

***ANALISIS PENGARUH ARTIFICIAL AGING  
TERHADAP SIFAT MEKANIS PADA ALUMINIUM SERI 6061***

(Skripsi)

Oleh  
NUR IMAM SUBAGYO



JURUSAN TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2017

## ABSTRAK

### ANALISIS PENGARUH *ARTIFICIAL AGING* TERADAP SIFAT MEKANIS PADA ALUMINIUM SERI 6061

OLEH

NUR IMAM SUBAGYO

Penelitian proses *artificial aging* terhadap aluminium seri 6061 bertujuan untuk memperbaiki sifat mekanisnya. Aluminium seri 6061 diberi perlakuan panas dengan suhu 450<sup>0</sup>C selama 15 menit, kemudian *diquenching* dengan media pendingin berupa oli. Selanjutnya diberi perlakuan panas kembali pada suhu 190<sup>0</sup>C dengan variasi *holding time* 1 jam, 5 jam, dan 11 jam, kemudian didinginkan secara lambat dengan suhu ruangan. Hasil uji komposisi kimia menggunakan *Spectromax* menunjukkan persentase Mg sebesar 1,41%, Si sebesar 0,911%, dan Al sebesar 96,7%. Hasil uji kekerasan menggunakan *Rockwell Hardness Tester* didapatkan nilai kekerasan bahan tanpa perlakuan panas sebesar 49,4 (HRB), *holding time* 1 jam sebesar 53,8 (HRB), *holding time* 5 jam sebesar 79,6 (HRB) dan *holding time* 11 jam sebesar 50,4 (HRB). Dari hasil uji SEM EDX menggunakan alat *Zeiss Evo* ® MA 10, menunjukkan persentase unsur Al dari bahan tanpa perlakuan panas (96,7%) menurun terhadap bahan dengan *holding time* 1 jam (89,55%), dan bahan dengan *holding time* 5 jam (81,58%) penurunan tersebut menunjukkan terdapat fasa kedua pada bahan yang diberi perlakuan *artificial aging*.

Kata kunci : Aluminium Seri 6061, *Artificial aging*, Kekerasan, SEM EDX

## **ABSTRACT**

### **ARTIFICIAL AGING EFFECT ANALYSIS ON MECHANICAL PROPERTIES IN ALUMINUM SERIES 6061**

**BY**

**NUR IMAM SUBAGYO**

Research of artificial aging process on aluminum series 6061 is required to improve the mechanical properties of it. Aluminum 6061 series had heat treatment with temperature 450<sup>0</sup>C for 15 minutes, then quenching it with medium oil cooler. Furthermore, the aluminum itself had heat treatment for the second time at 190<sup>0</sup>C with a holding time variation of 1 hour, 5 hours, and 11 hours, then cooled slowly with room temperature. The result of chemical composition test using Spectromax showed Mg percentage of 1.41%, Si 0.911%, and Al of 96.7%. Result of hardness test using Rockwell Hardness Tester got hardness value material without heat treatment equal to 49,4 (HRB), holding time 1 hour equal to 53,8 (HRB), holding time 5 hour equal to 79,6 (HRB) and holding time 11 hours of 50.4 (HRB). SEM EDX result showed test using Zeiss Evo ® MA 10 tool, obtained percentage of Al element from material without heat treatment (96,7%) decrease to material with holding time 1 hour (89,55%), and material with holding time 5 hour (81.58%) the decrease indicates that there is a second phase in the artificial aging treated material.

Keywords: Aluminum Series 6061, Artificial aging, Violence, SEM EDX

***ANALISIS PENGARUH ARTIFICIAL AGING  
TERADAP SIFAT MEKANIS PADA ALUMINIUM SERI 6061***

**Oleh**

**NUR IMAM SUBAGYO**

**Skripsi**

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar  
SARJANA TEKNIK**

**Pada**

**Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknik**



**JURUSAN TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2017**

**Judul Skripsi : ANALISIS PENGARUH ARTIFICIAL AGING TERHADAP SIFAT MEKANIS PADA ALUMINIUM SERI 6061**

**Nama Mahasiswa : Nur Imam Subagyo**

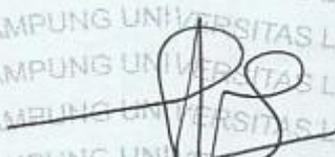
**Nomor Pokok Mahasiswa : 1215021061**

**Jurusan : Teknik Mesin**

**Fakultas : Teknik**

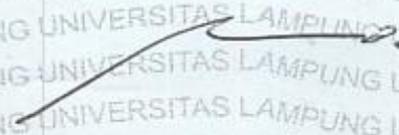
**MENYETUJUI**

**1. Komisi Pembimbing**

  
**Zulhanif, S.T., M.T.**  
NIP 19730402 200003 1 002

  
**Harnowo Supriadi, S.T., M.T.**  
NIP 19690909 199703 1 002

**2. Ketua Jurusan Teknik Mesin**

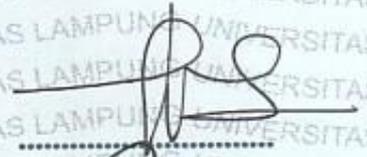
  
**Ahmad Su'udi, S.T., M.T.**  
NIP 19740816 200012 1 001

**MENGESAHKAN**

1. **Tim Penguji**

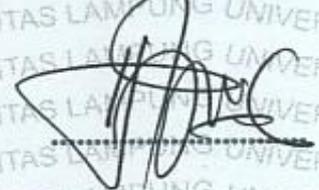
**Ketua**

**: Zulhanif, S.T., M.T.**



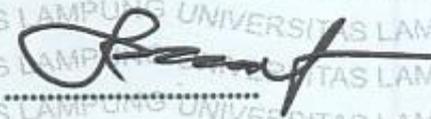
**Anggota Penguji**

**: Harnowo Supriadi, S.T., M.T.**



**Penguji Utama**

**: Dr. Sugiyanto, M.T.**



2. **Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**Prof. Suharno, M.S., M.Sc., Ph.D.**

**NIP-19620717 198703 1 002**



**Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 03 Oktober 2017**

## PERNYATAAN PENULIS

SKRIPSI INI DIBUAT SENDIRI OLEH PENULIS DAN BUKAN HASIL  
PLAGIAT SEBAGAIMANA DIATUR DALAM PASAL 27 PENGATURAN  
AKADEMIK UNIVERSITAS LAMPUNG DENGAN SURAT KEPUTUSAN  
REKTOR No. 3187/H26/DT/2010

YANG MEMBUAT PERNYATAAN

METERAI  
TEMPEL  
3A728AEF729215689

6000  
ENAM RIBURUPIAH

  
NUR IMAM SUBAGYO

NPM. 1215021061

## RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Metro pada tanggal 15 Maret 1994. Anak dari pasangan Bapak Somdani dengan Ibu Teguh Wardiningsih yang merupakan putra ke 3 dari 4 bersaudara. Penulis menyelesaikan Sekolah Dasar di SD Negeri 4 Metro Timur, Kota Metro pada tahun 2006, menyelesaikan pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 2 Metro Timur, Kota Metro pada tahun 2009, kemudian penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 3 Metro Utara, Kota Metro pada tahun 2012, dan pada tahun 2012 tersebut penulis terdaftar sebagai mahasiswa Teknik Mesin Universitas Lampung melalui jalur PMPAP.

Selama penulis menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam beberapa organisasi tingkat jurusan dan fakultas. Adapun penulis pernah menjabat sebagai sekertaris bidang danus pada masa kepengurusan HIMATEM periode 2013-2014, dan pada tahun 2014-2015 penulis menjabat sebagai Pimpinan Umum di UKMF-BKT CREMONA Fakultas Teknik Universitas Lampung.

Pada bidang akademik, penulis melaksanakan kerja Praktik (KP) di LIPI-Metalurgi Serpong, Tangerang Selatan pada tahun 2015. Pada tahun 2016 hingga 2017 penulis melakukan penelitian pada bidang material dengan judul skripsi “Analisis Pengaruh Artificial Aging Terhadap Sifat Mekanis Pada Aluminium Seri 6061” dbawah bimbingan Zulhanif, S.T., M.T. dan Bapak Harnowo Supriadi, S.T., M.T.

Bandar Lampung, 03 Oktober 2017

Nur Imam Subagyo

## MOTTO

“Berjuang, Berdoa, dan Bersabar”

**“Kesabaran Itu Dapat Menolong Segala Pekerjaan”**

**Bismillahirrohmanirrohim**

Kuniatkan Karya ku ini karena :

**Allah SWT**

Aku persembahkan karya ku ini untuk :

Kedua orang tuaku, ayukku, adikku, serta keluargaku yang selalu mendo'akanku  
serta menyemangatiku tiada henti sepanjang hidupku

Dosen-dosenku dan guru-guruku yang mengajarkan banyak ilmu serta nasehat  
yang selalu menyertaiku dalam proses pembelajaran.

Teman seperjuanganku

Almamater tercinta :

Universitas Lampung

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT, yang telah memberikan kesehatan dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “**Analisis Pengaruh *Artificial Aging* Terhadap Sifat Mekanis Pada Aluminium Seri 6061**”. Tujuan penulisan skripsi ini adalah sebagai salah satu persyaratan untuk mendapat gelar S1 dan melatih mahasiswa untuk berfikir cerdas dan kreatif dalam menulis karya ilmiah.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Akhir kata semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua.

Bandar lampung, 03 Oktober 2017  
Penulis,

**Nur Imam Subagyo**

## SANWACANA

### **Assalamu'ailaikum Wr. Wb.**

Segala puji dan rasa syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunianya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Sholawat serta salam semoga tetap tercurahkan kepada nabi besar Muhammad SAW, yang selalu penulis harapkan syafa'atnya yaumul akhir nanti. Skripsi ini merupakan salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana teknik, dan judul dari skripsi ini adalah *ANALISIS PENGARUH ARTIFICIAL AGING TERADAP SIFAT MEKANIS PADA ALUMINIUM SERI 6061*. Di dalam penyusunan skripsi ini penulis banyak mendapat bantuan dari berbagai pihak, oleh karena itu penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih kepada :

1. Bapak Somdani dan Ibu Teguh Wardiningsih yang selalu memberikan dukungan, doa, dan rasa cinta serta kasih sayang kepada penulis selama ini.
2. Bapak Ahmad Su'udi, S.T.,M.T. sebagai ketua jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
3. Bapak Zulhanif, S.T., M.T dan bapak Harnowo Supriadi S.T., M.T. sebagai dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, dorongan, arahan, serta saran kepada penulis selama melaksanakan penelitian maupun dalam penulisan skripsi ini.
4. Bapak Dr. Sugianto, M.T sebagai dosen pembahas yang telah bersedia membahas, serta memberikan saran kepada penulis setelah melaksanakan seminar proposal hingga sidang kompre

5. Yuk susi, Yuk Nanung, dan Edo, ayuk dan adik penulis yang senantiasa memberikan dukungan dan doa sehingga laporan kerja praktek ini terselesaikan.
6. Rabi'ah Surrianingsih yang senantiasa memberikan saran, dukungan, dan doa selama penulis melakukan penelitian, dan menulis skripsi ini hingga terselesaikan.
7. Kiki Eko Suwanto C.S.T terimakasih telah senantiasa menemani dan memberikan segala bantuan terhadap penulis selama melakukan penelitian hingga selesai.
8. Komti dedi, Heru isworo, Ucup 'kenyot', Dhika emon, Pak Haji Farid, Wakhid van java dan Bang Hotman, terimakasih untuk segala bantuan dan saran selama penulis melakukan penelitian, seminar proposal hingga sidang kompre.
9. Untuk teman-teman Teknik Mesin 2012, Wafdanadhira, A.N. Wisastra, dan Intan Sunaryo Putri sebagai mutiara Mesin 12 dan teman-teman lainnya yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu dan untuk seluruh civitas akademika jurusan Teknik Mesin.

Disini penulis menyadari sepenuhnya bahwa skripsi ini jauh dari sempurna, oleh karena itu penulis sangat terbuka terhadap saran dan kritik yang bersifat membangun, akhir kata penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat khususnya untuk penulis pribadi dan umumnya bagi semua orang yang membacanya.

Bandar Lampung, 2017

Nur Imam Subagyo

## DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK.....	i
ABSTRACT.....	ii
HALAMAN JUDUL.....	iii
LEMBAR PERSETUJUAN.....	iv
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
PERNYATAAN.....	vi
RIWAYAT HIDUP.....	vii
MOTTO.....	viii
PERSEMBAHAN.....	ix
KATA PENGANTAR.....	x
SANWACANA.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
I. PENDAHULUAN	
A. Latar Belakang.....	1
B. Tujuan.....	4
C. Batasan Masalah.....	4
D. Sistematika Penulisan.....	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	
A. <i>Heat Treatment</i> .....	7
B. <i>Precipitation Hardening</i> (Pengerasan Presipitasi).....	12
C. Aluminium.....	19

<i>D. Electron Microscopy</i> .....	31
<i>E. Uji Kekerasan</i> .....	34
III. METODOLOGI PENELITIAN	
A. Alat dan Bahan.....	40
B. Diagram Alir Penelitian.....	46
C. Waktu dan Tempat Penelitian.....	48
D. Tabel Data Pengujian Yang Akan Dilakukan.....	49
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	
A. Data Dan Pembahasan Uji Komposisi Kima Bahan.....	52
B. Data Dan Pembahasan Uji Kekerasan.....	54
C. Data Dan Pembahasan Uji SEM EDX.....	58
V. KESIMPULAN DAN SARAN	
A. Kesimpulan.....	67
B. Saran.....	68

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Diagram untuk temperatur <i>Normalizing</i> .....	9
Gambar 2. <i>Isothermal Tranformation Diagram</i> .....	10
Gambar 3. <i>Continuos Cooling Transformation Diagram</i> .....	11
Gambar 4. Diagram fase pemanasan logam paduan.....	13
Gambar.5. Diagram perubahan fasa pada proses <i>artificial aging</i> .....	15
Gambar 6. Hubungan Antara Lamanya Waktu ( <i>aging</i> ) Dengan Kekuatan dan Kekerasan Paduan Aluminium.....	17
Gambar 7. (a) <i>supersaturated solute solution</i> , (b) fasa " " mulai terbentuk <i>precipitate (Al-Cu)</i> , (c) fasa keseimbangan <i>Al-Cu</i> .....	18
Gambar. 8. <i>Schematic temperature versus time plot showing both solution and precipitation heat treatment for precipitation hardening</i> .....	19
Gambar. 9. Diagram fasa biner semu $Mg_2Si$ .....	30
Gambar.10. Alat <i>Scanning Electron Microscopy (SEM)</i> .....	32
Gambar.11. Skema bagian-bagian alat uji SEM.....	33
Gambar.12. (a) Hasil Uji OM, (b) Hasil Uji SEM.....	34
Gambar 13. Prinsip Kerja Metode Pengukuran Kekerasan Rockwell.....	37
Gambar 14. Tungku <i>furnace</i> di laboratorium material Universitas Lampung.....	40
Gambar 15. Alat uji kekerasan.....	41
Gambar 16. <i>Optical emission spectrometer spectromax</i> .....	42
Gambar 17. Amplas.....	43
Gambar 18. Gerinda pemotong.....	43
Gambar 19. Alat SEM EDX ( <i>Scanning Electron Microscope</i> ).....	44
Gambar 20. Aluminium seri 6061.....	45
Gambar 21. Oli bekas.....	45
Gambar 22. Diagram alir penelitian.....	47
Gambar 23. Potongan bahan pengujian komposisi kimia.....	52

Gambar 24. Bahan yang digunakan dalam proses uji kekerasan.....	55
Gambar 25. Grafik perbandingan nilai kekerasan tanpa laku panas dengan <i>quenching</i> .....	56
Gambar 26. Grafik perbandingan nilai kekerasan tanpa laku panas dengan perlakuan <i>artificial aging</i> .....	57
Gambar 27. Dudukan atau alas bahan uji pada alat SEM.....	59
Gambar 28. Hasil uji SEM pada bahan dengan <i>holding time</i> 1 jam.....	61
Gambar 29. Hasil uji SEM pada bahan dengan <i>holding time</i> 5 jam.....	62
Gambar 30 .Hasil uji SEM dan grafik EDX pada bahan uji dengan <i>holding time</i> 1 jam.....	63
Gambar 31 .Hasil uji SEM dan grafik EDX pada bahan uji dengan <i>holding time</i> 5 jam.....	65

## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Sifat mekanik aluminium.....	22
Tabel 2. Klasifikasi paduan tempa aluminium, mekanisme penguatan, dan rentang nilai kekuatannya.....	23
Tabel 3. Klasifikasi paduan aluminium.....	24
Tabel 4. Klasifikasi paduan aluminium tempaan dengan unsur paduan utamanya.....	24
Tabel 5. Klasifikasi paduan aluminium berdasarkan perlakuan bahan.....	25
Tabel 6. Komposisi kimia aluminium seri 6061.....	30
Tabel 7. Skala kekerasan metode pengujian <i>rockwell</i> .....	36
Tabel 8. Skala kekerasan dan pemakaiannya.....	37
Tabel 9. <i>Time Schedule</i> .....	48
Tabel 10. Data hasil uji kekerasan yang akan dilakukan.....	49
Tabel 11. Data hasil pengujian komposisi kima bahan.....	53
Tabel 12. Perbandingan nilai kekerasan antara tanpa perlakuan panas dan proses <i>quenching</i> .....	55
Tabel 13. Perbandingan nilai kekerasan antara tanpa perlakuan panas dan proses <i>artificial aging</i> .....	56

## I. PENDAHULUAN

### A. Latar Belakang

Di era perkembangan teknologi yang semakin canggih membuat beragam fasilitas berupa alat maupun komponen industri semakin berkualitas, demi mempermudah berbagai macam kegiatan manusia sebagai pengguna teknologi tersebut. Dalam dunia industri saat ini pemilihan bahan dan proses dalam pembuatan sebuah produk yang diproduksi oleh sebuah perusahaan harus sesuai dengan fungsi dan tujuan diproduksinya produk tersebut . Dengan demikian seorang konsumen akan merasa puas dalam menggunakan produk hasil produksi perusahaan tersebut karena kualitas yang dicapai sesuai.

Ada berbagai jenis material yang dapat digunakan oleh perusahaan dalam pembuatan sebuah produk, salah satu material yang banyak diaplikasikan dalam kehidupan sehari-hari adalah aluminium. Pengaplikasian dari aluminium itu sendiri tidak hanya dalam kebutuhan rumah tangga akan tetapi hingga kepada kebutuhan otomotif maupun kebutuhan pesawat terbang yang selalu dituntut memiliki teknologi yang semakin canggih. Hal ini disebabkan karena logam ini mempunyai beberapa kelebihan, seperti : ratio terhadap beban yang tinggi (*high strength to weight ratio*), ringan (*light*), tahan terhadap korosi dari berbagai macam bahan kimia (*resistence to coorosion by many chemicals*), konduktifitas panas dan listrik tinggi (*high thermal and electrical conductivity*), tidak beracun (*non- toxicity*), memantulkan cahaya (*reflectivity*), mudah dibentuk dan dimachining (*esay of formability and machinability*) dan tidak bersifat magnet (*no magnetic*).

Aluminium itu sendiri adalah logam yang memiliki kekuatan yang relatif rendah dan lunak. Aluminium merupakan logam yang ringan dan memiliki ketahanan korosi yang baik, hantaran listrik yang baik dan sifat - sifat lainnya. Umumnya aluminium dicampur dengan logam lainnya sehingga membentuk aluminium paduan. Penambahan unsur paduan terhadap aluminium dapat dilakukan untuk meningkatkan kekuatan fisis dan mekanis logam tersebut.

Seperti yang telah disampaikan oleh Surdia pada tahun 1995 bahwa paduan antara aluminium dan magnesium (Al-Mg) yang mempunyai ketahanan korosi yang sangat baik. Sejak lama, paduan ini disebut dengan hidronalium dan dikenal sebagai paduan yang tahan korosi. Jika sedikit magnesium ditambahkan pada aluminium, maka pengerasan penuaan akan sangat jarang terjadi. Dan pada paduan aluminium silikon (Al-Si) sangat baik kecairan nya, mempunyai permukaan yang baik, tanpa kegetasan panas, dan sangat baik untuk paduan coran. Silikon juga mempunyai ketahanan korosi yang baik, ringan, koefisien pemuaian yang kecil, serta sebagai penghantar listrik yang baik.

Zhang dan kawan-kawan mendemonstrasikan bahwa proses *artificial aging* umumnya dilakukan pada temperatur rendah dan dalam waktu yang cukup lama, bervariasi antara 5 sampai 48 jam. Pemilihan dalam jangka waktu berapa proses tersebut seharusnya dilakukan haruslah diperhitungkan secara cermat. Hal itu disebabkan karena waktu dilakukannya proses *aging* dapat menyebabkan perbedaan pada jenis, fraksi volume, ukuran dan distribusi partikel endapan, yang pada akhirnya dapat mempengaruhi struktur akhir dan menghasilkan sifat mekanik yang berbeda. Paduan Al-Mg-Si dengan *solution treatment* pada suhu 540°C selama 10 menit dan setelah beberapa jam maka dicapai kekuatan tarik puncak 90%. Kenaikan waktu tahan *solution treatment* sampai 30 menit maka cukup waktu untuk mikrostruktur berubah mencapai nilai elongasi 90%.

Paduan yang sama Shykumar dan kawan-kawan mengatakan bahwa kenaikan temperatur *solution treatment* akan mengurangi waktu tahan menurutnya untuk mencapai puncak kekuatannya tarik maka dengan *solution treatment* pada suhu 550°C hanya perlu waktu tahan 50 menit. *Solution heat treatment* terdiri dari tiga langkah: *solution*, *quenching*, dan *aging*. Perubahan mikrostruktur terjadi karena tahapan *solution treatment* meliputi proses *quenching* dan *aging*. Penguatan endapan dari paduan Al-Mg-Si adalah adanya fase Mg<sub>2</sub>Si yang terjadi pada saat peleburan Al kemudian dengan kecepatan pendinginan yang lama pada saat solidifikasi terbentuklah endapan Mg<sub>2</sub>Si. Bila dilakukan proses saat *solution treatment* maka tumbuh endapan *inkoheren* didalam matrik Al menjadi endapan yang lebih halus sehingga kekuatan meningkat

Berdasarkan uraian teori diatas maka Proses *heat treatment* (proses penuaan atau *aging*) yang telah biasa dilakukan pada paduan aluminium untuk meningkatkan kekuatannya. Pada penelitian ini akan dilakukan dengan menggunakan aluminium paduan Al-Mg-Si dengan seri 6061 yang akan mendapat perlakuan panas pada temperatur 450°C dengan metode pendinginan *quenching* dan kemudian mendapat perlakuan *artificial aging* pada temperatur 190°C dengan variasi *holding time* yang berbeda-beda, yaitu 1 jam, 5 jam, dan 11 jam. Dari penelitian diatas maka akan diketahui perbandingan kekerasan, dan struktur mikro pada aluminium sebelum dan sesudah mendapat perlakuan *artificial aging*.

## **B. Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Untuk mengetahui kekerasan bahan Aluminium seri 6061 dengan variasi pemanasan *holding time* 1 jam, 5 jam, dan 11 jam sebelum dan sesudah perlakuan *artificial aging*.
2. Untuk mengetahui fasa yang terbentuk dalam bahan Aluminium seri 6061 sesudah perlakuan *artificial aging* dengan variasi pemanasan *holding time* 1 jam dan 5 jam.
3. Untuk mengetahui pengaruh perlakuan *artificial aging* pada perubahan sifat bahan Aluminium seri 6061 dengan variasi pemanasan *holding time* 1 jam, 5 jam, dan 11 jam.

## **C. Batasan Masalah**

Adapun batasan masalah dari penulisan laporan tugas akhir ini adalah :

1. Penulis menjelaskan tentang proses perlakuan panas yang hanya difokuskan pada proses *artificial aging* pada variasi *holding time* yaitu 1 jam, 5 jam , dan 11 jam.
2. Spesimen yang digunakan adalah paduan Aluminium Magnesium Silikon (Al-Mg-Si) dengan seri 6061.
3. Pengujian yang dilakukan yaitu uji kekerasan, dan uji SEM EDX yang bertujuan untuk mengetahui sifat mekanis dan karekteristik aluminium seri

6061 sebagai perbandingan antara sebelum dan sesudah mendapat perlakuan *artificial aging*.

#### **D. Sistematika Penulisan**

Dalam penulisan laporan penelitian tugas akhir ini terbagi dalam lima bab, yaitu :

##### **BAB I : PENDAHULUAN**

Latar belakang masalah, Tujuan penelitian, Batasan masalah dan sistematika penulisan laporan penelitian tugas akhir.

##### **BAB II : TINJAUAN PUSTAKA**

Mensarikan teori yang akan menjadi dasar dalam penelitian tugas akhir ini.

##### **BAB III : METODOLOGI PENELITIAN**

Pada Bab ini menguraikan metode – metode yang digunakan dalam pengambilan data dan mengkalibrasi alat yang akan digunakan dalam penelitian tugas akhir.

##### **BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN**

Berisi data-data yang didapat dari pengujian dan pembahasan proses pengambilan data.

##### **BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN**

Bab ini menyimpulkan hasil akhir dari pembahasan masalah dan memberi saran.

##### **DAFTAR PUSTAKA**

Berisikan sumber-sumber yang menjadi referensi penulis dalam menyusun laporan penelitian tugas akhir.

## **LAMPIRAN**

Memuat beberapa hal yang berhubungan dengan materi yang dibahas sebagai pelengkap laporan penelitian tugas akhir.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### A. *Heat Treatment*

Proses perlakuan panas (*Heat Treatment*) adalah suatu proses mengubah sifat logam dengan cara mengubah struktur mikro melalui proses pemanasan dan pengaturan kecepatan pendinginan dengan atau tanpa merubah komposisi kimia logam yang bersangkutan. Tujuan proses perlakuan panas untuk menghasilkan sifat-sifat logam yang diinginkan. Perubahan sifat logam akibat proses perlakuan panas dapat mencakup keseluruhan bagian dari logam atau sebagian dari logam. (Jaya, 2015)

Proses dalam *heat treatment* meliputi *heating*, *colding*, dan *cooling*. Adapun tujuan dari masing-masing proses yaitu :

1. *Heating* : Proses pemanasan sampai temperatur tertentu dan dalam periode waktu. Tujuannya untuk memberikan kesempatan agar terjadinya perubahan struktur dari atom-atom dapat menyeluruh.
2.  *Holding* : Proses penahanan pemanasan pada temperatur tertentu, bertujuan untuk memberikan kesempatan agar terbentuk struktur yang teratur dan seragam sebelum proses pendinginan.
3. *Cooling* : Proses pendinginan dengan kecepatan tertentu, bertujuan untuk mendapatkan struktur dan sifat fisik maupun sifat mekanis yang diinginkan. (Masgik, 2010)

Ketiga hal diatas tergantung dari material yang akan di *heat treatment* dan sifat-sifat akhir yang diinginkan. Melalui perlakuan panas yang tepat tegangan dalam dapat dihilangkan, besar butir diperbesar atau diperkecil, ketangguhan ditingkatkan atau dapat dihasilkan suatu permukaan yang keras di sekeliling inti yang ulet. Untuk memungkinkan perlakuan panas yang tepat, susunan kimia logam harus diketahui karena perubahan komposisi kimia, khususnya karbon (C) dapat mengakibatkan perubahan sifat fisis.

Terdapat beberapa jenis proses perlakuan panas atau *heat treatment* yang dapat dilakukan, adapun jenis – jenis heat treatment yang biasa dilakukan adalah sebagai berikut :

a. *Annealing*

Proses *annealing* yaitu proses pemanasan material sampai temperatur austenit lalu ditahan beberapa waktu kemudian pendinginannya dilakukan perlahan-lahan di dalam tungku. Keuntungan yang didapat dari proses ini adalah sebagai berikut :

1. Menurunkan kekerasan
2. Menghilangkan tegangan sisa
3. Memperbaiki sifat mekanik
4. Memperbaiki mampu mesin dan mampu bentuk
5. Menghilangkan terjadinya retak panas
6. Menurunkan atau menghilangkan ketidak homogenan struktur
7. Memperhalus ukuran butir
8. Menghilangkan tegangan dalam dan menyiapkan struktur baja untuk proses perlakuan panas.

Proses Anil tidak dimaksudkan untuk memperbaiki sifat mekanik baja perlitik dan baja perkakas. Sifat mekanik baja struktural diperbaiki dengan cara dikeraskan dan kemudian diikuti dengan tempering.(Anrinal, 2011)

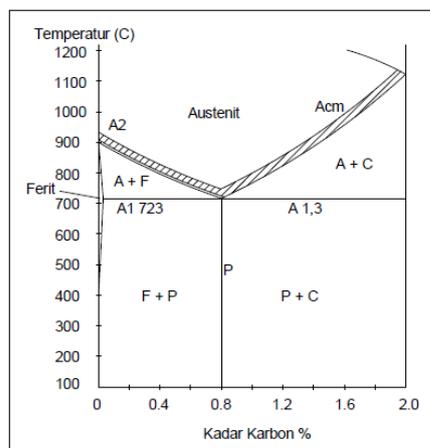
b. *Tempering*

Perlakuan untuk menghilangkan tegangan dalam dan menguatkan baja dari kerapuhan disebut dengan memudakan (*tempering*). *Tempering* didefinisikan sebagai proses pemanasan logam setelah dikeraskan pada temperatur *tempering* (di bawah suhu kritis), yang dilanjutkan dengan proses pendinginan. Baja yang telah dikeraskan bersifat rapuh dan tidak cocok untuk digunakan, melalui proses *tempering* kekerasan dan kerapuhan dapat diturunkan sampai memenuhi persyaratan penggunaan. Kekerasan turun, kekuatan tarik akan turun pula sedang keuletan dan ketangguhan baja akan meningkat. (Jaya, 2015)

c. *Normalizing*

Proses *normalizing* atau menormalkan adalah jenis perlakuan panas yang umum diterapkan pada hampir semua produk cor, *over-heated forgings* dan produk-produk tempa yang besar. *Normalizing* ditujukan untuk memperhalus butir, memperbaiki mampu mesin, menghilangkan tegangan sisa dan juga memperbaiki sifat mekanik baja karbon struktural dan baja paduan rendah. (Anrinal, 2011)

Untuk lebih jelas membahas proses *normalizing*, berikut ini merupakan diagram temperatur yang diperuntukan pada proses *normalizing* tersebut.



Gambar.1. Diagram untuk temperatur *Normalizing*  
(Sumber : Anrinal, 2011)

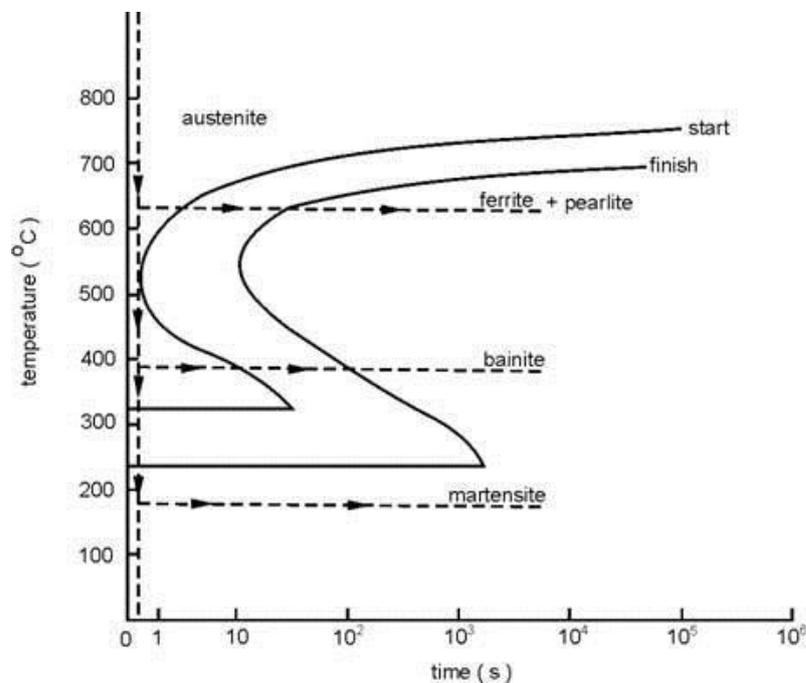
d. *Quenching*

Proses *quenching* melibatkan beberapa faktor yang saling berhubungan. Pertama yaitu jenis media pendingin dan kondisi proses yang digunakan, yang kedua adalah komposisi kimia dan *hardenability* dari logam tersebut. *Hardenability* merupakan fungsi dari komposisi kimia dan ukuran butir pada temperatur tertentu. Selain itu, dimensi dari logam juga berpengaruh terhadap hasil proses *quenching*.

Adapun pada proses *quenching* ini terbagi menjadi dua jenis, yaitu pendinginan secara terus menerus dan pendinginan yang tidak terus menerus. Berikut ini penjelasannya :

1. Pendinginan tidak menerus

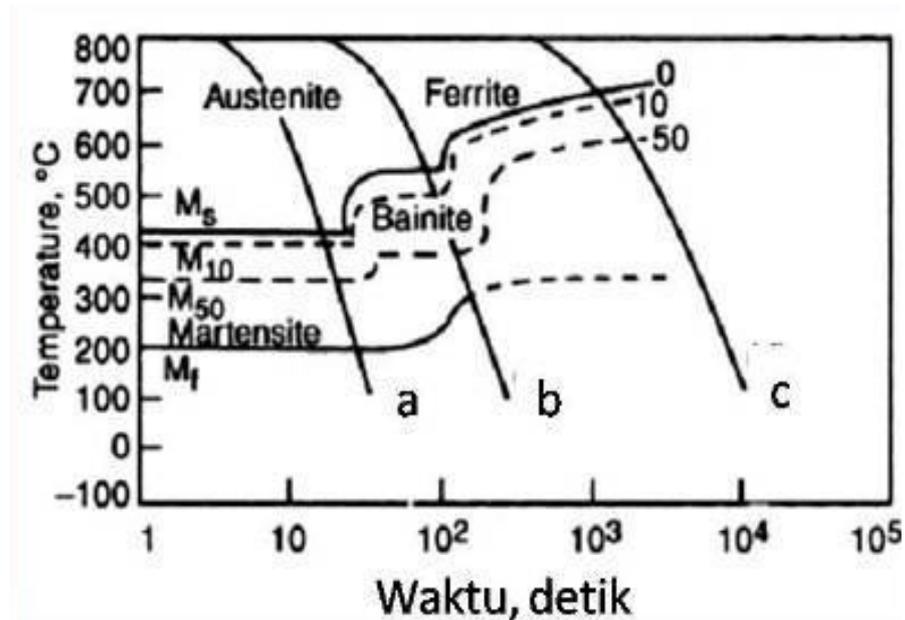
Jika suatu baja didinginkan dari suhu yang lebih tinggi dan kemudian ditahan pada suhu yang lebih rendah selama waktu tertentu, maka akan menghasilkan struktur mikro yang berbeda. Hal ini dapat dilihat pada diagram *Isothermal Transformation Diagram* dibawah ini.



Gambar 2. *Isothermal Transformation Diagram*  
(Sumber : [www.steelindonesia.com](http://www.steelindonesia.com))

## 2. Pendinginan Terus menerus

Dalam prakteknya proses pendinginan pada pembuatan material baja dilakukan secara menerus mulai dari suhu yang lebih tinggi sampai dengan suhu rendah. Pengaruh kecepatan pendinginan terus menerus terhadap struktur mikro yang terbentuk dapat dilihat dari diagram *Continuous Cooling Transformation Diagram*.



Gambar 3. *Continuous cooling transformation diagram*.  
(Sumber : [www.ardra.biz/sain-teknologi.html](http://www.ardra.biz/sain-teknologi.html))

Tujuan utama dari proses pengerasan adalah agar diperoleh struktur martensit yang keras, sekurang-kurangnya di permukaan baja. Hal ini hanya dapat dicapai jika menggunakan medium *quenching* yang efektif sehingga baja didinginkan pada suatu laju yang dapat mencegah terbentuknya struktur yang lebih lunak seperti perlit atau bainit.

Berhubung sebagian besar benda kerja sudah berada dalam tahap akhir dari proses, maka kualitas medium *quenching* yang digunakan harus dapat menjamin agar tidak timbul distorsi pada benda kerja setelah proses *quench* selesai dilaksanakan. Hal tersebut dapat dicapai dengan cara menggunakan media *quenching* yang sesuai tergantung pada jenis baja

yang diproses, tebal penampang dan besarnya distorsi yang diijinkan. *Quench* ke dalam oli saat ini paling banyak digunakan, manfaat dari pendinginannya oli adalah bahwa laju pendinginannya pada tahap pembentukan lapisan uap dapat dikontrol sehingga dihasilkan karakteristik *quenching* yang homogen.

e. *Softening*

*Softening* merupakan proses *heat treatment* dimana suatu material logam uji dilakukan proses pemanasan atau proses pendinginan pada waktu tertentu yang mempunyai tujuan untuk mendapatkan sifat material yang lunak/proses pelunakan material sehingga mempermudah untuk proses permesinan selanjutnya. (Jaya, 2015)

**B. *Precipitation Hardening* (Pengerasan Presipitasi).**

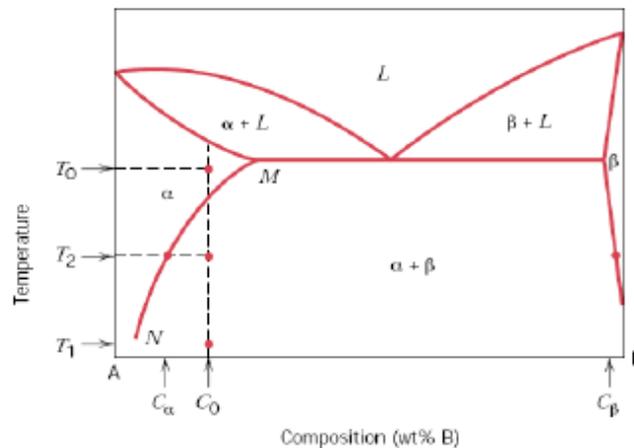
Penguatan dan pengerasan logam paduan bisa ditingkatkan dengan pembentukan penyebaran partikel-partikel dari fasa kedua kedalam matrik fasa yang asli atau pertama. Hal ini dilakukan dengan perlakuan panas yang tepat. Prosesnya disebut *precipitation hardening* karena partikel-partikel kecil dari fasa yang baru membentuk *precipitasi* atau endapan. Terkadang disebut pula dengan sebutan *age hardening* (pengerasan penuaan), karena proses penguatan terjadi karena proses waktu.

Contoh-contoh logam yang diperkeras dengan pengerasan precipitasi adalah, aluminium-tembaga, tembaga-beryllium, tembaga-timah dan magnesium-aluminium, dan lain sebagainya. *Precipitation hardening* dan perlakuan baja untuk membentuk martensit adalah fenomena yang sama sekali berbeda walaupun proses perlakuan panas hampir sama. (Anonim, 2010)

Proses *precipitation hardening* terjadi atas dua tahap yaitu:

### 1. *Solution Heat Treating*

Pada  $T_0$  struktur logam adalah  $\alpha$ , dengan komposisi  $C_0$ . Kemudian dilakukan pendinginan cepat hingga temperatur  $T_1$  yaitu temperatur ruang sehingga phase  $\beta$  tidak bisa terbentuk. Karena itu kondisi logam adalah tidak setimbang atau *non equilibrium* dimana hanya ada phase  $\alpha$  jenuh dengan atom  $\beta$  didalamnya. Sifat bahan adalah lunak dan lemah. Proses *solution heat treatment* dapat dijelaskan dalam gambar 4, pada temperatur  $T_1$  tersebut pemanasan ditahan beberapa saat agar didapat larutan padat yang mendekati homogen.



Gambar.4. Diagram fase pemanasan logam paduan  
(Sumber : Fuad,2010)

### 2. *Precipitation Heat Treating*

Setelah *solution heat treatment* dan *quenching* tahap selanjutnya dalam proses *age hardening* adalah *aging* atau penuaan. Perubahan sifat-sifat dengan berjalanya waktu pada umumnya dinamakan *aging* atau penuaan. *Aging* atau penuaan pada paduan aluminium dibedakan menjadi dua, yaitu penuaan alami (*natural aging*) dan penuaan buatan (*artificial aging*), adapun penjelasan dari keduanya adalah sebagai berikut ini.

a. *Natural Aging.*

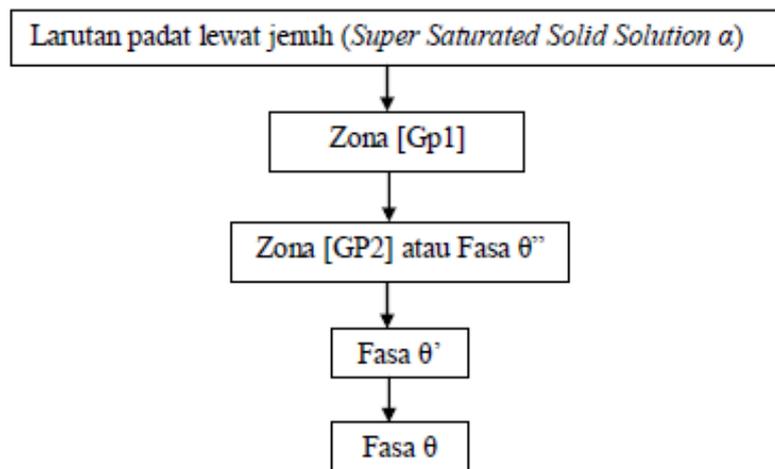
Penuaan alami (*natural aging*) adalah penuaan untuk paduan aluminium yang di *age hardening* dalam keadaan dingin. *Natural aging* berlangsung pada temperatur ruang antara 15°C - 25°C dan dengan waktu penahanan 5 sampai 8 hari. Penuaan buatan (*artificial aging*) adalah penuaan untuk paduan aluminium yang di *age hardening* dalam keadaan panas. *Artificial aging* berlangsung pada temperatur antara 100°C -200°C dan dengan lamanya waktu penahanan antara 1 sampai 24 jam.(Fuad,2010).

b. *Artificial aging*

*Artificial aging* dalam proses *age hardening* dapat dilakukan beberapa variasi perlakuan yang dapat mempengaruhi hasil dari proses *age hardening*. Salah satu variasi tersebut adalah variasi temperatur *artificial aging*. Temperatur *artificial aging* dapat ditetapkan pada temperatur saat pengkristalan paduan aluminium (150°C), di bawah temperatur pengkristalan atau di atas temperatur pengkristalan logam paduan aluminium.

Penuaan buatan (*artificial aging*) berlangsung pada suhu antara 100°C - 200°C. Pengambilan temperatur *artificial aging* pada temperatur antara 100°C - 200°C akan berpengaruh pada tingkat kekerasan sebab pada proses *artificial aging* akan terjadi perubahan-perubahan fasa atau struktur. Perubahan fasa tersebut akan memberikan sumbangan terhadap pengerasan.

Berikut ini merupakan diagram urutan perubahan fasa yang terjadi pada proses *artificial aging*.



Gambar.5. Diagram perubahan fasa pada proses *artificial aging*.  
(Sumber : Smith, 1995)

Dari gambar diagram diatas dapat menjelaskan beberapa tahapan fasa yang terbentuk pada proses *artificial aging*, berikut ini penjelasan dari tahapan – tahapan tersebut.

1. Larutan Padat Lewat Jenuh (*Super Saturated Solid Solution α*)  
Setelah paduan alumunium melawati tahap *solution heat treatment* dan *quenching* maka akan didapatkan larutan padat lewat jenuh pada temperatur kamar. Pada kondisi ini secara simultan kekosongan atom dalam keseimbangan termal pada temperatur tinggi tetap pada tempatnya. Setelah pendinginan atau *quenching*, maka logam paduan alumunium menjadi lunak jika dibandingkan dengan kondisi awalnya.
2. Zona [GP 1]  
Zona [GP 1] adalah zona presipitasi yang terbentuk oleh temperatur penuaan atau *aging* yang rendah dan dibentuk oleh *segregasi* atom Cu dalam larutan padat lewat jenuh atau *super saturated solid solution α*.

Zona [GP 1] akan muncul pada tahap mula atau awal dari proses *artificial aging*. Zona ini terbentuk ketika temperatur *artificial aging* dibawah  $100^{\circ}\text{C}$  atau mulai temperatur ruang hingga temperatur  $100^{\circ}\text{C}$  dan Zona [GP 1] tidak akan terbentuk pada temperatur *artificial aging* yang terlalu tinggi. Terbentuknya Zona [GP 1] akan mulai dapat meningkatkan kekerasan logam paduan aluminium.

3. Zona [GP 2] atau Fasa  $\theta''$

Setelah temperatur *artificial aging* melewati  $100^{\circ}\text{C}$  ke atas, maka akan mulai muncul fasa  $\theta''$  atau zona [GP 2]. Pada temperatur  $130^{\circ}\text{C}$  akan terbentuk zona [GP2] dan apabila waktu penahanan *artificial aging*nya terpenuhi maka akan didapatkan tingkat kekerasan yang optimal. Biasanya proses *artificial aging* berhenti ketika sampai terbentuknya zona [GP 2] dan terbentuknya fasa antara yang halus (presipitasi  $\theta''$ ), karena setelah melewati zona [GP 2] maka paduan akan kembali menjadi lunak. Jika proses *artificial aging* berlangsung sampai terbentuknya fasa  $\theta''$  atau zona [GP 2], maka disebut dengan pengerasan tahap kedua.

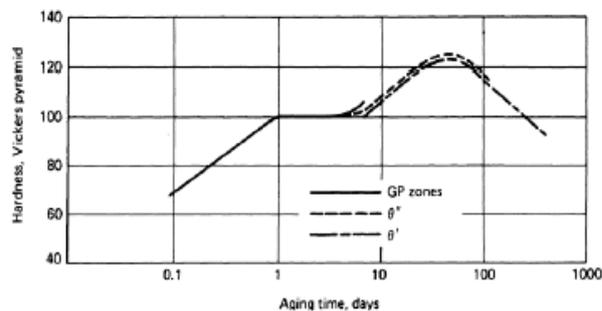
4. Fasa  $\theta'$

Kalau paduan aluminium dinaikan temperatur *aging* atau waktu *aging* diperpanjang tetapi temperturnya tetap, maka akan terbentuk presipitasi dengan struktur kristal yang teratur yang berbeda dengan fasa  $\theta'$ . Fasa ini dinamakan fasa antara atau fasa  $\theta'$ . Terbentuknya fasa  $\theta'$  ini masih dapat memberikan sumbangan terhadap peningkatan kekerasan pada paduan aluminium. Peningkatan kekerasan yang terjadi pada fasa  $\theta'$  ini berjalan sangat lambat.

## 5. Fasa $\theta$

Apabila temperatur dinaikan atau waktu penuaan diperpanjang, maka fasa  $\theta'$  berubah menjadi fasa  $\theta$ . Jika fasa  $\theta$  terbentuk maka akan menyebabkan paduan aluminium kembali menjadi lunak. Sementara waktu penahanan dalam *artificial aging* merupakan salah satu komponen yang dapat mempengaruhi hasil dari proses *age hardening* secara keseluruhan. Seperti halnya temperatur, waktu penahanan pada tahap *artificial aging* akan mempengaruhi perubahan struktur atau perubahan fasa paduan aluminium. Sehingga pemilihan waktu penahan *artificial aging* harus dilakukan dengan hati-hati.

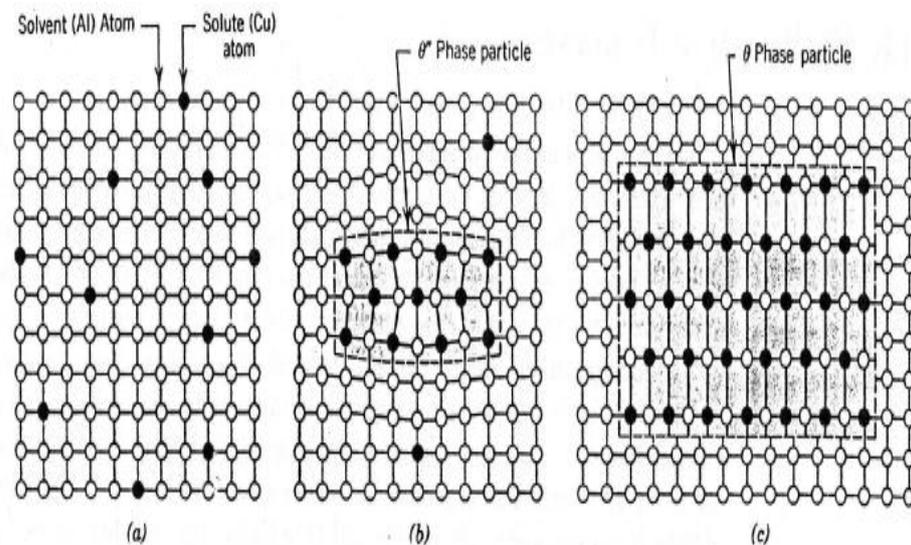
Dalam kurva penuaan dibawah ini, pada awal-awal tahap *artificial aging* struktur atau fasanya masih berupa larutan padat lewat jenuh (*Super Saturated Solid Solution*).



Gambar 6. Hubungan antara lamanya waktu (*aging*) dengan kekuatan dan kekerasan paduan aluminium (Sumber : Smith, 1995).

Seiring dengan penambahan waktu penuaan atau ketika penuaan sampai di daerah *under aged*, maka mulai terbentuk zona *presipitat* zona [GP 1] dan paduan aluminium menjadi agak kuat dan keras. Ketika waktu *aging* ditambah lagi maka akan masuk dalam daerah *peak aged*. Pada daerah *peak aged* *presipitat* mengumpul atau mulai terbentuk zona [GP 2] dan fasa antara yang halus (fasa  $\theta'$ ). Jika fasa-fasa tersebut mulai terbentuk maka akan didapatkan tingkat kekerasan dan kekuatan logam

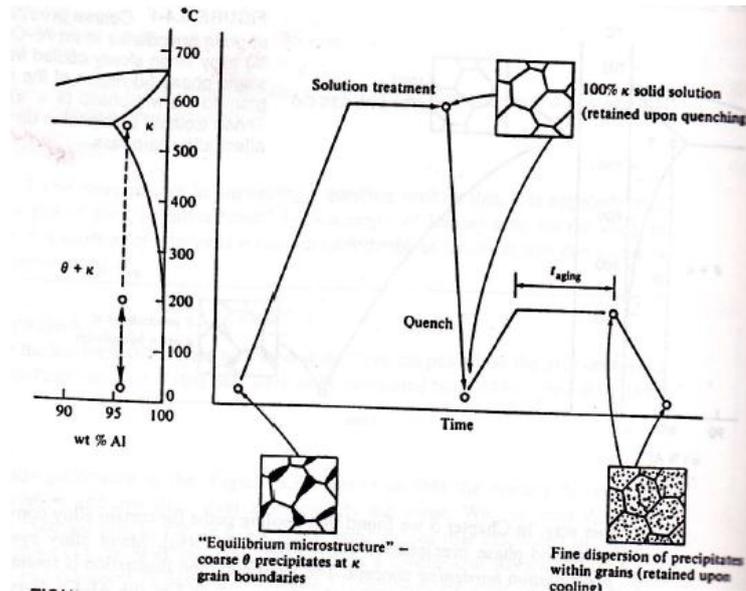
paduan aluminium yang optimal. Apabila setelah mencapai *peak aged* (puncak penuaan) waktu *artificial aging* masih ditambah lagi maka akan masuk dalam daerah *over aged*. Pada daerah *over aged* ini akan didapatkan fasa  $\theta$ , jika fasa  $\theta$  ini terbentuk maka akan menyebabkan paduan aluminium menjadi lunak kembali dan berkurang kekerasannya.(Smith, 1995).



Gambar 7. (a) *supersaturated solute solution*, (b) fasa  $\theta''$  mulai terbentuk *precipitate (Al-Cu)*, (c) fasa keseimbangan  $\theta$  *Al-Cu*  
(Sumber : Smith, 1995)

Mekanisme penguatan presipitasi umumnya dilakukan pada paduan aluminium. Perlakuan panas pada aluminium paduan dilakukan dengan memanaskan sampai terjadi fase tunggal kemudian ditahan beberapa saat dan diteruskan dengan pendinginan cepat hingga tidak sempat berubah ke fase lain.(Anonim,2010)

Berikut ini merupakan grafik proses pemanasan terhadap waktu bisa dilihat pada gambar 8, dilengkapi dengan gambar struktur mikro yang terbentuk pada setian perlakuan yang telah dilakukan.



Gambar. 8. Schematic temperature versus time plot showing both solution and precipitation heat treatment for precipitation hardening.  
(Sumber : James, 1992)

### C. Aluminium

Aluminium diambil dari bahasa Latin: *alumen*, *alum*. Orang-orang Yunani dan Romawi kuno menggunakan *alum* sebagai cairan penutup pori-pori dan bahan penajam proses pewarnaan. Pada tahun 1787, Lavoisier menebak bahwa unsur ini adalah Oksida logam yang belum ditemukan. Pada tahun 1761, de Morveau mengajukan nama *alumine* untuk basa *alum*. Pada tahun 1827, Wohler disebut sebagai ilmuwan yang berhasil mengisolasi logam ini. Pada tahun 1807, Davy memberikan proposal untuk menamakan logam ini Aluminium, walau pada akhirnya setuju untuk menggantinya dengan *Aluminium*. Nama yang terakhir ini sama dengan nama banyak unsur lainnya yang berakhir dengan “ium”.

C.M. Hall seorang berkebangsaan Amerika dan Paul Heroult berkebangsaan Prancis, pada tahun 1886 mengolah Aluminium dari Alumina dengan cara elektrolisa dari garam yang terfusi. Selain itu Karl Josep Bayer seorang ahli

kimia berkebangsaan Jerman mengembangkan proses yang dikenal dengan nama proses Bayer untuk mendapat Aluminium murni.(Anonim, 2012)

Aluminium merupakan unsur logam terbanyak di muka bumi, dimana hampir 8% berat dari kerak bumi adalah aluminium. Aluminium ditemukan oleh Sir Humphrey Davy pada tahun 1809 sebagai suatu unsur, dan pertama kali direduksi sebagai suatu logam oleh H.C. Oersted pada tahun 1825. Bijih bauksit adalah bahan utama untuk pembuatan aluminium yang terdapat di dalam batu-batu dalam kerak bumi. Di dalam bebatuan tersebut aluminium masih berbentuk silikat dan komponen lain yang lebih kompleks, karena komponen aluminium yang begitu kompleks tersebut maka diperlukan penelitian lebih dari 60 tahun untuk menemukan cara yang ekonomis untuk membuat aluminium dari bijih bauksit. (Surdia .T.,Saito,S., 1995)

Adapun aluminium merupakan bahan yang sering digunakan dalam kehidupan sehari-hari hal tersebut dikarenakan aluminium mempunyai sifat-sifat yang sangat baik dan mempunyai keunggulan dibandingkan dengan material lain. Berikut ini merupakan sifat-sifat umum aluminium.

a. Ringan

Memiliki bobot sekitar 1/3 dari bobot besi dan baja, atau tembaga dan banyak digunakan dalam industri transportasi seperti angkutan udara.

b. Tahan terhadap korosi

Sifatnya durabel sehingga baik dipakai untuk lingkungan yang dipengaruhi oleh unsur-unsur seperti air, udara, suhu dan unsur-unsur kimia lainnya, baik di ruang angkasa atau bahkan sampai ke dasar laut.

c. Kuat

Aluminium memiliki sifat yang kuat terutama bila dipadu dengan logam lain. Digunakan untuk pembuatan komponen yang memerlukan kekuatan

tinggi seperti: pesawat terbang, kapal laut, bejana tekan, kendaraan dan lain-lain.

d. Mudah dibentuk

Proses pengerjaan Aluminium mudah dibentuk karena dapat disambung dengan logam/material lainnya dengan pengelasan, *brazing*, *solder*, *adhesive bonding*, sambungan mekanis, atau dengan teknik penyambungan lainnya.

e. Konduktor listrik

Aluminium dapat menghantarkan arus listrik dua kali lebih besar jika dibandingkan dengan tembaga. Karena Aluminium tidak mahal dan ringan, maka Aluminium sangat baik untuk kabel-kabel listrik overhead maupun bawah tanah.

f. Konduktor panas

Sifat ini sangat baik untuk penggunaan pada mesin-mesin/alat-alat pemindah panas sehingga dapat memberikan penghematan energi.

g. Memantulkan sinar dan panas

Aluminium dapat dibuat sedemikian rupa sehingga memiliki kemampuan pantul yang tinggi yaitu sekitar 95% dibandingkan dengan kekuatan pantul sebuah cermin. Sifat pantul ini menjadikan Aluminium sangat baik untuk peralatan penahan radiasi panas.

h. Non magnetik

Aluminium sangat baik untuk penggunaan pada peralatan elektronik, pemancar radio/TV dan lain-lain. Dimana diperlukan faktor magnetisasi negatif. (Anonim, 2012)

Selain sifat-sifat aluminium diatas, pada tabel 1 dibawah merupakan sifat mekanik dari aluminium untuk mengetahui kekuatan dari aluminium itu sendiri, dimana pada tabel dibawah ini merupakan kekuatan mekanik dari aluminium murni yang dapat dijadikan acuan pada kekuatan aluminium paduan yang diberikan perlakuan. Untuk lebih jelas maka perhatikan tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Sifat mekanik aluminium

Sifat-sifat	Kemurnian Al (%)			
	99,996		>99,0	
	Di anil	75% dirol dingin	Di anil	H18
Kekuatan tarik ( $\text{kg/mm}^2$ )	4,9	11,6	9,3	16,9
Kekuatan mulur (0,2) ( $\text{kg/mm}^2$ )	1,3	11,0	3,5	14,8
Perpanjangan	48,8	5,5	35	5
Kekerasan Brinell	17	27	23	44

(Sumber : Surdia .T.,Saito,S., 1995)

Aluminium terbagi menjadi dua jenis, yaitu aluminium murni dan aluminium paduan. Berikut ini perbedaan dari kedua jenis aluminium tersebut.

#### 1. Aluminium murni

Aluminium memiliki berat jenis 2,7 gram/  $\text{cm}^3$ , kira-kira sepertiga dari berat jenis baja (7,83 gram/  $\text{cm}^3$ ), tembaga (8,93gram/  $\text{cm}^3$ ), atau kuningan. Selain itu aluminium menunjukkan ketahanan korosi yang baik pada kebanyakan lingkungan termasuk udara, air (air garam), petrokimia dan lingkungan kimia lainnya. Dilihat dari konduktivitas thermalnya adalah antara 50-60 % dari tembaga, bersifat *nonmagnetic* dan tidak beracun. (Surdia .T.,Saito,S., 1995)

## 2. Aluminium paduan

Berdasarkan metode pengerasannya, aluminium dapat dibagi menjadi dua kelompok, *heattreatable alloys* dan *non-heat treatable alloys*. *Heat-treatable alloys* adalah paduan aluminium yang dapat diperkeras dengan penuaan (*aging*). Sementara *nonheattreatable alloys* tidak dapat diperkuat dengan penuaan melainkan dengan penguatan larutan-padat (*solid solution strengthening*), pengerasan butir (*strain hardening*), atau pengerasan dispersi (*dispersion strengthening*).

Paduan tempa yang dapat diperkuat lewat perlakuan panas adalah kelas 2xxx, 6xxx, 7xxx, dan beberapa jenis dari kelas 8xxx. Beberapa kombinasi penambahan unsur pepadu, mekanisme penguatannya, serta perkiraan nilai kekuatan yang dapat dicapai dapat dilihat dalam Tabel 2. (Hatch, 1984)

Tabel 2. Klasifikasi paduan tempa aluminium, mekanisme penguatan, dan rentang nilai kekuatannya

Seri Aluminium	Sistem Paduan	Tensile Strength (MPa)
<b>Work- hardenable alloys</b>		
1xxx	Al murni	70-75
3xxx	Al-Mn-Mg	140-280
4xxx	Al-Si	105-350
5xxx	Al-Mg	140-280
<b>Precipitation-hardenable alloys</b>		
2xxx	Al-Cu-Mg	170-310
2xxx	Al-Cu-Mg-	380-520
6xxx	Si	150-380
7xxx	Al-Mg-Si	380-520
7xxx	Al-Zn-Mg	520-620
8xxx	Al-Zn-Mg- Cu Al-Li-Cu-Mg	280-560

(Sumber : Davis, 2001)

Berikut ini tabel klasifikasi aluminium paduan yang dapat diperkuat dengan perlakuan panas dan yang tidak dapat di berikan perlakuan panas. Seperti pada tabel 2 yang memeberikan perkiraan nilai kekuatan yang dapat dicapai dan tabel 3 yang merupakan pengelompokan paduan Aluminium. Dari tabel tersebut akan diketahui kodefikasi dan sifat bahan alumunium dengan paduan yang berbeda-beda sesuai dengan pengelompokan atau klasifikasi dari tabel dibawah ini.

Tabel 3. Klasifikasi paduan aluminium.

Al paduan untuk dimesin	Paduan jenis tidak dapat di perlakuan panas (non-heat-treatable)	Al murni ( seri 1000) Paduan Al-Mn (seri 3000) Paduan Al-Si (seri 4000) Paduan Al-Mg (seri 5000)
	Paduan jenis dapat perlakuan panas (heat-treatable)	Paduan Al-Cu (seri 2000) Paduan Al-Mg-Si (seri 6000) Paduan Al-Zn (seri 7000)
Al paduan untuk coran	<i>Non-heat-treatable alloy</i>	Paduan Al-Si (Silumin) Paduan Al-Mg (Hydronarium)
	<i>Heat-treatable alloy</i>	Paduan Al-Cu (Lautal) Paduan Al-Si-Mg (Silumin, Lo-ex)

(Sumber : Yudi, 2012)

Selain klasifikasi aluminium paduan diatas, berikut ini merupakan tabel klasifikasi aluminium berdasarkan paduan utama dan proses pengerjaannya dengan proses penempaan, dapat dijelas melalui tabel 3 dibawah dan pada tabel 4 merupakan klasifikasi aluminium bersadarkan perlakuan yang dilakukan.

Tabel 4. Klasifikasi paduan aluminium tempaan dengan unsur paduan utamanya.

Standar AA	Standar Alcoa terdahulu	Keterangan
1001	1S	Al murni 99,5% atau di atasnya
1100	2S	Al murni 99,0% atau di atasnya
2010-2029	10S-29S	Cu merupakan unsur paduan utama
3003-3009	3S-9S	Mn merupakan unsur paduan utama
4030-4039	30S-39S	Si merupakan unsur paduan utama
5050-5086	50S-69S	Mg merupakan unsur paduan utama
6061-6069		Mg <sub>2</sub> Si merupakan unsur paduan utama
7070-7079	70S-79S	Zn merupakan unsur paduan utama

(Sumber : Surdia .T.,Saito,S., 1995)

Untuk paduan aluminium, selain di klasifikasikan berdasarkan tabel 2 dan tabel 3 diatas, paduan aluminium dapat di klasifikasikan berdasarkan perlakuan yang telah dilakukan pada paduan aluminium tersebut, seperti pada tabel 5 dibawah ini.

Tabel 5. Klasifikasi paduan aluminium berdasarkan perlakuan bahan.

Tanda	Perlakuan
-F	Setelah pembuatan
-O	Dianil penuh
-H	Pengerasan regangan
-H 1n	Pengerasan regangan
-H 2n	Sebagian dianil setelah pengerasan regangan
-H 3n	Dianil untuk penyetabilan setelah pengerasan regangan n=2 (1/4 keras), 4 (1/2 keras), 6 (3/4 keras), 8 (keras), 9 (sangat keras)
-T	Perlakuan panas
-T2	Penganilan penuh (hanya untuk coran)
-T3	Pengerasan regangan setelah perlakuan pelarutan
-T4	Penuaan alamiah penuh setelah perlakuan pelarutan
-T5	Penuaan tiruan (tanpa perlakuan pelarutan)
-T6	Penuaan tiruan setelah perlakuan pelarutan
-T7	Penyetabilan setelah perlakuan pelarutan
-T8	Perlakuan pelarutan, pengerasan regangan, penuaan tiruan
-T9	Perlakuan pelarutan, penuaan tiruan, pengerasan regangan
-T10	Pengerasan regangan setelah penuaan tiruan

(Sumber : Surdia .T.,Saito,S., 1995)

Berikut ini merupakan jenis-jenis aluminium paduan yang sering digunakan dan paduan aluminium dengan proses pengerjaan yang berbeda beda.

a. Paduan Aluminium-Silikon

Paduan aluminium dengan silikon hingga 15% akan memberikan kekerasan dan kekuatan tensil yang cukup besar, hingga mencapai 525 MPa pada aluminium paduan yang dihasilkan pada perlakuan panas. Jika konsentrasi silikon lebih tinggi dari 15%, tingkat kerapuhan logam akan meningkat secara drastis akibat terbentuknya kristal granula silika.

b. Paduan Aluminium-Magnesium

Keberadaan magnesium hingga 15,35% dapat menurunkan titik lebur logam paduan yang cukup drastis, dari 660°C hingga 450°C. Namun, hal ini tidak menjadikan aluminium paduan dapat ditempa menggunakan panas dengan mudah karena korosi akan terjadi pada suhu di atas 60°C. Keberadaan magnesium juga menjadikan logam paduan dapat bekerja dengan baik pada temperatur yang sangat rendah, di mana kebanyakan logam akan mengalami *failure* pada temperatur tersebut.

c. Paduan Aluminium-Tembaga

Paduan aluminium-tembaga juga menghasilkan sifat yang keras dan kuat, namun rapuh. Umumnya, untuk kepentingan penempaan, paduan tidak boleh memiliki konsentrasi tembaga di atas 5,6% karena akan membentuk senyawa  $\text{CuAl}_2$  dalam logam yang menjadikan logam rapuh.

d. Paduan Aluminium-Mangan

Penambahan mangan memiliki akan berefek pada sifat dapat dilakukan pengerasan tegangan dengan mudah (*work-hardening*) sehingga didapatkan logam paduan dengan kekuatan tensil yang tinggi namun tidak terlalu rapuh. Selain itu, penambahan mangan akan meningkatkan titik lebur paduan aluminium.

e. Paduan Aluminium-Seng

Paduan aluminium dengan seng merupakan paduan yang paling terkenal karena merupakan bahan pembuat badan dan sayap pesawat terbang. Paduan ini memiliki kekuatan tertinggi dibandingkan paduan lainnya, aluminium dengan 5,5% seng dapat memiliki kekuatan tensil sebesar 580 MPa dengan elongasi sebesar 11% dalam setiap 50 mm bahan. Bandingkan dengan aluminium dengan 1% magnesium yang

memiliki kekuatan tensil sebesar 410 MPa namun memiliki elongasi sebesar 6% setiap 50 mm bahan.(Anonim, 2012)

Selain jenis-jenis aluminium paduan diatas, Aluminium memiliki kelas atau *grade* yang tergantung pada unsur paduan dan perlakuan panas yang dilakukan terhadap paduan aluminium tersebut. *Grade* ( kelas ) dari aluminium dapat menunjukkan berbagai sifat mekanik dari aluminium tersebut dari penampilan yang baik, kemudahan fabrikasi, ketahanan korosi yang baik, mampu las yang baik dan ketangguhan retak tinggi. Pemilihan *grade* ( kelas ) aluminium yang tepat tergantung pada aplikasi yang diperlukan dan kondisi kerja. Berikut adalah aluminium paduan yang sesuai dengan *grade* dan kodefikasi yang dimiliki setiap paduan aluminium itu sendiri.

1. *Grade* aluminium Seri 1xxx

*Grade* dari aluminium ini (1050, 1060, 1100, 1145, 1200, 1230, 1350 dll) ditandai dengan ketahanan korosi yang sangat baik, konduktivitas termal dan elektrik yang tinggi, sifat mekanik yang rendah, dan kemampuan kerja yang sangat baik. *Grade* aluminium ini memiliki kandungan Besi dan silikonyang besar.

2. *Grade* aluminium Seri 2xxx

Paduan aluminium ini (2011, 2014, 2017, 2018, 2124, 2219, 2319, 201,0; 203,0; 206,0; 224,0; 242,0 dll) memerlukan *solution heat treatment* untuk mendapatkan sifat yang optimal, didalam kondisi *solution heat treatment* , sifat mekanik yang mirip dengan baja karbon rendah dan kadang-kadang melebihi sifat mekanik baja karbon rendah. Dalam beberapa contoh, proses perlakuan panas (aging) digunakan untuk lebih meningkatkan sifat mekanik. Paduan aluminium dalam seri 2xxx tidak memiliki ketahanan korosi yang baik ketimbang kebanyakan paduan aluminium lainnya, dan dalam kondisi tertentu paduan ini mungkin akan terjadi korosi pada antar butir. *Grade* aluminium dalam seri 2xxx ini baik untuk bagian yang

membutuhkan kekuatan yang bagus yaitu pada suhu sampai 150°C (300°F). Kecuali untuk kelas 2219, paduan aluminium ini sudah memiliki mampu las tetapi masih terbatas. beberapa paduan dalam seri ini memiliki kemampuan mesin yang baik.

3. *Grade* aluminium Seri 3xxx

Paduan aluminium ini (3003, 3004, 3105, 383,0; 385,0; A360; 390,0) umumnya memiliki ketidakmampuan panas tetapi memiliki kekuatan sekitar 20% lebih dari paduan aluminium seri 1xxx karena hanya memiliki presentase mangan yang sedikit (sampai sekitar 1,5%) yang dapat ditambahkan ke aluminium. mangan digunakan sebagai elemen utama dalam beberapa paduan.

4. *Grade* aluminium Seri 4xxx

Unsur paduan utama dalam paduan seri 4xxx (4032, 4043, 4145, 4643 dll) adalah silikon, yang dapat ditambahkan dalam jumlah yang cukup (hingga 12%) menyebabkan substansial menurunkan rentang lebur. Untuk alasan ini, paduan aluminium-silikon yang digunakan dalam kawat las dan sebagai paduan untuk menyolder digunakan untuk menggabungkan aluminium, di mana titik lebur lebih rendah dari logam dasar yang digunakan.

5. *Grade* aluminium Series 5xxx

Unsur paduan utama *grade* aluminium ini adalah magnesium, bila digunakan sebagai elemen paduan utama atau digabungkan dengan mangan, hasilnya adalah paduan yang memiliki kekerasan sedang hingga kekuatan yang tinggi. Magnesium jauh lebih efektif daripada mangan sebagai penguat - sekitar 0,8% Mg sama dengan 1,25% Mn dan dapat ditambahkan dalam jumlah yang jauh lebih tinggi. Paduan aluminium dalam seri ini (5005, 5052, 5083, 5086, dll) memiliki karakteristik pengelasan yang baik dan ketahanan yang relatif baik

terhadap korosi dalam atmosfer laut. Namun, pada pekerjaan dingin harus dilakukan pembatasan dan suhu operasi ( $150^{\circ}$ ) diperbolehkan untuk paduan aluminium yang memiliki magnesium tinggi untuk menghindari kerentanan terhadap korosi retak.(Anonim, 2015)

#### 6. *Grade* aluminium Seri 6xxx

Paduan aluminium dalam seri 6xxx (6061 dan 6063) mengandung silikon dan magnesium sekitar dalam proporsi yang diperlukan untuk pembentukan magnesium silisida ( $Mg_2Si$ ), sehingga membuat paduan ini memiliki mampu perlakuan panas yang baik. Meskipun tidak sekuat pada paduan 2xxx dan 7xxx, paduan aluminium seri 6xxx memiliki sifat mampu bentuk yang baik, mampu las, mampu mesin, dan ketahanan korosi yang relatif baik dengan kekuatan sedang.

Untuk paduan aluminium seri 6xxx yang memiliki unsur paduan utama Al-Mg-Si, dalam sistem klasifikasi AA dapat diperoleh paduan Al 6063 dan Al 6061. Paduan dalam sistem ini mempunyai kekuatan kurang sebagai bahan tempaan dibandingkan dengan paduan–paduan lainnya, tetapi sangat liat, sangat baik mampu bentuknya untuk penempaan, ekstrusi dan sebagainya. Paduan 6063 dipergunakan untuk rangka–rangka konstruksi, maka selain dipergunakan untuk rangka konstruksi.(Surdia .T.,Saito,S., 1995)

Sedangkan paduan aluminium seri 6061 adalah salah satu jenis material yang banyak penerapannya pada industri maju karena memiliki keunggulan dari berbagai sisi yaitu seperti kemampuan permesinan yang baik, penyelesaian permukaan sempurna, kekuatan yang tinggi dan ringan, serta tahan terhadap korosi.(Husaini, 2006)

Adapun dari buku ASM Metal Handbook Volume 9, pada tahun 2004, untuk aluminium seri 6061 memiliki komposisi kimia dimana unsur Al memiliki persentase yang paling besar, kemudian disusul dengan persentase unsur Mg dan unsur Si, mengingat bahwa aluminium seri

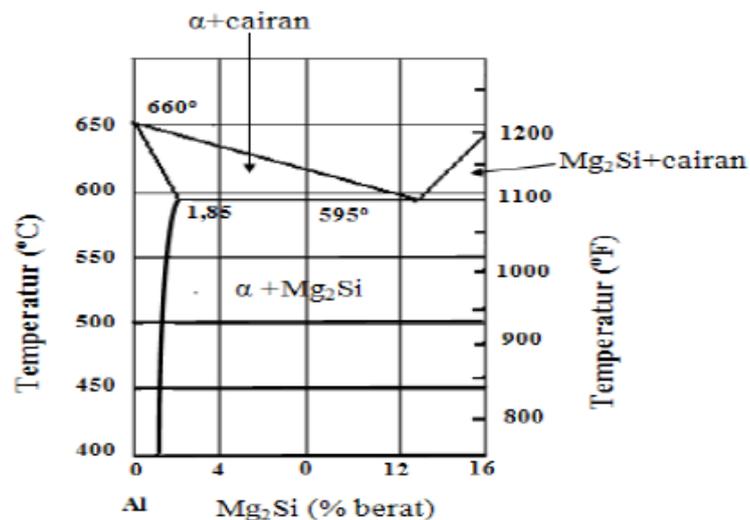
6061 ini merupakan paduan dari Al-Mg-Si, seperti yang telah ditunjukkan pada tabel 6 berikut ini.

Tabel 6. Komposisi Kimia Aluminium Seri 6061

Alloy group	Nominal chemical composition <sup>[a]</sup> , Wt %										
	Mg	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zu	Zr	Other
<b>Wrought alloys</b>											
1xxx (Al > 99.00%)	0.006-0.25	0.006-0.7	0.002-0.006	0.01-0.03	0.002-0.05	0.006-0.6	...	0.006-0.35	0.006-0.05	...	...
2xxx (Cu)	0.02-0.8	0.10-1.3	0.02-0.3	0.05-0.2	0.05-1.3	0.12-1.3	0.05-2.3	0.8-6.8	0.10-0.80	0.05-0.5	...
3xxx (Mn)	0.05-1.3	0.3-1.8	0.05-0.10	0.05-0.40	0.05-1.8	0.1-1.0	0.05	0.05-0.50	0.05-1.0	0.1-0.5	...
4xxx (Si)	0.05-2.0	0.8-13.5	0.04-0.30	0.05-0.25	0.03-1.5	0.20-1.0	0.15-1.3	0.05-1.5	0.05-0.25	...	...
5xxx (Mg)	0.2-5.6	0.08-0.7	0.05-0.20	0.05-0.35	0.03-1.4	0.10-0.7	0.03-0.05	0.03-0.35	0.05-2.8	...	...
6xxx (Mg + Si)	0.05-1.5	0.20-1.8	0.08-0.20	0.03-0.035	0.03-1.0	0.08-1.0	0.2	0.10-1.2	0.05-2.4	0.05-0.20	...

(Sumber : ASM Metal Handbook Volume 9, 2004)

Paduan aluminium seri 6061 berdasarkan tabel di atas maka unsur yang memiliki komposisi paling besar serta sangat mempengaruhi sifat mekanik dari paduan aluminium seri 6061 adalah Magnesium (Mg) dan Silika (Si), sehingga jika paduan aluminium seri 6061 diberi perlakuan panas maka yang terbentuk adalah senyawa  $Mg_2Si$ . Dimana senyawa tersebut dapat di perjelas dengan diagram fasa biner semu dibawah ini.



Gambar. 9. Diagram fasa biner semu  $Mg_2Si$   
(Sumber : Surdia .T.,Saito,S., 1995)

7. *Grade aluminium Seri 7xxx*

Zinc jumlah dari 1% sampai 8% ) merupakan unsur paduan utama dalam paduan aluminium seri 7xxx (7075, 7050, 7049, 710,0; 711,0 dll) dan ketika digabungkan dengan persentase magnesium yang lebih kecil didalam perlakuan panas yang cukup maka paduan ini akan memiliki kekuatan yang sangat tinggi. Biasanya unsur-unsur lain, seperti tembaga dan kromium, juga ditambahkan dalam jumlah kecil. paduan seri 7xxx digunakan dalam struktur badan pesawat, peralatan besar yang bergerak dan bagian lainnya memiliki tekanan yang sangat tinggi.

8. *Grade aluminium Seri 8xxx*

Seri 8xxx (8006; 8111; 8079; 850,0; 851,0; 852,0) dicadangkan untuk paduan unsur selain yang digunakan untuk seri 2xxx sampai 7xxx. Besi dan nikel yang digunakan untuk meningkatkan kekuatan tanpa kerugian yang signifikan dalam konduktivitas listrik, dan begitu juga berguna dalam paduan konduktor seperti 8017. Aluminium-lithium paduan 8090, yang memiliki kekuatan dan kekakuan yang sangat tinggi, dikembangkan untuk aplikasi ruang angkasa. Paduan aluminium dalam seri 8000 sesuai dengan sistem penomoran A98XXX dan lain sebagainya.(Surdia .T.,Saito,S., 1995)

#### **D. *Electron Microscopy***

Adapun dalam pengujian bahan yang berbasis *microscopy* terbagi menjadi beberapa macam jenis atau cara pengujiannya, diantaranya yaitu sebagai berikut:

1. *Transmission electron microscopy (TEM)*

TEM dikembangkan pertama kali oleh Ernst Ruska dan Max Knoll, yang merupakan dua peneliti dari Jerman pada tahun 1932. TEM bekerja

dengan prinsip menembakkan elektron ke lapisan tipis sampel, yang selanjutnya informasi tentang komposisi struktur dalam sample tersebut dapat terdeteksi dari analisis sifat tumbukan, pantulan maupun fase sinar elektron yang menembus lapisan tipis tersebut.

Dari sifat pantulan sinar elektron tersebut juga bisa diketahui struktur kristal maupun arah dari struktur kristal tersebut. Bahkan dari analisa lebih detail, bisa diketahui deretan struktur atom dan ada tidaknya cacat (defect) pada struktur tersebut. Hanya perlu diketahui, untuk observasi TEM ini, sample perlu ditipiskan sampai ketebalan lebih tipis dari 100 nanometer. Dalam pembuatan divais elektronika, TEM sering digunakan untuk mengamati penampang/irisian divais, berikut sifat kristal yang ada pada divais tersebut. Dalam kondisi lain, TEM juga digunakan untuk mengamati irisan permukaan dari sebuah divais.

## 2. *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

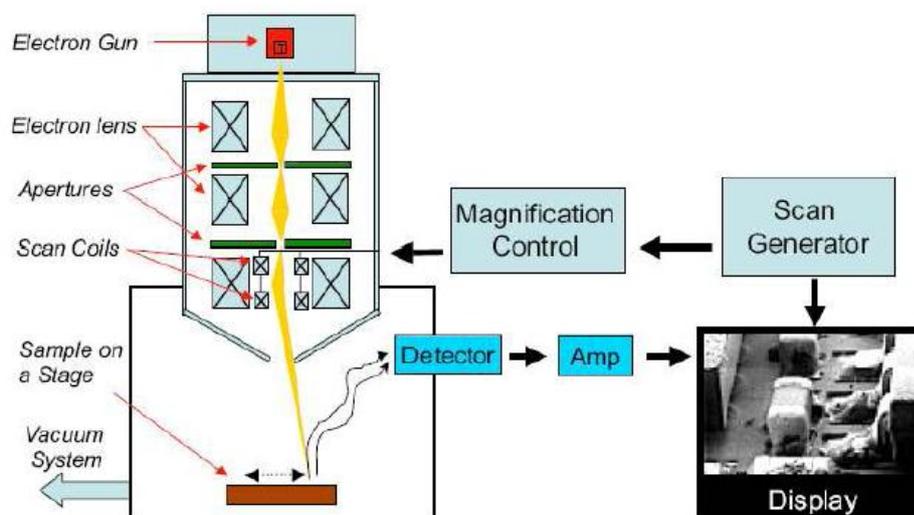
Tidak jauh dari lahirnya TEM, SEM dikembangkan pertama kali tahun 1938 oleh Manfred von Ardenne (ilmuwan Jerman). Konsep dasar dari SEM ini sebenarnya disampaikan oleh Max Knoll (penemu TEM) pada tahun 1935. SEM bekerja berdasarkan prinsip scan sinar elektron pada permukaan sampel, yang selanjutnya informasi yang didapatkan diubah menjadi gambar. Intrument SEM dapat dilihat gambar berikut ini.



Gambar.10. Alat *Scanning Electron Microscopy* (SEM)  
(Sumber : Aptika, 2009)

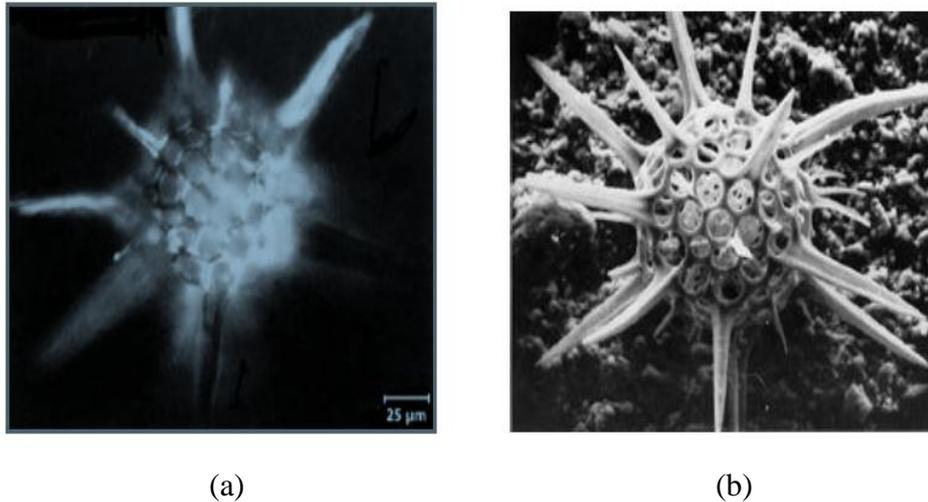
Teknik SEM pada hakekatnya merupakan pemeriksaan dan analisis permukaan. Data atau tampilan yang diperoleh adalah data dari permukaan atau dari lapisan yang tebalnya sekitar 20  $\mu\text{m}$  dari permukaan. Gambar permukaan yang diperoleh merupakan gambar topografi dengan segala tonjolan dan lekukan permukaan. Gambar topografi diperoleh dari penangkapan pengolahan elektron sekunder yang dipancarkan oleh spesimen. Kata kunci dari prinsip kerja SEM adalah scanning yang berarti bahwa berkas elektron “menyapu” permukaan spesimen, titik demi titik dengan sapuan membentuk garis demi garis, mirip seperti gerakan mata yang membaca. Sinyal elektron sekunder yang dihasilkannya pun adalah dari titik pada permukaan, yang selanjutnya ditangkap oleh SE detector dan kemudian diolah dan ditampilkan pada layar CRT. Pada sebuah pengujian SEM berdasarkan penggunaannya dalam analisis material, dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu Energy Dispersive X-Ray (EDX) dan Energy Dispersive Spectroscopy (WDS). (Aptika, 2009)

Dalam proses pengujian SEM tentunya alat pengujian SEM memiliki bagian-bagian tertentu yang sangat penting dan digunakan pada proses pengujian. Adapun SEM tersusun dari beberapa bagian yang dapat dibuat suatu skema seperti berikut :



Gambar.11. Skema bagian-bagian alat uji SEM  
(Sumber : Aptika, 2009)

Untuk mengetahui perbedaan hasil pengujian SEM dengan pengujian yang berbasis *microscopy* lainnya seperti pengujian *Optical Microscope* (OM) dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar.12. (a) Hasil uji OM, (b) Hasil uji SEM  
(Sumber : Anne, 2009)

### E. Uji Kekerasan

Kekerasan (*Hardness*) adalah salah satu sifat mekanik (*Mechanical properties*) dari suatu material. Kekerasan suatu material harus diketahui khususnya untuk material yang dalam penggunaannya akan mengalami gesekan (*frictional force*) dan deformasi plastis. Deformasi plastis sendiri suatu keadaan dari suatu material ketika material tersebut diberikan gaya maka struktur mikro dari material tersebut sudah tidak bisa kembali ke bentuk asal artinya material tersebut tidak dapat kembali ke bentuknya semula. Lebih ringkasnya kekerasan didefinisikan sebagai kemampuan suatu material untuk menahan beban indentasi atau penetrasi.(Hadi, 2011)

Proses pengujian kekerasan dapat diartikan sebagai kemampuan suatu bahan terhadap pembebanan dalam perubahan yang tetap. Dengan kata lain, ketika

gaya tertentu diberikan pada suatu benda uji yang mendapat pengaruh pembebanan, benda uji akan mengalami deformasi.

Pengujian kekerasan bahan logam bertujuan mengetahui angka kekerasan logam tersebut. Dengan kata lain, pengujian kekerasan ini bukan untuk melihat apakah bahan itu keras atau tidak, melainkan untuk mengetahui seberapa besar tingkat kekerasan logam tersebut. tingkat kekerasan logam berdasarkan pada standar satuan yang baku. Karena itu, prosedur pengujian kekerasan pun diatur dan diakui oleh standar industri di dunia sebagai satuan yang baku.

Pengujian kekerasan dengan cara penekanan banyak digunakan oleh industri permesinan. Hal ini dikarenakan prosesnya sangat mudah dan cepat dalam memperoleh angka kekerasan logam tersebut apabila dibandingkan dengan metode pengujian lainnya. Pengujian kekerasan yang menggunakan cara ini terdiri dari tiga jenis, yaitu pengujian kekerasan dengan metode *Rockwell*, *Brinell*, dan *Vickers*.

Perbedaan cara pengujian ini menghasilkan nilai satuannya juga berbeda. Karena itu, tiap-tiap pengujian memiliki satuannya masing-masing sesuai dengan proses penekannya, yang mendapat pengakuan standar internasional. Perbedaan satuan itu ditunjukkan dalam bentuk tulisan angka hasil pengujiannya. Berikut ini merupakan uraian terperinci mengenai masing masing metode pengujian.(Doddi, 2012)

#### 1. Metode Pengujian *Rockwell*

Pengujian kekerasan dengan metode Rockwell bertujuan menentukan kekerasan suatu material dalam bentuk daya tahan material terhadap indenter berupa **bola baja** ataupun **kerucut intan** yang ditekankan pada permukaan material uji tersebut Pengujian kekerasan dengan metode

*Rockwell* ini diatur berdasarkan standar DIN 50103. Adapun standar kekerasan metode pengujian *Rockwell* ditunjukkan pada tabel sebagai berikut:

Tabel 7. Skala Kekerasan Metode Pengujian *Rockwell*

Skala	Penekan	Beban			Skala Kekerasan	Warna Angka
		Awal	Utama	Jumlah		
A	Kerucut intan 120°	10	50	60	100	Hitam
B	Bola baja 1,558 mm (1/16")	10	90	100	130	Merah
C	Kerucut intan 120°	10	140	150	100	Hitam
D	Kerucut intan 120°	10	90	100	100	Hitam
E	Bola baja 3,175 mm (1/8")	10	90	100	130	Merah
F	Bola baja 1,558 mm	10	50	60	130	Merah
G	Bola baja 1,558 mm	10	140	150	130	Merah
H	Bola baja 3,175 mm	10	50	60	130	Merah
K	Bola baja 3,175 mm	10	140	150	130	Merah
L	Bola baja 6,35 mm (1/4")	10	50	60	130	Merah
M	Bola baja 6,35 mm	10	90	100	130	Merah
P	Bola baja 6,35 mm	10	140	150	130	Merah
R	Bola baja 12,7 mm (1/2")	10	50	60	130	Merah
S	Bola baja 12,7 mm	10	90	100	130	Merah
V	Bola baja 12,7 mm	10	140	150	130	Merah

(Sumber : Doddi, 2012)

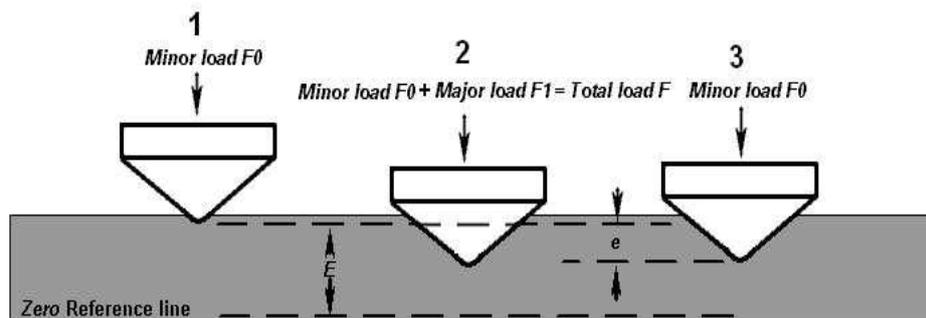
Untuk cara pemakaian skala diatas, terlebih dahulu menentukan dan memilih ketentuan angka kekerasan maksimum yang boleh digunakan oleh skala tertentu. Jika pada skala tertentu tidak tercapai angka kekerasan yang akurat, maka kita dapat menentukan skala lain yang dapat menunjukkan angka kekerasan yang jelas. Berdasarkan rumus tertentu, skala ini memiliki standar atau acuan, dimana acuan dalam menentukan dan memilih skala kekerasan dapat diketahui melalui tabel 8 dibawah ini yang merupakan skala kekerasan dan pemakaiannya dalam proses uji kekerasan metode rockwell yang digunakan untuk setiap bahan tertentu, seperti berikut ini :

Tabel 8. Skala Kekerasan Dan Pemakaiannya

Skala	Pemakaiannya
A	Untuk <i>carbide cementite</i> , baja tipis, dan baja dengan lapisan keras yang tipis
B	Untuk paduan tembaga, baja lunak, paduan aluminium, dan besi tempa
C	Untuk baja, besi tuang keras, besi tempa peritik, titanium, baja dengan lapisan keras yang dalam, dan bahan-bahan lain yang lebih keras daripada skala B-100
D	Untuk baja tipis, baja dengan lapisan keras yang sedang, dan besi tempa peritik
E	Untuk besi tuang, paduan aluminium, magnesium, dan logam-logam bantalan
F	Untuk paduan tembaga yang dilunakkan dan pelat lunak yang tipis
G	Untuk besi tempa, paduan tembaga, nikel-seng, dan tembaga-nikel
H	Untuk aluminium, seng, dan timbal
K	Untuk logam, bantalan, dan logam yang sangat lunak lainnya, atau bahan-bahan tipis
L	Untuk logam, bantalan, dan logam yang sangat lunak lainnya, atau bahan-bahan tipis
M	Untuk logam, bantalan, dan logam yang sangat lunak lainnya, atau bahan-bahan tipis
P	Untuk logam, bantalan, dan logam yang sangat lunak lainnya, atau bahan-bahan tipis
R	Untuk logam, bantalan, dan logam yang sangat lunak lainnya, atau bahan-bahan tipis
S	Untuk logam, bantalan, dan logam yang sangat lunak lainnya, atau bahan-bahan tipis
V	Untuk logam, bantalan, dan logam yang sangat lunak lainnya, atau bahan-bahan tipis

(Sumber : Doddi, 2012)

Untuk mencari besarnya nilai kekerasan dengan menggunakan metode *Rockwell* dijelaskan pada gambar 13, yaitu pada langkah 1 benda uji ditekan oleh indenter dengan beban minor (*Minor Load F0*) setelah itu ditekan dengan beban mayor (*major Load F1*) pada langkah 2, dan pada langkah 3 beban mayor diambil sehingga yang tersisa adalah *minor load* dimana pada kondisi 3 ini indenter ditahan seperti kondisi pada saat total load *F* yang terlihat pada gambar 13 dibawah ini.



Gambar 13. Prinsip kerja metode pengukuran kekerasan Rockwell  
(Sumber : Hadi, 2011)

## 2. Metode Pengujian *Brinell*

Cara pengujian *Brinell* dilakukan dengan penekanan sebuah **bola baja** yang terbuat dari baja krom yang telah dikeraskan dengan diameter tertentu oleh suatu gaya tekan secara statis ke dalam permukaan logam yang **diuji tanpa sentakan**. Permukaan logam yang diuji harus rata dan bersih. Setelah gaya tekan ditiadakan dan bola baja dikeluarkan dari bekas lekukan, maka diameter paling atas dari lekukan tersebut diukur secara teliti, yang kemudian dipakai untuk menentukan kekerasan logam yang diuji dengan menggunakan rumus berikut ini :

$$\text{BHN} = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]} \dots\dots\dots 1$$

dimana :

P = beban yang diberikan (KP atau Kgf)

D = diameter indentor yang digunakan

d = diameter bekas lekukan

Standar dari bola *Brinell* yaitu mempunyai Ø 10 mm atau 0,3937 in, dengan penyimpangan maksimal 0,005 mm atau 0,0002 in. Selain yang telah distandarkan di atas, terdapat juga bola-bola *Brinell* dengan diameter lebih kecil (Ø 5 mm, Ø 2,5 mm, Ø 2 mm, Ø 1,25 mm, Ø 1 mm, Ø 0,65 mm) yang juga mempunyai toleransi-toleransi tersendiri. Misalnya, untuk diameter 1 sampai dengan 3 mm adalah lebih kurang 0,0035 mm, antara 3 sampai dengan 6 mm adalah 0,004 mm, dan antara 6 sampai dengan 10 mm adalah 0,005 mm. Penggunaannya bergantung pada gaya tekan P dan jenis logam yang diuji, maka penguji harus dapat memilih diameter bola yang paling sesuai.

## 3. Metode Pengujian *Vickers*

Metode *Vickers* ini berdasarkan pada penekanan oleh suatu gaya tekan tertentu oleh sebuah indentor berupa **pyramid diamond terbalik** dengan

sudut puncak  $136^\circ$  ke permukaan logam yang akan diuji kekerasannya, dimana permukaan logam yang diuji ini harus rata dan bersih.

Setelah gaya tekan secara statis ini kemudian ditiadakan dan *pyramid diamond* dikeluarkan dari bekas yang terjadi, maka diagonal segi empat bekas teratas diukur secara teliti, yang digunakan sebagai kekerasan logam yang akan diuji. Permukaan bekas merupakan segi empat karena *pyramid* merupakan piramida sama sisi. Nilai kekerasan yang diperoleh disebut sebagai kekerasan *Vickers*, yang biasa disingkat dengan Hv atau HVN (*Vickers Hardness Number*). Untuk memperoleh nilai kekerasan *Vickers*, maka hasil penekanan yang diperoleh dimasukkan ke dalam rumus berikut ini :

$$H_v = \frac{2 F \sin \theta_2}{D^2} = \frac{1,8554 F}{D^2} \dots\dots\dots 2$$

dimana:

F = beban yang digunakan (kg)

D = panjang diagonal rata-rata (mm)

$\theta$  = sudut antara permukaan intan yang berhadapan =  $136^\circ$

Hal terpenting yang harus dipelajari dalam pengujian *Vickers* adalah bagaimana menggunakan alat uji kekerasan *Vickers* dalam hal memasang indenter *pyramid diamond*, dan meletakkan *specimen* di tempatnya. (Doddi, 2012)

### III. METODOLOGI PENELITIAN

#### A. Alat dan Bahan

Adapun Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

##### 1. Alat

###### a. Tungku *furnace*



Gambar 14. Tungku *furnace* di laboratorium material Universitas Lampung

Tungku *furnace* yang terdapat di laboratorium material Teknik Mesin Universitas Lampung yang ada pada gambar diatas, digunakan untuk memberikan perlakuan panas pada Aluminium seri 6061, baik digunakan untuk proses *quenching* ataupun perlakuan panas *holding time* pada proses *artificial aging*.

b. Alat uji kekerasan



Gambar 15. Alat uji kekerasan di laboratorium material Universitas Lampung

Alat uji kekerasan atau *hardness tester* pada gambar diatas merupakan alat uji kekerasan yang terdapat di laboratorium material Teknik Mesin Universitas Lampung dengan standar DIN 50103. Dalam penelitian ini alat tersebut digunakan untuk menguji tingkat kekerasan aluminium seri 6061 sebelum mendapat perlakuan panas dan sesudah mendapat perlakuan *artificial aging*. Adapun dalam penelitian ini, pengujian kekerasan dilakukan dengan menggunakan metode *rockwell* (HRB) dan menggunakan indenter bola baja 1/16”.

Spesifikasi alat :

Nama Alat	<i>Hardness Tester</i>
Pre Load	10 kgf (98,07 N)
Test Load	60 -100 – 150 Rockwell 63,5 – 125 – 187,5 Brinell
	10-60 Vickers
Working	Rockwell traditional – electronic control
Feasible test	Rockwell, Brinell + Vickers
Hight and DepthCapacity	215 x 190 mm
Diameter of coloumn and anvil	60 x 60 mm
Max load	1.000 kg

c. *Optical emission spectrometer spectromax*



Gambar 16. *Optical emission spectrometer spectromax* (alat uji komposisi kimia) laboratorium LIPI Tanjung Bintang

*Optical emission spectrometer spectromax* atau alat uji komposisi kimia seperti pada gambar diatas merupakan alat uji yang ada di laboratorium LIPI Tanjung Bintang, Lampung. Alat tersebut digunakan untuk menganalisa logam, proses kontrol, dan pengecoran logam, adapun Jenis logam yang dapat dianalisa yaitu : *Iron base (Low alloy steel, cast iron, stainless Steel, manganese steel) Copper base (bronze, Brass, high purity copper) Aluminium base (Low alloy aluminium dll)*.

Prinsip kerja dari alat tersebut, yaitu mengukur intensitas dari energi atau radiasi yang dipancarkan dalam bentuk sinar oleh atom-atom yang mengalami perubahan tingkat energi elektron (eksitasi, de-eksitasi). Atom-atom tereksitasi dihasilkan dari proses pembakaran lokal pada permukaan bahan, dimana pembakaran lokal tersebut mengakibatkan molekul-molekul senyawa menguap dan terurai menjadi atom-atom unsur yang bersangkutan. Pada keadaan ini, terjadi eksitasi elektron dari tingkat energi terendah ke tingkat energi yang lebih tinggi. Kemudian sambil kembali ke keadaan dasar elektron akan mengemisikan energi melalui pancaran sinar.

d. Amplas



Gambar 17. Amplas

Pada penelitian ini amplas digunakan untuk meratakan permukaan aluminium seri 6061 untuk digunakan sebagai spesimen uji kekerasan, selain itu digunakan juga untuk membersihkan aluminium dari kotoran-kotoran yang menempel setelah aluminium di keluarkan dari *furnace*. Adapun dalam penelitian ini menggunakan amplas dengan ukuran kekesaran sebesar 360 dan 600.

e. Gerinda pemotong



Gambar 18. Gerinda pemotong

Dalam penelitian ini gerinda pemotong digunakan untuk memotong spesimen uji komposisi kimia dan uji kekerasan sesuai dengan ketentuan yang telah di tetapkan, yaitu dengan ukuran panjang spesimen sepanjang 1,5 cm.

f. Alat SEM EDX (*Scanning Electron Microscope*)



Gambar 19. Alat SEM EDX (*Scanning Electron Microscope*) di laboratorium F-MIPA Universitas Lampung

SEM digunakan untuk melihat struktur yang tersusun pada permukaan hasil sintering. *Scanning Electron Microscope (SEM) EVO® MA 10* adalah sebuah mikroskop elektron yang digunakan untuk menyelidiki permukaan dari objek solid secara langsung. SEM EVO® MA 10 memiliki perbesaran 10 – 3000000x, *depth of field* 4 – 0.4 mm dan resolusi sebesar 1 – 10 nm. Dilengkapinya SEM EVO® MA 10 dengan detektor Energy Dispersive X-ray (EDX) memungkinkan dilakukannya mikroanalisis secara kualitatif dan semi kuantitatif.

Spesifikasi alat :

Nama Alat	SEM-EDX Zeiss Evo ® MA 10
Resolusi	1.9 nm, 2 nm, 3nm @30 kV SE with HD, LaB <sub>6</sub> , W
	3nm, 3,4 nm @ 30 kV SE VP mode HD, W
	10nm, 15 nm @ 30 kV 1 nA with HD, LaB <sub>6</sub>
	5 nm, 8 nm @ 3kV SE with HD, LaB <sub>6</sub> or W
	8 nm, 15 nm, 20 nm @ 1kV SE with HD, LaB <sub>6</sub> , W
	6 nm @3 kV with beam deceleration
Acceleration Voltage	0,2 to 30 kV
Magnification	< 7 – 1.000.000x

## 2. Bahan

### a. Aluminium seri 6061



Gambar 20. Aluminium seri 6061

Gambar diatas merupakan penampakan dari aluminium seri 6061 yang digunakan sebagai spesimen dalam penelitian ini, terlihat pada gambar diatas terdapat aluminium yang sudah dipotong-potong dimana aluminium tersebut digunakan sebagai spesimen uji kekerasan dan juga uji komposisi kimia, dan yang masih panjang digunakan untuk proses *quenching* dan *artificial aging* yang dimasukkan kedalam *furnace*.

### b. Oli (sebagai media pendingin)

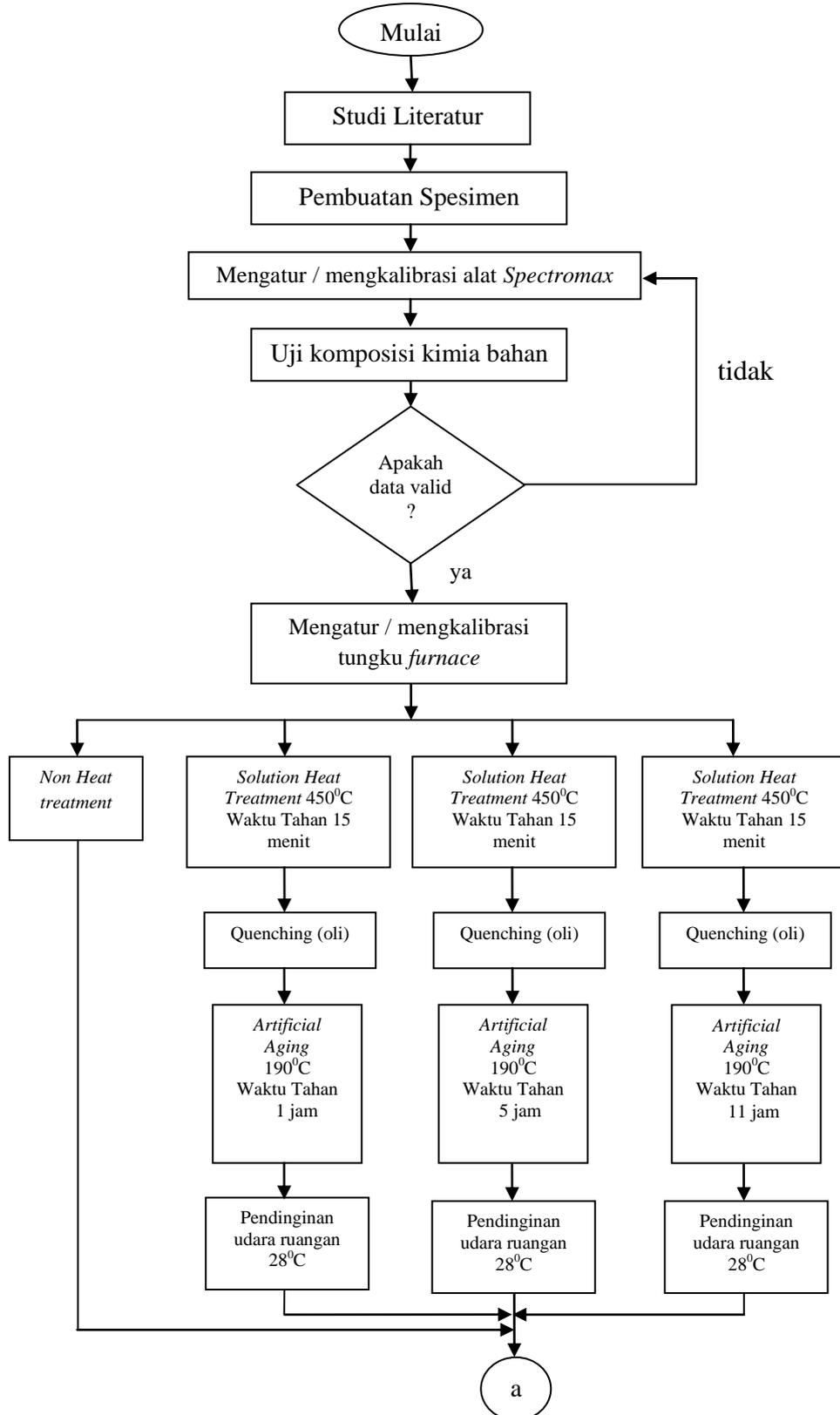


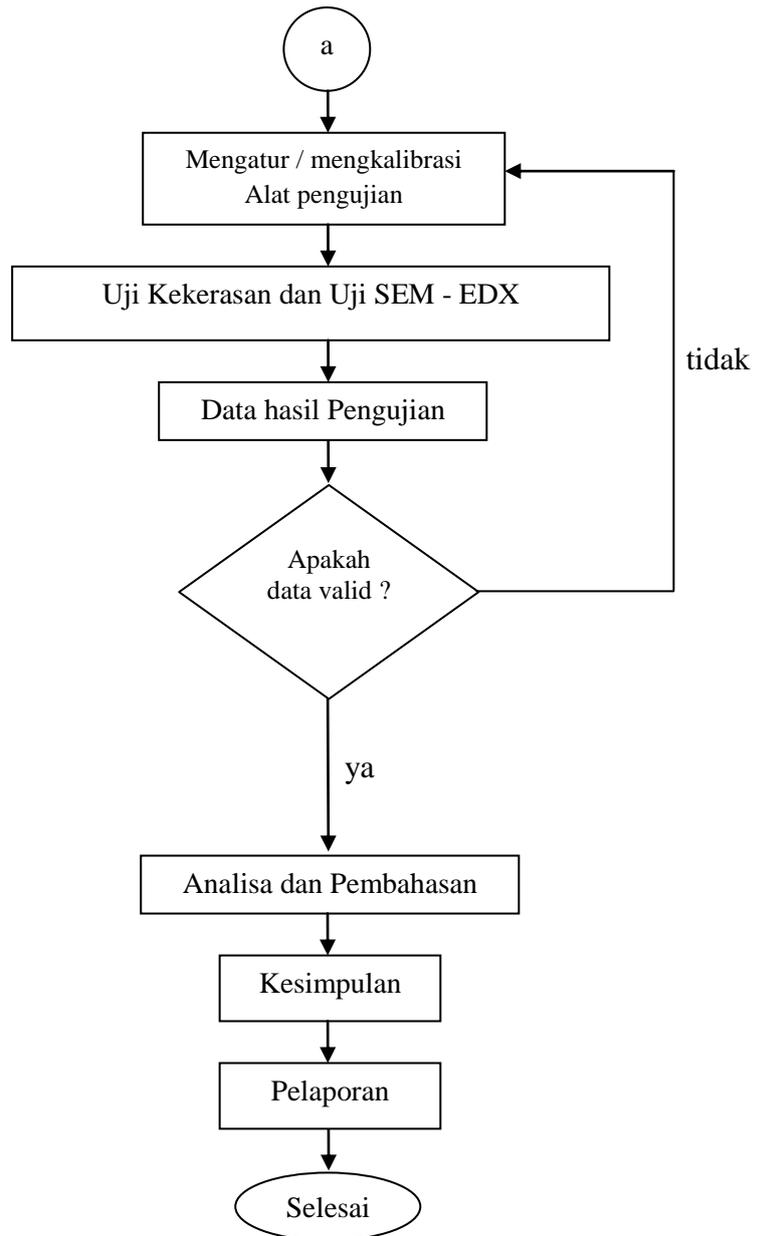
Gambar 21. Oli bekas

Gambar diatas merupakan oli bekas kendaraan bermotor, dimana dalam penelitian ini digunakan sebagai media pendingin dalam proses *quenching*.

## B. Diagram Alir Penelitian

Adapun diagram alir dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :





Gambar 22. Diagram alir penelitian

### C. Waktu dan Tempat Penelitian

Adapun waktu dan tempat pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut :

#### 1. Waktu Penelitian

Tabel 9. *Time schedule*

Aktivitas	Bulan							
	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Ags	Sep
Studi Literatur								
Pembuatan Spesimen								
Pengujian 1. Uji Komposisi Kimia 2. Masuk <i>Furnace</i> 3. Uji Kekerasan 4. Uji SEM EDX								
Analisa Hasil Pengujian								
Seminar Hasil								
Seminar Akhir								

## 2. Tempat Penelitian

Adapun Penelitian ini dilakukan di beberapa laboratorium, yaitu sebagai berikut:

- a. Laboratorium Material Teknik Mesin Universitas Lampung
- b. Laboratorium Terpadu F-MIPA Universitas Lampung, dan
- c. Laboratorium Kimia LIPI Tanjung bintang Lampung.

### D. Tabel Data Pengujian Yang Akan Dilakukan

Tabel 10. Data hasil uji kekerasan yang akan dilakukan

No uji	Kekerasan (HRB)				Keterangan
	Tanpa laku panas	Holding time 1 jam	Holding time 5 jam	Holding time 11 jam	
1					Pogram Kekerasan Rockwel B Beban 100 Kgf Indentor Intan 1/16"
2					
3					
4					
5					
Rata rata					

Adapun tabel di atas merupakan tabel untuk uji kekerasan yang akan dilakukan dalam penelitian ini. Sesuai dengan diagram alir penelitian ini pada gambar 22 di atas, bahwa variasi waktu tahan pemanasan atau *holding time* untuk proses *artificial aging* itu sendiri dilakukan dengan empat variasi yaitu tanpa perlakuan panas, kemudian *holding time* 1 jam, 5 jam dan 11 jam, maka pada tabel uji kekerasan yang akan dilakukan juga dibuat empat kolom untuk mendapatkan nilai kekerasan dari setiap variasi tersebut.

Untuk mengetahui pengaruh dari proses *artificial aging* yang akan dilakukan dalam penelitian ini, pemilihan variasi waktu tahan pemanasan atau *holding time* berdasarkan teori yang telah dikemukakan ataupun berdasarkan data-data yang telah diperoleh beberapa peneliti yang sudah dilakukan.

Pada penelitian Mursalin tahun 2009 yang dilakukan di ITS dengan judul penelitian “Pengaruh Perlakuan Panas *Aging* Terhadap Perilaku Korosi Paduan Aluminium Seri 6061 Dalam Larutan 0,05m Hcl”, beliau melakukan penelitian dengan temperatur proses *artificial aging* 180<sup>0</sup>C dan variasi waktu pemanasan yang digunakan yaitu 1 jam, 7 jam, 11 jam, dan 24 jam. Dalam penelitian Mursalin tersebut, beliau mendapatkan nilai kekerasan yang bervariasi yaitu pada *holding time* 1 jam nilai kekerasannya menurun sebesar 3.8% dari sampel yang tidak dipanaskan dengan nilai kekerasan rata sebesar (71,7±5,56) VHN, dan untuk *holding time* 7 jam, dan 11 jam nilai kekerasannya meningkat sebesar (88,8±1,67) dan (99.1±3,96) VHN, tetapi kekerasannya menurun kembali pada *holding time* 24 jam dengan nilai rata-rata kekerasan sebesar (84.0±2,63) VHN.

Selain dari penelitian yang dilakukan oleh Mursalin, terdapat penelitian yang dapat menjadi acuan dan dapat dipertimbangkan, yaitu penelitian yang dilakukan oleh Toga Agung Saputra pada tahun 2014 yang dilakukan di UMS dengan judul penelitian “Analisa *Heat Treatment* Pada Aluminium Magnesium Silikon (Al – Mg – Si) Dengan Silikon (Si) (1%, 3%, 5%) Terhadap Sifat Fisis Dan Mekanis”, dalam penelitiannya beliau melakukan penelitian dengan temperatur proses *artificial aging* 125<sup>0</sup>C dan waktu pemanasan yang digunakan yaitu 1 jam saja, namun untuk proses quenchingnya beliau melakukan variasi waktu tahan pemanasan 1 jam, 2 jam, dan 3 jam. Dari penelitian Toga didapatkan nilai kekerasan yang bervariasi namun tidak terlihat perbedaan nilai kekerasan yang signifikan dari setiap variasi pemanasan yang beliau lakukan. Kenaikan nilai kekerasan dari setiap variasinya adalah 42,23 HVN untuk tanpa perlakuan panas, meningkat menjadi 43,88 HVN, 44,89 HVN, dan 45,97 HVN untuk setiap variasi pemanasan.

Pada penelitian ini akan dilakukan dengan temperatur pemanasan untuk proses *quenching* sebesar 450<sup>0</sup>C dengan waktu tahan pemanasan selama 15 menit, dan variasi *holding time* untuk proses *artificial aging* dilakukan yaitu 1 jam, 5 jam, dan 11 jam dengan temperatur pemanasan sebesar 190<sup>0</sup>C. Adapun pemilihan temperatur pemanasan proses *quenching* dan *artificial aging* variasi tersebut berdasarkan teori yang sudah ada, dan pemilihan variasi *holding time* berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya guna memperbaiki dan membedakan dari penelitian yang sudah pernah dilakukan, seperti pada penelitian Mursalin dan Toga yang telah dikemukakan di atas.

## V. KESIMPULAN DAN SARAN

### A. Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang didapatkan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dalam penelitian ini didapatkan nilai kekerasan tertinggi pada bahan dengan variasi *holding time* 5 jam sebesar 79,6 (HRB), dan mengalami penurunan nilai kekerasan pada bahan dengan variasi *holding time* 11 jam sebesar 50,4 (HRB), dikarenakan pada bahan tersebut sudah mengalami *over aging*.
2. Hasil SEM EDX menunjukkan bahwa persentase unsur Al pada bahan dengan variasi *holding time* 5 jam menurun dari persentase unsur Al pada bahan lainnya. Penurunan persentase Al dapat diartikan bahwa pada bahan yang mendapat perlakuan *artificial aging* terdapat endapan presipitat atau terbentuknya fasa kedua yang menjadi penyebab bahan tersebut lebih keras dan lebih baik sifat mekanisnya.
3. Hasil uji kekerasan dan uji SEM EDX membuktikan adanya pengaruh proses *artificial aging* terhadap bahan aluminium seri 6061, dimana bahan tersebut mengalami perubahan sifat mekanis yang lebih baik.

## B. Saran

Adapun saran yang dapat disampaikan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Karena pada penelitian ini terbatas akan fasilitas yang kurang memadai, khususnya untuk laboratorium yang ada di wilayah Lampung, maka sebaiknya pada penelitian berikutnya dilengkapi dengan pengujian XRD yang ada di laboratorium diluar wilayah Lampung, dengan tujuan agar dalam penelitian tersebut dapat membuktikan secara akurat terbentuknya fasa kedua pada proses *artificial aging* yang dilakukan.
2. Mengingat nilai kekerasan bahan pada proses perlakuan *artificial aging* akan menurun jika dilakukan pengujian lebih dari 100 hari setelah bahan tersebut di beri perlakuan, maka sebaiknya dalam pengambilan data pada proses pengujian dilakukan lebih dari 24 jam dan kurang dari 100 hari setelah bahan mendapat perlakuan *artificial aging*.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anonim, 2010, Proses Thermal Logam, Diakses di: <http://ft.unsada.ac.id/wp-content/uploads/2010/02/bab7b-mt.pdf>. Pada tanggal: 5 Desember 2016. Pukul 08.00 WIB.
- Anonim, 2012, Sejarah Aluminium, Diakses di: <http://repository.usu.ac.id/bitstream/123456789/20315/3/chapter%20II.pdf>. Pada tanggal: 5 Desember 2016. Pukul 08.45 WIB.
- Anonim, 2015, Aluminium Paduan, Diakses di: <http://repository.usu.ac.id/bitstream/123456789/48013/4/chapter%20II.pdf>. Pada tanggal: 15 Februari 2017. Pukul 10.45 WIB.
- Anrinal, 2011, Perlakuan Panas, Diakses di: <http://bahanajar.itp.ac.id/index.php?dir=Anrinal/metalurgi%20Fisika/materi%20Ajar%20%28Pdf-Version%29/&file=11-12%20Perlakuan%20Panas.pdf>. Pada tanggal 12 januari 2017. Pukul 15.00 WIB.
- Aptika, 2009, Teknologi Penginderaan Mikrokopi, Diakses di: <http://indice.blog.uns.ac.id/files/2010/05/karakteristik-mikroskopi.pdf>. Pada tanggal 15 Maret 2017. Pukul 16.00 WIB.
- Doddi, 2012, Pengujian Logam, Diakses di: [http://doddi\\_y.staff.gunadarma.ac.id/download/files/27227/2.pdf](http://doddi_y.staff.gunadarma.ac.id/download/files/27227/2.pdf). Pada tanggal: 27 Desember 2016. Pukul 09.00 WIB
- Fuad, 2010, Perlakuan Panas Pada Paduan Al-Si, Diakses di: <http://eprint.undip.ac.id/25530/1/Fuad.pdf>. Pada tanggal: 24 Desember 2016. Pukul 13.00 WIB.
- Hadi, 2011, Hardness Testing, Diakses di: <http://hadisaputrameng.files.wordpress.com/2011/09/pertemuan-ke-2-properties-of-materials-and-testing-page-02.pdf>. Pada tanggal: 17 Mei 2017. Pukul 14.00 WIB.
- Hatch, 1984, *Aluminium Properties and Physical Metallurgy*, ASM Internasional Ohio
- Husaini, 2006, Perilaku Retak Aluminium Paduan A6061-T6 Pada Pembebanan *Mixed Mode*. Jurnal Teknik Mesin Vol 8.No 1 Hal 26-32
- Jaya, 2015, *Heat treatment*, Diakses di: <http://digilib.unila.ac.id/141442/17/BAB%20II.pdf>. Pada tanggal: 30 November 2016. Pukul 13.00 WIB.

Masgik, 2010, *Heat Treatment* pada Aluminium paduan, Diakses di: [http:// matru.din.files.wordpress.com/2013/10/material-teknik-08th.pdf](http://matru.din.files.wordpress.com/2013/10/material-teknik-08th.pdf). Pada tanggal: 27 Desember 2016. Pukul 09.00 WIB.

Smith, 1995, *Material Science and Engineering (secound edition)*, New York. Mc Grew.Hili.inc. Diakses di: <http://trove.nla.gov.au/work/17704220>. pada tanggal: 18 Januari 2017 pukul 12.30 WIB.

Surdia T Saito, 1995, *Pengetahuan Bahan Teknik*, PT.Pradnya Paramita, Jakarta.

Van Vlack, L. H., 1991, *Ilmu dan Teknologi Bahan (Ilmu Logam dan Bukan Logam)*, Edisi kelima. Diterjemahkan oleh Sriati Djaprie, Erlangga, Jakarta.