1.3088
8	41.7	40.9	42.1	40.9	41.7	41.46	0.5367
24	37.5	39.7	35.4	39.5	37.4	37.9	1.7649
48	35.7	37.2	37.5	37.7	34.4	36.5	1.4124
72	34.4	34.2	38.2	36.6	40.5	36.78	2.6556
96	38.2	35.7	36.1	36	37.2	36.64	1.0407

T: 480°C t: 120 menit

120 menit							
waktu aging	Kekerasan (HRB)						
	1	2	3	4	5	AVG	S.Dev
0.02	32.1	32	33.2	34.1	35.5	33.38	1.465
0.08333333	43.7	42.2	36	36.1	38.6	39.32	3.514
0.25	42.2	42.4	45.5	42.4	44.6	43.42	1.524
0.5	56.9	60	55.1	57.8	60.3	58.02	2.176
1	54.6	58.2	50.5	53.2	54.8	54.26	2.792
2	52.7	54.3	50.8	50.9	53.8	52.5	1.614
4	49.3	50.6	51.8	51.8	51.5	51	1.07
6	44	46.5	43.7	44.2	42.6	44.2	1.427
8	44.6	42.3	43	42.4	40.3	42.52	1.545
24	39.6	41.8	40.9	39.4	39.6	40.26	1.048
48	42.7	41.8	40.6	37.6	39.3	40.4	2.021
72	38.8	38.7	40.9	41.4	40.9	40.14	1.286
96	37.9	38	35.2	39.2	38.6	37.78	1.534

(Lanjutan)

T: 500°C t: 30 menit

30 menit							
waktu aging	Kekerasan (HRB)						
	1	2	3	4	5	AVG	S.Dev
0.02	27.8	29.2	35.1	30.8	29.7	30.52	2.7779
0.083333333	40.2	36.5	34.8	39	37.4	37.58	2.11
0.25	46.6	45.2	47.7	40.5	41.5	44.3	3.1599
0.5	51.9	51	55.8	55.8	48.8	52.66	3.0803
1	50.9	48.1	47.4	47.9	48	48.46	1.3903
2	50.5	54.2	51.8	49.2	45.4	50.22	3.2668
4	42.2	44.8	47.3	43.6	47.4	45.06	2.2843
6	41.9	42.2	41.9	39.8	39	40.96	1.4571
8	37.5	37.7	37.2	38.2	38.6	37.84	0.5595
24	36.8	33.5	34.7	34	34.9	34.78	1.2598
48	32.3	37.5	36.5	36	36.3	35.72	1.993
72	36.6	35.8	37.2	34.5	34.1	35.64	1.3278
96	36.8	36.6	34.1	34.1	35	35.32	1.3142

T: 500°C t: 120 menit

120 menit							
waktu aging	Kekerasan (HRB)						
	1	2	3	4	5	AVG	S.Dev
0.02	42.3	45.6	40.6	45.5	42	43.2	2.23942
0.083333333	56.4	55.7	55.5	55.9	54.6	55.62	0.66106
0.25	57.6	59.2	57.7	59.3	59.1	58.58	0.85264
0.5	58	60.4	60.1	60	59.8	59.66	0.95289
1	58.5	56.4	57.4	53.7	53.7	55.94	2.17555
2	58.1	55.2	55.5	55.3	52.9	55.4	1.84391
4	56.1	46.7	49.4	54.8	50.3	51.46	3.90295
6	45.7	45.9	50.9	48.8	51	48.46	2.58322
8	41.3	43.4	47.1	47.3	46	45.02	2.59557
24	44	47.7	41.4	47	44.3	44.88	2.53318
48	45.7	43.6	40.4	45.6	46	44.26	2.35754
72	45.6	42.9	42.1	44.2	45	43.96	1.45017
96	41.6	43.1	41.6	37.3	42.8	41.28	2.32744

(Lanjutan)

T: 520°C t: 30 menit

30 menit							
waktu aging	Kekerasan (HRB)						
	1	2	3	4	5	AVG	S.Dev
0.02	29.1	31.6	32.3	31.5	28.4	30.58	1.7167
0.083333333	37.8	36.4	37.2	35.9	37	36.86	0.7335
0.25	43.4	45.2	41.5	44	44.4	43.7	1.3928
0.5	56.9	57	56.7	59.4	55.3	57.06	1.4775
1	55.8	55.6	53.6	55.3	53.3	54.72	1.1777
2	53.7	52.8	55.5	56.7	53.5	54.44	1.6087
4	53.4	56	52.9	52.9	54	53.84	1.2896
6	54	54.5	51.5	52.2	55.5	53.54	1.6532
8	55.7	47.6	47.7	51.9	49.3	50.44	3.4158
24	48.6	48.8	47.7	49.1	52.3	49.3	1.7564
48	45.2	47.1	43.3	44.3	45.1	45	1.4
72	39.1	37.8	39	37.1	41.5	38.9	1.6778
96	36.5	34.2	38	36.9	35.8	36.28	1.4096

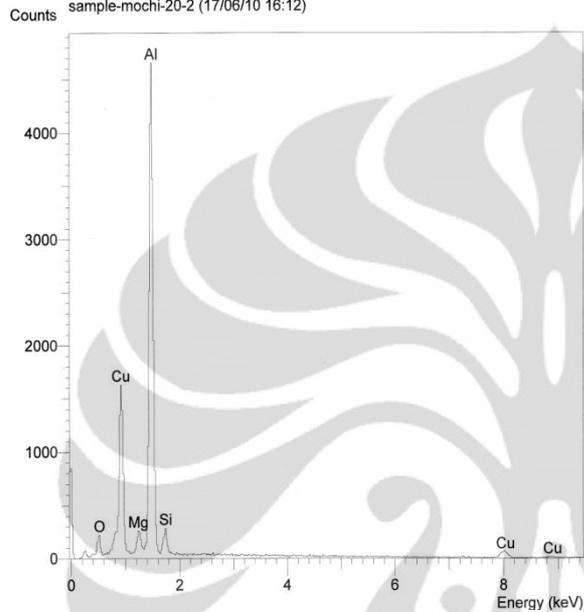
T: 520°C t: 120 menit

120 menit							
waktu aging	Kekerasan (HRB)						
	1	2	3	4	5	AVG	S.Dev
0.02	36.7	38.9	42.7	42.7	43.4	40.88	2.931211
0.083333333	55.7	54.3	54.6	55.6	51.5	54.34	1.700882
0.25	58.9	54.9	54.6	56.6	59	56.8	2.105944
0.5	60.3	63	63	59.3	56	60.32	2.91839
1	68.2	65.4	67.5	65	66.6	66.54	1.355729
2	63	63.3	62.7	61.3	61.7	62.4	0.860233
4	66	63.6	61.1	59.2	59.1	61.8	2.975735
6	63.1	57.5	56.8	58.1	58.5	58.8	2.487971
8	58.3	58.4	54.2	57.2	53.8	56.38	2.227555
24	53	53.7	53.4	56.8	56.4	54.66	1.793878
48	52.6	49.1	51.9	50.6	48.9	50.62	1.645296
72	52.1	48.6	47.3	49.1	48.8	49.18	1.771158
96	45.2	47.3	46.4	48.1	47.1	46.82	1.089495

Lampiran 2: Hasil Pengujian SEM-EDX

Paduan Aluminium AC4B Normal

Operator : zakiyuddin
 Client : Dept. Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job : Energy Dispersive X-Ray Analysis
 sample-mochi-20-2 (17/06/10 16:12)



SEMQuant results. Listed at 16:14:07 on 17/06/10
 Operator: zakiyuddin
 Client: Dept. Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis
 Spectrum label: sample-mochi-20-2

System resolution = 60 eV

Quantitative method: ZAF (3 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: -0.02 keV

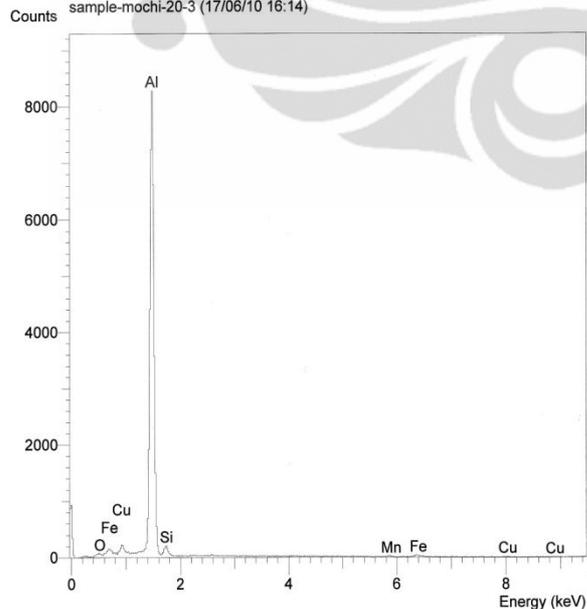
Standards :

O K AL203 17/11/09
 Mg K MagOxide 22/03/06
 Al K AL203 17/11/09
 Si K Low Carbon Steel 13/09/06
 Cu K Copper 22/03/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	2.34	5.43
Mg K	ED	1.00	1.53
Al K	ED	44.02	60.73
Si K	ED	1.98	2.63
Cu K	ED	50.66	29.67
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma

Operator : zakiyuddin
 Client : Dept. Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job : Energy Dispersive X-Ray Analysis
 sample-mochi-20-3 (17/06/10 16:14)



SEMQuant results. Listed at 16:16:33 on 17/06/10
 Operator: zakiyuddin
 Client: Dept. Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis
 Spectrum label: sample-mochi-20-3

System resolution = 62 eV

Quantitative method: ZAF (3 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: -0.02 keV

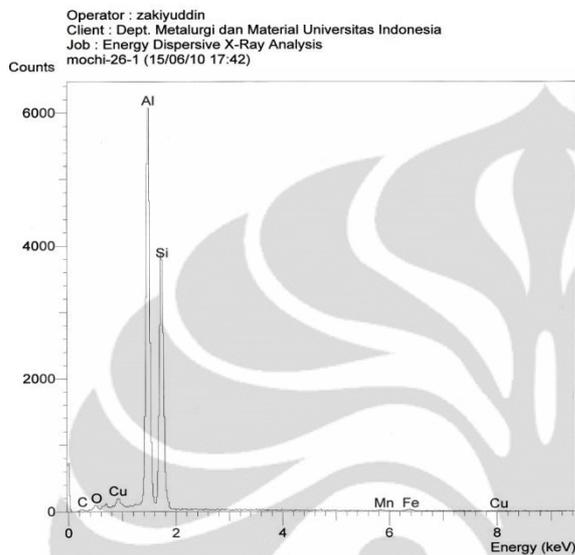
Standards :

O K AL203 17/11/09
 Al K AL203 17/11/09
 Si K Low Carbon Steel 13/09/06
 Mn K Mangan 02 13/09/06
 Fe K FeS2 22/03/06
 Cu K Copper 22/03/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	1.01	1.85
Al K	ED	80.06	87.23
Si K	ED	2.81	2.94
Mn K	ED	2.60	1.39
Fe K	ED	5.31	2.80
Cu K	ED	8.21	3.80
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma

(Lanjutan)



SEMQuant results. Listed at 23:14:26 on 18/06/10
Operator: zakiyuddin
Client: Dept. Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis
Spectrum label: mochi-26-1

System resolution = 62 eV

Quantitative method: ZAF (3 iterations).
Analysed all elements and normalised results.

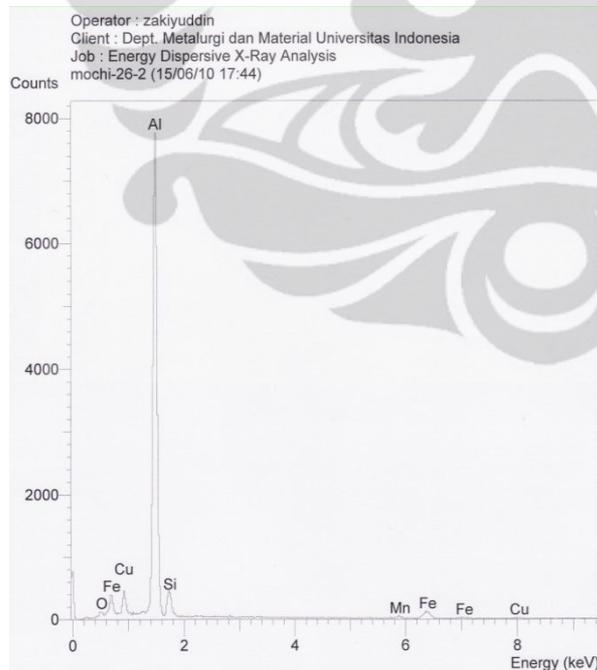
1 peak possibly omitted: -0.02 keV

Standards :

C K	Carbon Low 13/09/06
O K	AL203 17/11/09
Al K	AL203 17/11/09
Si K	Low Carbon Steel 13/09/06
Mn K	Mangan 02 13/09/06
Fe K	FeS2 22/03/06
Cu K	Copper 22/03/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	1.20	2.85
O K	ED	0.75	1.33
Al K	ED	51.58	54.31
Si K	ED	36.22	36.63
Mn K	ED	1.18	0.61
Fe K	ED	3.56	1.81
Cu K	ED	5.51*	2.46*
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma



SEMQuant results. Listed at 23:15:06 on 18/06/10
Operator: zakiyuddin
Client: Dept. Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis
Spectrum label: mochi-26-2

System resolution = 62 eV

Quantitative method: ZAF (3 iterations).
Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: -0.02 keV

Standards :

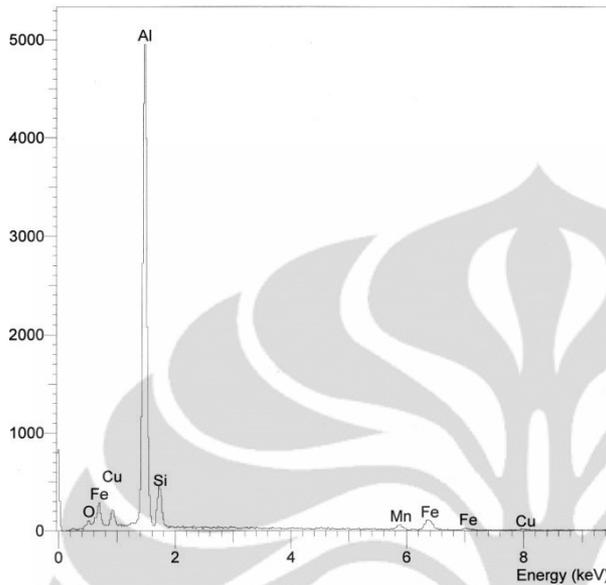
O K	AL203 17/11/09
Al K	AL203 17/11/09
Si K	Low Carbon Steel 13/09/06
Mn K	Mangan 02 13/09/06
Fe K	FeS2 22/03/06
Cu K	Copper 22/03/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	1.31	2.64
Al K	ED	63.12	75.52
Si K	ED	4.04	4.65
Mn K	ED	2.59	1.52
Fe K	ED	13.89	8.03
Cu K	ED	15.05	7.65
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma

(Lanjutan)

Operator : zakiyuddin
 Client : Dept. Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job : Energy Dispersive X-Ray Analysis
 mochi-Y-2 (15/06/10 15:21)



SEMQuant results. Listed at 23:06:34 on 18/06/10
 Operator: zakiyuddin
 Client: Dept. Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis
 Spectrum label: mochi-Y-2

System resolution = 62 eV

Quantitative method: ZAF (3 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: -0.02 keV

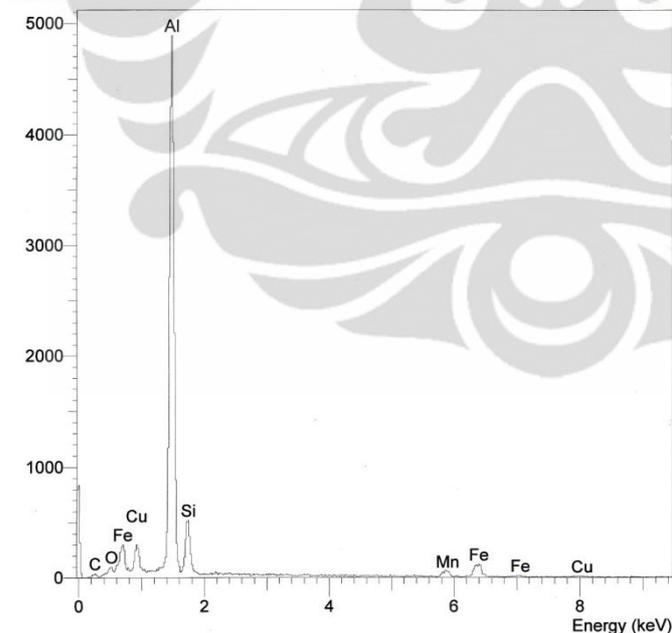
Standards :

O K AL2O3 17/11/09
 Al K AL2O3 17/11/09
 Si K Low Carbon Steel 13/09/06
 Mn K Mangan 02 13/09/06
 Fe K FeS2 22/03/06
 Cu K Copper 22/03/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	1.42	2.90
Al K	ED	58.45	71.01
Si K	ED	5.38	6.28
Mn K	ED	6.49	3.87
Fe K	ED	19.06	11.19
Cu K	ED	9.20	4.75
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma

Operator : zakiyuddin
 Client : Dept. Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job : Energy Dispersive X-Ray Analysis
 mochi-Y-3 (15/06/10 15:23)



SEMQuant results. Listed at 23:07:19 on 18/06/10

Operator: zakiyuddin
 Client: Dept. Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis
 Spectrum label: mochi-Y-3

System resolution = 62 eV

Quantitative method: ZAF (3 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: -0.02 keV

Standards :

C K Carbon Low 13/09/06
 O K AL2O3 17/11/09
 Al K AL2O3 17/11/09
 Si K Low Carbon Steel 13/09/06
 Mn K Mangan 02 13/09/06
 Fe K FeS2 22/03/06
 Cu K Copper 22/03/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	0.94	2.58
O K	ED	0.65	1.35
Al K	ED	56.14	68.40
Si K	ED	5.68	6.65
Mn K	ED	7.44	4.46
Fe K	ED	20.92	12.31
Cu K	ED	8.23*	4.26*
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma