UNIVERSITAS
KRISTEN
INDONESIA

Fakultas Teknik

SURAT TUGAS

No. 39-B/UKI.F6.D/2020

FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS KRISTEN INDONESIA TENTANG TUGAS MELAKUKAN KEGIATAN PENELITIAN

Dalam rangka menyelenggarakan kegiatan Penelitian Fakultas Teknik Universitas Kristen Indonesia, Jakarta maka dengan ini Pimpinan Fakultas :

Nama	:	Ir. Galuh Widati,MSc.
NIP/NIDN	:	03.261261.03
Pangkat/Golongan	:	Lektor/IVA
Jabatan Fungsional	:	Dekan
Unit Kerja	:	Fakultas Teknik UKI

Berdasarkan Surat Keputusan Rektor Universitas Kristen Indonesia Nomor : 93/UKI.R/SK/SDM.8/2018 tentang pengangkatan Ir. Galuh Widati,MSc. Sebagai Dekan Fakultas Teknik Universitas Kristen Indonesia masa kerja 2018-2022 menugaskan:

Nama	:	Susilo, S.Kom,.MT
NIP/NIDN	:	102742 / 0315057902
Pangkat/Golongan /Ruang	:	Asisten Ahli / IIIA
Unit Kerja	:	Fakultas Teknik UKI

Untuk melakukan Penelitian dengan judul:

“Intesis Paduan Alumunium (6061) dengan Metalurgi Butiran dan Proses T6 untuk Bahan Fin Roket"

Semester Genap Tahun Akademik 2019/2020.

Demikian Surat Tugas ini kami buat untuk dilaksanakan pada semester tersebut di atas dengan penuh tanggung jawab.

Jakarta, 29 Januari 2020
Dekan,

Ir. Galuh Widati,MSc .

LAPORAN AKHIR PENELITIAN KELOMPOK

SINTESIS PADUAN ALUMUNIUM (6061) DENGAN METALURGI SERBUK DAN PROSES T6 UNTUK BAHAN FIN ROKET

Oleh :
Ir. Budiarto, M.Sc (T.M, FT, UKI)
Susilo, S.Kom, MT (T.E, FT, UKI)
Kombes Ir.Ulung Sanjaya,MT (Puslabfor-POLRI)

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS KRISTEN INDONESIA
SEPTEMBER 2019

ABSTRAK

SINTESIS PADUAN ALUMUNIUM (6061) DENGAN METALURGI SERBUK DAN PROSES T6 UNTUK BAHAN FIN ROKET. Akan dilakukan sintesis paduan alumunium (6061) dengan metalurgi serbuk dan perlakuan panas T6 serta analisis karakterisasinya untuk bahan fin (sayap) satelit. Fin berfungsi sebagai pengarah aliran udara dari ujung satelit menuju belakang. Oleh karena itu fin berfungsi membuat gerakan satelit lebih stabil, untuk itu diperlukan bahan yang kuat, ringan, tahan korosi, dan konduktifitas termal yang baik. Paduan Al-6061 dan perlakuan panas T6 dapat meningkatkan kualitas dari performa bahan konstruksi pada industri rekayasa satelit, kususnya bahan fin. Bahan serbuk alumunium, silikon, magnesium dengan kemurnian diatas 99% untuk pembuatan paduan Al-6961 menggunakan metode metalurgi serbuk. Diawali dengan penimbangan dengan timbangan analitik serbuk alumuniun, serbuk silikon, dan serbuk magnesium sesuai ratio perbandingan berat. Pencampuran ketiga serbuk dengan ball mill dengan kecepatan sekitar 3000 rpm. Memasukan campuran ketiga serbuk(Al, Si, Mg) tersebut pada dies silinder ukuran 10 mm dengan penimbangan berat ingot yang sama sekitar 10 gram per sampel. Pengompakan campuran ketiga serbuk tersebut dengan mesin pres 10-20 ton. Pemanasan sintering pada temperature 600^0C selama l jam, kemudian didinginkan perlahan-lahan hingga temperatur kamar. Selanjutnya dilakukan proses T6 dimulai dengan pada *solution heat treatmment* pada temperatur 530°C. kemudian *Quenching* (celup cepat) pada temperatur ruang media udara. Serta proses *artificial aging* (penuaan buatan) dengan variasi waktu penahanan 1jam, 24 jam, dan 30 jam, serta pada temperatur tetap 200°C. pada paduan Al 6061 menunjukkan bahwa proses T6 dapat mengakibatkan terjadinya rekristalisasi dan pertumbuhan butir, yang terbukti dengan naiknya regangan mikro kisi dan diameter kristalit dari fasa α-Al pada bidang indeks Miller (111), (200), (220), dan (311) waktu 24 jam, serta turunnya kerapatan dislokasi pada sampel paduan Al 6061. Nilai kekerasan menurun seiring dengan penambahan waktu penuaan. Hal ini disebabkan karena bergabungnya presipitat sebagai fase dua Mg_2Si menjadi partikel berukuran yang lebih besar yang mengakibatkan penghalang pergerakan dislokasi menjadi semakin lemah, sehingga nilai kekerasan (sifat mekanik) menurun. Berubahnya bentuk butir setelah penuaan buatan ini akibat deformasi sehingga mengubah bentuk butiran bahan paduan Al 6061. Hal ini juga akan berdampak pada sifat mekanik yaitu kekerasan yang dihasilkan.

Kata kunci: paduan Al-6061 dan T6, strukturmikro, strukturkristal, kekerasan, metalurgi serbuk.

D a f t a r I s i

Bab	Judul	Halaman
	Halaman Judul	1
	Abstrak	2
	Daftar Isi	3
	Daftar Tabel	5
	Daftar Gambar	6
1	Pendahuluan	7
	1.1 Latar belakang	7
	1.2 Kerangka berpikir	9
	1.3 Perumusan masalah	10
	1.4 Tujuan penelitian	10
	1.5 Out put yang diharapkan	10
	1.6 Kegunaan penelitian	10
2	Tinjauan Pustaka	11
	2.1 Teori	11
	2.2 Sifat khusus serbuk logam	14
	2.3 Langkah dasar metalurgi serbuk	16
	2.4 Prinsip kerja metalurgi serbuk	17
	2.5 Cara pembuatan serbuk	18
	2.6 pengujian material	19
3	Metodologi	27
	3.1 Bahan	27
	3.2 Alat	28
	3.3 Cara kerja	33

4 Hasil dan Pembahasan 34
4.1 Analisa diameter Kristal, kerapatan dislokasi, dan regangan kisi Mikro 34
4.2 Analisa kekerasan dengan skala Vickers 41
4.3 Analisa Struktur mikro dengan SEM-EDX 44
5 Kesimpulan 47
Ucapan Terima kasih 48
Daftar Pustaka 48

DAFTAR TABEL

Nomor	Keterangan	Halaman
Tabel 2.1	Standar ukuran butir	8
Tabel 4.1b	Puncak difraksi sinar-X dari paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ penuaan buatan waktu 1 jam, variasi temperatur 140 ^{0}C	36
Tabel 4.2b	Puncak difraksi sinar-X dari paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ penuaan buatan waktu 1 jam, variasi temperatur 170 ^{0}C	37
Tabel 4.3b	Puncak difraksi sinar-X dari paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ penuaan buatan waktu 1 jam, variasi temperatur 200 ^{0}C	37
Tabel 4.2.1a	Hasil pengujian Kekerasan skala mikro Vickers dari paduan Al 6061	40
Tabel 4.2.1b	Hasil pengujian Kekerasan skala mikro Vickers dari paduan Al 6061	41

DAFTAR GAMBAR

Nomor	Keterangan	Halaman
Gambar 2.1	Skema *heat treatment* T6 pada paduan alumunium	
Gambar 2.2	Langkah langkah Dasar pada Metalurgi Serbuk	9
Gambar 2.3	Berbagai cara pembentukan serbuk	16
Gambar 2.4	Contoh produk dari serbuk logam (gear, roda gigi, spare parts)	16
Gambar 2.5	Skematik SEM-EDXS	17
Gambar 2.6	Skema pengujian Brihnell	18
Gambar 3.1	Alat mesin press untuk pembuatan sampel, tekanan 20 ton.	28
Gambar 3.2	Timbangan analitik	29
Gambar 3.3	Furnace	29
Gambar 3.4	Alat Hardness Test skala Vickers	29
Gambar 3.5	Alat Optical Emisi Spektrometer	30
Gambar 3.6	Alat Difraktometer sinar-X	30
Gambar 3.7	Alat Scanning Elektron Mikroskop (SEM-EDXS)	30
Gambar 3.8	Diagram alir penelitian	32
Gambar4.1.1a.	Difraktogram dari paduan Al 6061, penuaan buatan temperatur 200 ^{0}C, dengan waktu tahan 1 jam, 24 jam, dan 30 jam.	34
Gambar4.1.2a.	Grafik hubungan antara bidang Indek Miller dengan ukuran kristal pada variasi waktu tahan penuaan buatan paduan Al 6061	34
Gambar4.1.3a.	Grafik hubungan antara bidang Indek Miller dengan kerapatan dislokasi pada variasi waktu tahan penuaan buatan paduan Al 6061	37
Gambar4.1.4a.	Grafik hubungan antara bidang Indek Miller dengan regangan kisi mikro pada variasi waktu tahan penuaan buatan paduan Al 6061	37
Gambar4.1.1b.	Difraktogram sinar-X dari paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ waktu penuaan buatan 1jam, variasi temperatur 140,170,dan 200 ^{0}C	40
Gambar4.1.2b.	Grafik hubungan antara bidang Indek Miller dengan ukuran kristal pada variasi temperatur penuaan buatan paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$	40
Gambar4.1.3b.	Grafik hubungan antara bidang Indek Miller dengan kerapatan dislokasi pada variasi temperatur penuaan buatan paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$	41
Gambar4.1.4b.	Grafik hubungan antara bidang Indek Miller dengan regangan kisi mikro pada variasi temperatur penuaan buatan paduan	41

	$Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$	
Gambar4.2.1a.	Grafik hubungan kekerasan terhadap proses T6 dan penuaan buatan pada paduan Al 6061.	42
Gambar4.2.1b.	Grafik hubungan nilai kekerasan terhadap kondisi uji pada paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ 1).as cast, 2). *Solid solution*, 3). *Artificially age* 140 ^{0}C, 4). *Artificially age* 170 ^{0}C, 5). *Artificially age* 200 ^{0}C	43
Gambar4.3.1a.	Mikrogram paduan Al 6061 penuaan buatan temperatur 200 ^{0}C, waktu 1jam, pembesaran 10.000X	44
Gambar4.3.2a.	Mikrogram paduan Al 6061 penuaan buatan temperatur 200 ^{0}C, waktu 24jam, pembesaran 10.000X	44
Gambar4.3.3a.	Mikrogram paduan Al 6061 penuaan buatan temperatur 200 ^{0}C, waktu 30jam, pembesaran 10.000X	44
Gambar4.3.1b.	Mikrograf dari paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$, Penuaan buatan temperatur 140 ^{0}C, pembesaran 3000X	45
Gambar4.3.2b.	Mikrograf dari paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$, Penuaan buatan temperatur 170 ^{0}C, pembesaran 3000X	45
Gambar4.3.3b.	Mikrograf dari paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$, Penuaan buatan temperatur 200 ^{0}C, pembesaran 3000X	45

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Satelit adalah suatu benda diluar angkasa yang berputar mengelilingi planet (bumi) dengan rotasi dan orbit tertentu. Struktur adalah hal yang tidak terpisahkan dari satelit. Pada umumnya struktur satelit terdiri dari struktur utama (*main structure*) dan struktur penunjang (*secondary structure*). Struktur utama adalah struktur yang berfungsi sebagai tempat untuk meletakkan seluruh subsistem satelit dan untuk mentransmisikan beban ke dasar satelit. Struktur penunjang adalah struktur yang melekat pada struktur utama satelit yang berfungsi sebagai penunjang untuk mendukung diri mereka sendiri seperti baffel, pelat solar panel, dan dudukan subsistem. Fungsi dari struktur satelit adalah sebagai tempat untuk meletakkan subsistem, penghubung (*interface*) dengan wahana peluncur/satelit, dan sebagai pelindung subsistem dari gangguan-gangguan luar, baik selama di bumi, pada saat proses peluncuran (didalam satelit), maupun pada saat di orbit.

Fin(sayap) adalah bagian yang sangat penting dari sebuah satelit. Fin (sayap) berfungsi sebagai pengarah aliran udara dari ujung satelit menuju belakang. Oleh karena itu fin berfungsi membuat gerakan satelit lebih stabil. Seperti halnya nose cone, bentuk fin juga berpengaruh pada kestabilan. Kecepatan satelit juga berpengaruh pada pemilihan bentuk fin.

Lebar fin juga mempengaruhi luas penampang satelit, makin lebar fin, makin lebar pula luas penampang satelit. Makin lebar luas penampang satelit makin mudah satelit mengalirkan udara, tetapi juga makin besar hambatan udara yang diterima satelit.

Roket saat akan terbang menggunakan sayap untuk mendapatkan gaya angkat yang sebanding dengan berat total roket tersebut. Selain itu roket dilengkapi dengan fin (sirip) atau ekor yang berguna sebagai penyeimbang dari ketidakstabilan dinamik pada roketnya. Perbedaan fungsi antara sirip dengan sayap, dimana gaya angkat sirip digunakan sebagai pemulih keseimbangan roket yang berporos pada pusat gaya (titik berat) roket, sedangkan gaya angkat sayap digunakan untuk mengimbangi berat roket.[1] Bentuk penampang sirip ada beberapa macam jenisnya, tergantung dari bahan dasar pembuatan paduaannya. Dimana spesifikasi bahan paduan logam yang lebih ringan massanya misalkan paduan alumunium 6061 dan 7075, gaya angkat sayap

digunakan untuk mengimbangi berat roket, sedangkan yang digunakan akan berpengaruh terhadap tingkat kesulitan dalam proses pabrikasi sirip tersebut. Salah satu cara untuk pembuatan paduan adalah metalurgi serbuk. Metalurgi serbuk adalah bagian dari ilmu metalurgi yang menggunakan serbuk logam sebagai bahan dasar atau bahan utama tanpa melalui proses peleburan. Pada proses ini serbuk logam terlebih dahulu dipadatkan atau dikompaksi sesuai dengan bentuk yang diinginkan. Kemudian dipanaskan yang bertujuan untuk memperoleh ikatan padat dan kuat antar partikel. Pemanasan dilakukan di bawah titik lebur dari serbuk logam yang diproses tersebut. Energi yang digunakan dalam proses ini relatif rendah dan hasil akhirnya dapat langsung disesuaikan dengan dimensi yang diinginkan, sehingga mengurangi biaya permesinan dan bahan baku. Produksi metalurgi serbuk banyak digunakan di industri terutama untuk komponen mesin. seperti bantalan dan roda gigi, bahan cutting, bahan ball mill, dan sebagainya. Sifat-fisik dari produk yang dibuat dengan metode metalurgi serbuk banyak tergantung dari proses pengerjaan dan karakteristik serbuknya. Oleh karena itu, kualitas produk akhir ditentukan oleh berbagai parameter proses seperti material awal yang digunakan, ukuran partikel serbuk, komposisi prosentase serbuk, tekanan kompaksi, suhu *sintering* dan lama waktu *sintering.*

Dalam penelitian ini pemaduan CuNiAl dilakukan dengan menggunakan teknik metalurgi serbuk dengan variasi waktu penuaan terhadap strukturmikro, kerapatan, dan kekerasan. Dimana proses metalurgi serbuk merupakan salah satu proses yang digunakan untuk membentuk material. Keunggulan dari proses ini agar dicapai pembentukan butir yang halus, sehingga kemungkinan terjadinya retak antar butir (granular cracking) ketika deformasi dapat dihindarkan dan terdapat hubungan yang signifikan antara waktu penuaan dengan kerapatan dan kekerasan paduan CuNiAI dimana makin lama waktu penuaan, kerapatan dan kekerasan meningkat.[2]

Penelitian Anugerah [3], menggunakan paduan Al-Cu 4.5% sebelum dan sesudah *remelting* sebanyak 4 kali baru diberi perlakuan *aging* suhu 200°C dengan variasi waktu 3, 6, dan 9 jam. Perlakuan *aging* selama 9 jam hasil *remelting* menyebabkan nilai keuletan menurun menjadi 0.010 J/mm^2. Perlakuan *aging* selama 6 jam menghasilkan kekerasan paling tinggi yaitu 97.93 BHN dan kekuatan tarik menurun pada saat *aging* 9 jam yaitu101.20 MPa.

Juli S, dkk[4] menggunakan *aging* pada suhu 180°C dengan variasi waktu selama 2, 4, dan 6 jam. Perlakuan *aging* selama 6 jam dan menggunakan media pendingin air garam menghasilkan butiran paling besar diameter rata-rata sebesar 165.3 nm dan butiran terkecil dengan waktu *aging* yang sama menggunakan media pendingin air sebesar 95.58 nm. Semakin lama waktu *aging,*

semakin halus(kecil) ukuran diameter rata-ratanya, kekerasan bahan, kekuatan luluh, keuletan dan ketangguhan bahan semakin meningkat. Jaelani,dkk[5], menggunakan variasi suhu 175°C, 200°C, dan 225°C dengan waktu *aging* selama 1 jam dan didinginkan dalam udara terbuka. Kekerasan, kekuatan tarik maksimum dan nilai impak terbesar dicapai pada suhu 175°C yaitu 31.66 HRB, 231.67 MPa dan 0.0290 kg.m/mm^2. Namun penurunan sifat mekanik Aluminium 6061 disebabkan suhu *aging* yang berlebihan pada suhu 200°C dan 225°C.

Metalurgi serbuk adalah bagian dari ilmu metalurgi yang menggunakan serbuk logam sebagai bahan dasar atau bahan utama tanpa melalui proses peleburan. Pada proses ini serbuk logam terlebih dahulu dipadatkan atau dikompaksi sesuai dengan bentuk yang diinginkan. Kemudian dipanaskan yang bertujuan untuk memperoleh ikatan padat dan kuat antar partikel. Pemanasan dilakukan di bawah titik lebur dari serbuk logam yang diproses tersebut. Energi yang digunakan dalam proses ini relatif rendah dan hasil akhirnya dapat langsung disesuaikan dengan dimensi yang diinginkan, sehingga mengurangi biaya permesinan dan bahan baku. Produksi metalurgi serbuk banyak digunakan di industri terutama untuk komponen mesin. seperti bantalan dan roda gigi, bahan cutting, bahan ball mill, dan sebagainya. Sifat-fisik dari produk yang dibuat dengan metode metalurgi serbuk banyak tergantung dari proses pengerjaan dan karakteristik serbuknya. Oleh karena itu, kualitas produk akhir ditentukan oleh berbagai parameter proses seperti material awal yang digunakan, ukuran partikel serbuk, komposisi prosentase serbuk, tekanan kompaksi, suhu *sintering* dan lama waktu *sintering.*

Logam yang biasa dijadikan serbuk dalam proses metalurgi serbuk antara lain aluminium, silicon. nikel, litium, karbida, magnesium dan seterusnya. Bahan serbuk yang digunakan dalam penelitian ini adalah campuran antara serbuk alumunium (Al), silikon (Si), dan magnesium (Mg). Ketiga logam tersebut memiliki karakteristik yang berbeda sehingga dapat dilakukan penggabungan dan perlakuan panas T6. Pengujian dilakukan meliputi pengamatan struktur makro, struktur mikro, pengujian sifat mekanis, dan pengujian sifat fisik dari pada setiap spesimen hasil dari proses metalurgi serbuk.

1.2 Kerangka Berpikir

Penggunaan paduan alumunium 6061 telah meningkat untuk mendukung industri alat-alat rumah tangga, infrastruktur dan sebagainya. Dalam rangka inovasi dan modifikasi pembuatan paduan alumunium 6061 untuk bahan fin/sirip roket akan dilakukan penelitian

dengan metode metalurgi serbuk yang parameternya antara lain : ratio perbandingan komposisi berat, temperature sinter, dansebagainya. Selanjutnya untuk memenuhi syarat atau spesifikasinya dilakukan proses perlakuan panas T6 dengan parameter : waktu dan temperature proses.

1.3 Perumusan masalah

Atas dasar uraian latar belakang di atas, maka secara umum permasalahan yang akan diteliti adalah bagaimana proses sintesa paduan Al-6061 dari serbuk alumunium (Al), silikon (Si), dan magnesium (Mg) dengan metalurgi serbuk dan perlakuan panas T6 untuk aplikasi kandidat bahan satelit. Secara lebih terperinci, masalah-masalah yang teridentifikasi untuk diteliti adalah sebagai berikut :

1. Pengaruh proses T6 terhadap strukturmikro dari paduan Al-6061 hasil metalurgi serbuk.
2. Pengaruh proses T6 terhadap struktur kristal dari paduan Al-6061 hasil metalurgi serbuk
3. Pengaruh proses T6 terhadap diameter kristal dari paduan Al-6061 hasil metalurgi serbuk
4. Pengaruh proses T6 terhadap kerapatan dari paduan Al-6061 hasil metalurgi serbuk
5. Pengaruh proses T6 terhadap porositas dari paduan Al-6061 hasil metalurgi serbuk
6. Pengaruh proses T6 terhadap komposisi unsur kimia secara kualitas dan kuantitas dari paduan Al-6061 hasil metalurgi serbuk

Adapun hipotesis penelitian ini adalah :

1. Serbuk Al, Si, dan Mg dapat dibuat paduan Al-6061 dengan metode metalurgi serbuk.
2. Terdapat korelasi antara temperatur T6 terhadap sifat mekanis dan sifat fisik pada paduan Al-6061.

1.4 Tujuan penelitian

Penelitian yang diusulkan ini memiliki tujuan sebagai berikut:

- Sebagai salah satu langkah awal penelitian dari sintesa paduan Al-6061 dengan metode metalurgi serbuk.
- Untuk membuat paduan Al-6061 dan proses T6 dengan karakteristik sebagai kandidat bahan konstruksi satelit.
- Mengetahui sifat mekanik dan sifat fisik dari hasil sintesa.

1.5 Output Yang diharapkan

Kegiatan diseminasi yang akan dilakukan adalah minimal pembuatan makalah untuk sebuah publikasi yaitu jurnal terakreditasi nasional dan konferensi international material dan teknologi, serta mengadakan hubungan kerjasama antara Fakultas Teknik, UKI dengan Puslabfor, Mabes POLRI.

1.6 Kegunaan Penelitian

Penelitian ini menjadi langkah awal dari penelitian yang lebih besar lagi untuk menciptakan solusi alternatif pembuatan bahan konstruksi satelit.

Dari sudut pandang ekonomi, penelitian ini dapat dikembangkan menjadi solusi murah, efektif, dan efisien di bidang rekayasa material engineering.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Teori

Aluminium adalah material yang banyak sekali digunakan untuk konstruksi, mulai dari sepeda, otomotif, kapal laut hingga pesawat udara. Keunggulan material aluminium adalah berat jenisnya yang ringan dan kekuatannya yang dapat ditingkatkan sesuai dengan kebutuhan. Kekuatan aluminium biasanya ditingkatkan dengan cara paduan (*alloying*) dan memberi perlakuan panas (*heat treatment*). Kebanyakan material aluminium ditingkatkan kekuatannya dengan suatu mekanisme penguatan bahan logam yang disebut *precipitation hardening*. Dalam *precipitation hardening* harus ada dua fasa, yaitu fasa yang jumlahnya lebih banyak disebut matriks dan fasa yang jumlahnya lebih sedikit disebut *precipitate*. Mekanisme penguatan ini meliputi tiga tahapan, yaitu a). *solid solution treatment*: memanaskan hingga diatas garis *solvus* untuk mendapatkan fasa larutan padat yang homogen, b). *quenching*: didingan dengan cepat untuk mempertahankan struktur mikro fasa padat homogen agar tidak terjadi difusi, dan c). *aging:* dipanaskan dengan temperatur tidak terlalu tinggi agar terjadi difusi fasa alpha pada jarak pendek membentuk *precipitate.*

Paduan aluminium merupakan material utama yang saat ini digunakan industri pesawat terbang komersial, bahan konstruksi satelit, dan sebagainya. Aluminium dipilih karena memiliki sifat ringan dan kekuatannya dapat dibentuk dengan cara dipadu dengan unsur lain. Permasalahan yang dihadapi adalah pemilihan jenis unsur apa yang akan dipadu dengan aluminium untuk mendapatkan karakteristik material yang dibutuhkan. Unsur paduan yang ditambahkan dan perlakuan panas (*heat treatment*) yang diberikan pada aluminium selama pemrosesan sangat mempengaruhi sifat paduan aluminium yang dihasilkan. Awalnya paduan aluminium dikembangkan dengan tujuan mendapatkan material yang kuat dan ringan. Namun, seiring dengan berkembangnya kebutuhan struktur pesawat udara komersial dengan ukuran yang semakin besar, material yang dibutuhkan tidak hanya kuat dan ringan saja. Dewasa ini paduan aluminium dikembangkan untuk mendapatkan material yang kuat, ringan, usia pakai yang lama, biaya produksi rendah, toleransi kegagalan tinggi, dan tahanan korosi yang baik.

Paduan Alumunium merupakan bahan yang banyak digunakan untuk aplikasi teknik karena memiliki beberapa keunggulan sifat yaitu: ringan, tahan karat, ulet, mampu permesinan yang baik dan lain sebagainya. Selain itu, paduan aluminium kekuatan tinggi seperti Al-6061 dengan proses T6 yang banyak dipakai pada struktur pesawat satelit.

Pada Al-7075 tahanan terhadap SCC dapat ditingkatkan melalui *overaging* misalnya dengan memberi perlakuan panas T73. Perlakuan panas T73 merupakan perlakuan panas dengan *two stage aging*, yaitu pada temperatur konstan 121^0C dan konstan 171°C. Namun, pemberian perlakuan panas T73 dapat menurunkan kekuatan hingga 10-15 % dari kekuatan maksimum yang dapat dicapai melalui perlakuan panas T6. [3,4]

Solusi untuk meningkatkan tahanan SCC dan tahanan retak (*fracture toughness*) dengan tetap mempertahankan kekuatan dari perlakuan panas T6 adalah dengan menerapkan *Retrogression dan reaging (RRA*) adalah suatu cara baru perlakuan panas (*heat treatment*) yang diterapkan pada paduan aluminium (kusunya Al-6061) yang mengalami *precipitation hardening*.

Retrogression and Reaging (RRA) dapat dilakukan dengan tahap-tahap berikut:

1. *Solution heat treatmment* pada temperatur 470°C
2. *Quenching* pada temperatur ruang
3. *Artificial aging* selama 24 jam pada temperatur 120°C
4. *Retrogression*, yaitu pemanasan(sekitar 40 menit) pada temperatur tinggi (200-280°C)
5. *Quenching*, kemudian Re-aging seperti pada T6, dengan temperatur 120°C selama 24 jam.

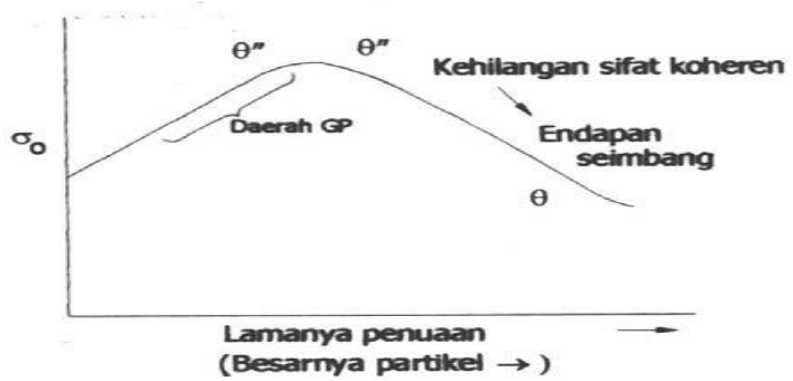
Dimana langkah 1 s/d 3 adalah tahapan pada perlakuan panas T6. Prosedur di atas menunjukkan bahwa material yang dihasilkan memiliki sifat kekutan tarik dan tahanan retak material yang sama dengan hasil perlakuan panas T6, namun dengan tahanan *stress-corrosion-cracking* yang meningkat. Seiring banyaknya produk-produk yang dihasilkan dari proses metalurgi serbuk, diharapkan hasil dari proses ini mampu menghasilkan produk yang berkualitas baik dengan biaya yang relatif murah dan mampu permesinan (machinability) yang baik, hal ini tergantung pada ductility (keuletan) yaitu mengukur kemampuan bahan yang di deformasi tanpa pecah/patah, hardness (kekerasan) yaitu mengukur kemampuan bahan menahan deformasi dengan daya atau penekanan, thermal conductivity (konduktivitas panas), dan komposisi.

Salah satu paduan alumunium yang dimanfaatkan sebagai bahan komponen produk ini adalah paduan alumunium silicon magnesium (Al-6061). Paduan ini termasuk kategori *non-heat treatable alloy*, yaitu paduan yang tidak dapat dikeraskan dengan perlakuan panas. Tetapi

kehadiran unsur seperti Mg yang membentuk presipitat MgSi, menyebabkan paduan ini dapat dikeraskan dengan perlakuan panas[5,6].

Perlakuan ini dimaksudkan agar presipitat tersebar merata, untuk meningkatkan kekerasan bahan.

Perekayasaan dengan teknik metalurgi serbuk pada produk berbasis paduan alumunium mampu menambah keunggulan dengan biaya murah. Teknik ini dapat meningkatkan kerapatan atau menurunkan porositas dan menghasilkan kehomogenan strukturmikro. Dengan data parameter proses tertentu yang akan diteliti, penerapan teknik ini diharapkan mampu memperoleh produk dengan sifat-sifat yang diinginkan, dan bisa dikembangkan lebih lanjut dengan kualitas yang lebih baik.



Gambar 2.1. Skema *heat treatment* T6 pada paduan alumunium

2.2 Sifat -Sifat Khusus Serbuk Logam

1. Ukuran Partikel

Metoda untuk menentukan ukuran partikel antara lain dengan pengayakan atau pengukuran mikroskopik. Kehalusan berkaitan erat dengan ukuran butir, faktor ini berhubungan dengan luas kontak antar permukaan, butir kecil mempunyai porositas yang kecil dan luas kotak antar permukaan besar sehingga difusi antar permukaan juga semakin besar dan kompaktibilitas juga tinggi.

Tabel 2.1 Standar ukuran butir

US standart, mesh	European standart (FEPA standart)	Main fraction grain sizes, micrometers
100/120	D 151	150 - 125
120/140	D 126	125 - 106
140/170	D 107	106 - 90
170/200	D 91	90 - 75
200/230	D 76	75 - 63
230/270	D 64	63 - 53
270/325	D 54	53 - 45
325/400	D 46	45 - 38

2. Distribusi Ukuran Dan Mampu Alir

Dengan distribusi ukuran partikel ditentukan jumlah partikel dari ukuran standar dalam serbuk tersebut. Pengaruh distribusi terhadap mampu alir dan porositas produk cukup besar. Mampu alir merupakan karakteristik yang menggambarkan alir serbuk dan kemampuan memenuhi ruang cetak.

3. Sifat Kimia

Terutama menyangkut kemurnian serbuk, jumlah oksida yang diperbolehkan dan kadar elemen lainnya. Pada metalurgi serbuk diharapkan tidak terjadi reaksi kimia antara matrik dan penguat.

4. Kompresibilitas

Kompresibilitas adalah perbandingan volum serbuk dengan volum benda yang ditekan. Nilai ini berbeda-beda dan dipengaruhi oleh distribusi ukuran dan bentuk butir, kekuatan tekan tergantung pada kompresibilitas.

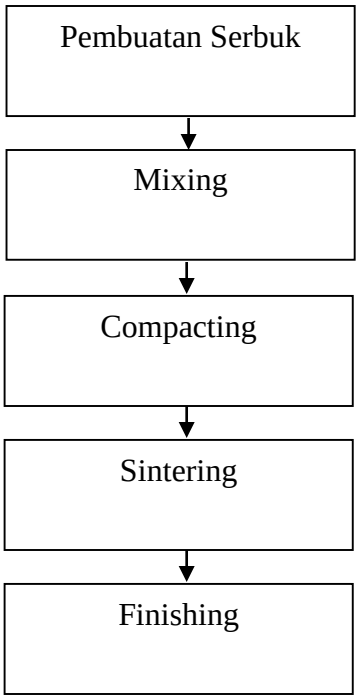
5. Kemampuan sinter

Sinter adalah proses pengikatan partikel melalui proses penekanan dengan cara dipanaskan duapertiga dari titik lelehnya.

2.3 Langkah – Langkah Dasar pada Metalurgi Serbuk

Langkah-langkah dasar pada Metalurgi Serbuk:

1. Pembuatan Serbuk.
2. Mixing.
3. Compaction.
4. Sintering.
5. Finishing.



Gambar 2.2 Diagram alir proses metalurgi butiran

2.4 Prinsip Kerja Metalurgi Butiran

Mekanisme Pembentukan

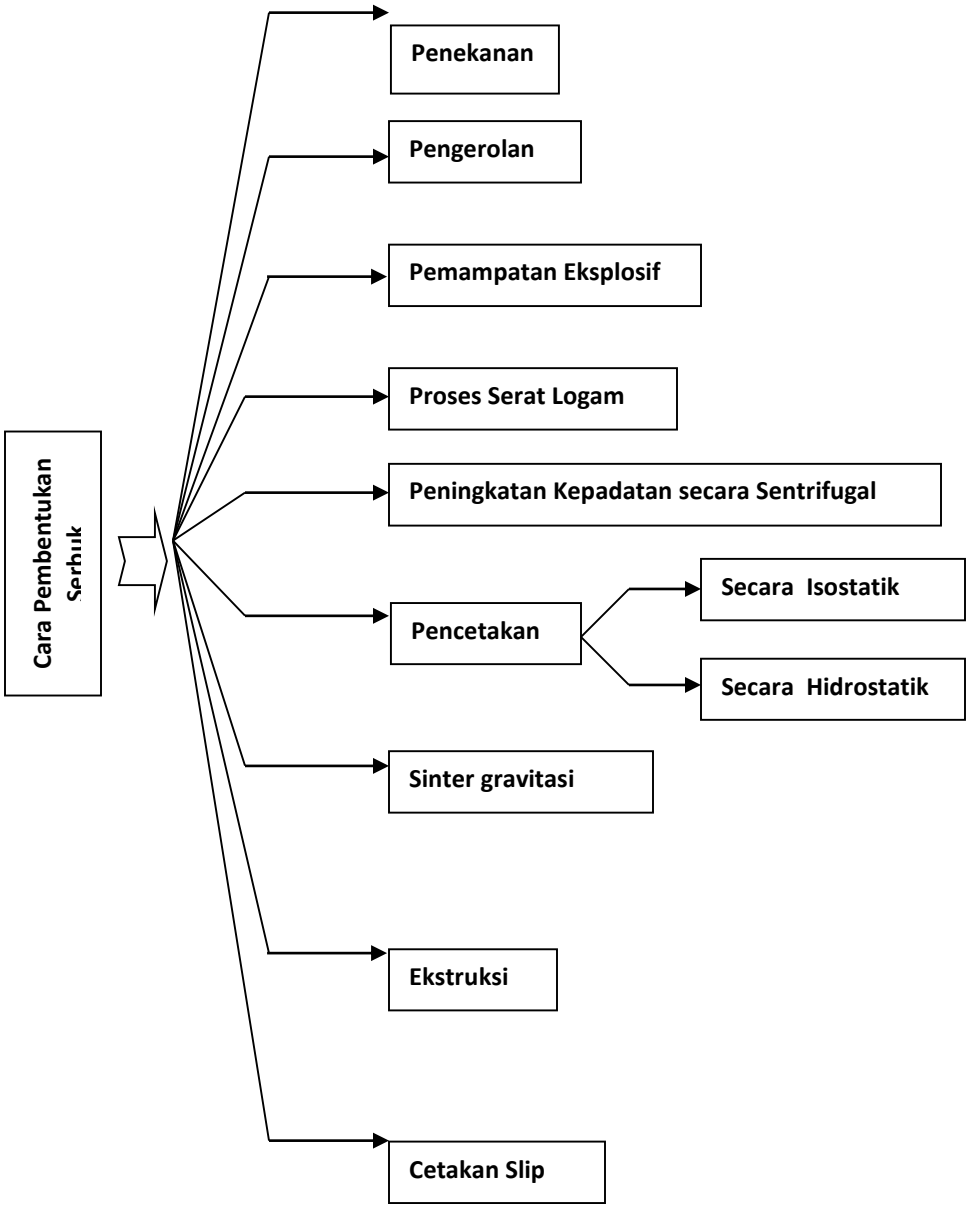
Serbuk untuk produk tertentu harus dipilih dengan teliti agar terjamin sutu proses pembentukan yang ekonomis dan diperoleh sifat-sifat yang diinginkan untuk produk akhirnya.

Bila hanya digunakan satu jenis serbuk dengan sebaran ukuran partikel yang tepat, biasanya tidak diperlukan pencampuran lagui sebelum proses penekanan. Kadang-kadang berbagai ukuran partikel serbuk dicampurkan dengan tujuan untuk merubah beberapa karakteristik tertentu seperti yang telah dijelaskan sebelumnya ; mampu alir dan berat jenis, umumnya serbuk yang ada di pasar mempunyai sebaran ukuran partikel yang memadai. Pencampuran akan sangat penting bila menggunakan campuran serbuk, atau bila ditambahkan serbuk bukan logam.Pencampuran serbuk harus dilakukan di liungkungan tertentu untuk mencegah terjadinya oksida atau kecacatan.

Hampir semua jenis serbuk memerlukan pelumas pada proses pembentukan untuk mengurangi gesekan pada dinding cetakan serta untuk memudahkan pengeluaran. Meskipun penambahan pelumas menyebakan peningkatan porositas namun sebenarnya fungsi pelumas

dimaksudkan untuk meningjkatkan tingkat produksi tang banyak digunakan pada mesin peres dengahn pengumpan otomatik. Pelumas tersebut antara lain adalah asam stearik, lithium stearat dan serbuk grafit.

Diagram pembagian berbagai proses-nya :



Gambar 2.3.Berbagai cara pembentukan serbuk

2.5 Cara pembuatan serbuk

Ada beberapa cara dalam pembuatan serbuk antara lain: decomposition, electrolytic deposition, atomization of liquid metals, mechanical processing of solid materials.

1. *Decomposition*, terjadi pada material yang berisikan elemen logam. Material akan menguraikan/memisahkan elemen-elemennya jika dipanaskan pada temperature yang cukup tinggi. Proses ini melibatkan dua reaktan, yaitu senyawa metal dan reducing agent. Kedua reaktan mungkin berwujud solid, liquid, atau gas.
2. *Atomization of Liquid Metals*, material cair dapat dijadikan powder (serbuk) dengan cara menuangkan material cair dilewatan pada nozzel yang dialiri air bertekanan, sehingga terbentuk butiran kecil-kecil.
3. *Electrolytic Deposition*, pembuatan serbuk dengan cara proses elektrolisis yang biasanya menghasilkan serbuk yang sangat reaktif dan brittle. Untuk itu material hasil electrolytic deposition perlu diberikan perlakuan annealing khusus. Bentuk butiran yang dihasilkan oleh electolitic deposits berbentuk dendritik.
4. *Mechanical Processing of Solid Materials*, pembuatan serbuk dengan cara menghancurkan yang mudah retak seperti logam murni, bismuth, antimony, paduan logam yang relative keras dan britlle, dan keramik.

Dari sekian proses pembuatan serbuk, proses yang banyak dipakai adalah proses atomisasi.

Proses pembuatan serbuk bisa di kategorikan melalui tiga macam cara yaitu : secara fisik, secara kimiawi, dan secara mekanik. Pembuatan serbuk secara fisik dapat diibaratkan sebagai proses atomisasi yaitu proses perusakan arus logam cair yang disemprot dengan bahan pendingin yang dalam hal ini dapat berupa cairan atau gas sehingga logam cair berubah menjadi tetesan padat yang berbentuk butiran. Sedangkan pembuatan serbuk dengan cara kimia melibatkan banyak reaksi dekomposisi kimia terhadap senyawa logam ini juga termasuk reaksi reduksi didalamnya. Pembuatan serbuk secara mekanik secara umum dapat dilakukan pada logam – logam yang bersifat getas sehingga mudah dihancurkan dengan diberikan gaya tekan dan dijadikan serbuk.

Proses pembuatan serbuk bisa di kategorikan melalui tiga macam cara yaitu : secara fisik, secara kimiawi, dan secara mekanik. Pembuatan serbuk secara fisik dapat diibaratkan sebagai proses atomisasi yaitu proses perusakan arus logam cair yang disemprot dengan bahan pendingin yang dalam hal ini dapat berupa cairan atau gas sehingga logam cair berubah menjadi tetesan padat

yang berbentuk butiran. Sedangkan pembuatan serbuk dengan cara kimia melibatkan banyak reaksi dekomposisi kimia terhadap senyawa logam ini juga termasuk reaksi reduksi didalamnya. Pembuatan serbuk secara mekanik secara umum dapat dilakukan pada logam – logam yang bersifat getas sehingga mudah dihancurkan dengan diberikan gaya tekan dan dijadikan serbuk.
Keuntungan metalurgi serbuk adalah:

1. Menghasilkan produk yang baik dan lebih ekonomis karena tidak ada material yang terbuang selama proses.
2. Porositas produk dapat dikendalikan dan diatur.
3. Serbuk yang murni akan menghasilkan produk yang murni.
4. Hasil produk mempunyai toleransi yang tinggi, permukaan halus, dank eras.
5. Dapat menghasilkan produk dengan bahan yang berbeda.

Gambar 2.4. Contoh produk dari serbuk logam (gear, roda gigi, spare parts)[4]

Sintering adalah salah satu tahapan metodologi yang sangat penting dalam ilmu bahan, terutama untuk bahan keramik. Selama sintering terdapat dua fenomena utama yaitu : *pertama* adalah penyusutan (shrinkage) yaitu proses eliminasi porositas dan yang *kedua* adalah pertumbuhan butiran. Fenomena yang pertama dominan selama pemadatan belum mencapai kejenuhan, sedang kedua akan dominan setelah pemadatan mencapai kejenuhan. Parameter sintering diantaranya adalah : *temperatur, waktu penahanan, kecepatan pendinginan, kecepatan pemanasan* dan *atmosfir.*

Sintering biasanya digunakan pada sampel pada temperatur tinggi. Dalam terminologi teknik istilah sintering digunakan untuk menyatakan fenomena yang terjadi pada produk bahan,

padat dibuat dari bubuk, baik logam / non logam. Sebuah kumpulan partikel dengan ukuran yang tepat (biasanya diameter beberapa mikro atau lebih kecil) dipanaskan sampai suhu antara ½ dan ¾ titik leleh, ini dalam orde menit selama perlakuan ini partikel-partikel tergabung bersama-sama.

Dari segi cairan, sintering dapat menjadi dua yaitu : sintering fasa padat dan sintering fasa cair. Sintering dengan fasa padat adalah sintering yang dilaksanakan pada suatu temperatur yang telah ditentukan, dimana dalam bahan semuanya tetap dalam fasa padat. Proses penghilagan porositas dilakukan melalui transport massa. Jika dua partikel digabung dan dipanaskan pada suhu tertentu, dua partikel ini akan berikatan bersama-sama dan akan membentuk neck. Pertumbuhan disebabkan oleh transport yang meliputi evaporasi, kondensasi, difusi.Setelah dilakukan proses sintering terhadap sample yang sebelumnya telah dilakukan proses kompaksi maka ikatan antar serbuk akan semakin kuat. Meningkatnya ikatan setelah proses sintering ini disebabkan timbulnya *liquid bridge* (*necking*) sehingga porositas berkurang dan bahan menjadi lebih kompak. Dalam hal ini ukuran serbuk juga berpengaruh terhadap kompaktibilitas bahan, semakin kecil ukuran serbuk maka porositas kecil dan luas kontak permukaan antar butir semakin luas

Makalah ini merupakan studi pengembangan terhadap teknik pembuatan paduan alumunium (Al-6061) dengan metode metalurgi serbuk yang dilanjutkan perlakuan panas T6 dan karakterisasinya sebagai kandidat bahan struktur satelit. Karakterisasinya yaitu pengujian strukturmikro permukaan dan komposisi menggunakan alat Scanning Elektron Mikrokop dan Energy Disversif X-ray Spektrometer (SEM-EDXS), pengujian kekerasan dengan mikrohardness metode Vickers, struktur kristal dan diameter kristal menggnakan alat Difraktometer Sinar-X (XRD), pengukuran kerapatan bahan dengan densitometer, titik leleh dan transisi gelas dengan alat Differensial Scanning Calorimeter atau Thermometer Glass Analyser (DSC/TGA), komposisi unsur kimia menggunakan OE-Spektrometer. Di dalam penelitian ini akan dikerjakan dengan kerjasama Fakultas Teknik, UKI dengan Pusat Laboratorium Forenstik-Mabes, POLRI untuk memanfaatkan fasilitas laboratorium yang ada.

2.6 Pengujian Material

Keberhasilan dari pengerjaan suatu material dalam aplikasi bidang teknik adalah kemampuan material tersebut sesuai dengan desain dan dapat dibentuk sesuai dengan dimensi yang

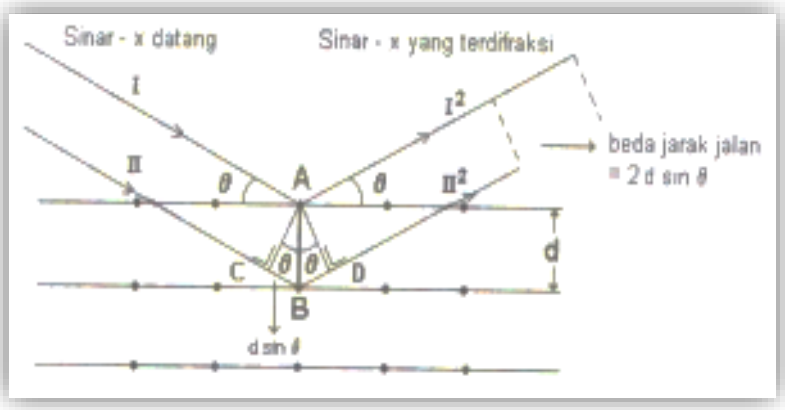
diinginkan. Kemampuan dari sebuah logam untuk memenuhi tuntutan adalah ditentukan oleh sifat mekanik/ *mechanical properties* dan sifat fisik */physical properties.* Jenis dari sifat fisik adalah berat jenis, sifat magnetis , konduktivitas termal, *specific heat* dan ekspansi thermal. Sifat mekanik/ *mechanical properties* adalah deformasi dan *fracture*. Jenis pengujian lain yang menggunakan aplikasi gaya dipakai untuk mengukur modulus elastisitas, *yield stength* , deformasi plastis dan elastis, *hardness* , dan ketanguhan *fracture*. Sifat mekanik/ *mechanical properties* sangat tergantung dengan *microstructure*/ struktur mikro (seperti besar butiran, distribusi fasa, tipe struktur dan komposisi unsur penyusun (kandungan elemen paduan).

2.6.1 Pengujian difraktometer sinar-X *(XRD).*

X-Ray Diffraction (XRD) digunakan untuk mengidentifikasi struktur kristal suatu padatan dengan membandingkan nilai jarak d (bidang kristal) dan intensitas puncak difraksi dengan data standar. Sinar-x merupakan radiasi elektromagnetik yang memiliki energi tinggi sekitar 200 eV sampai 1 MeV. Sinar x dihasilkan oleh interaksi antara berkas elektron eksternal dengan elektron pada kulit atom. Panjang gelomang sinar x memiliki orde yang sama dengan jarak antar atom sehingga dapat digunakan dalam karakteristik material untuk mendapatkan informasi ukuran atom dari material kristal maupun non Kristal.

Proses *X-Ray Diffraction (XRD)* dimulai dengan meletakkan sampel pada holder *X-Ray Diffraction (XRD)* kemudian menyalakan *X-Ray Diffraction (XRD)* sehingga diperoleh hasil difraksi berupa difraktogram yang menyatakan hubungan antara sudut difraksi 2θ dengan intensitas sinar x yang dipantulkan. Sinar x terpencar dari tabung sinar x. Sinar x didifraksikan dari sampel yang konvergen yang diterima slit dalam posisi simetris dengan respon ke fokus sinar x. Sinar x ditangkap oleh detekror sintilator dan diubah menjadi sinyal listrik. Sinyal tersebut, setelah dihilangkan komponen noise-nya dihitung sebagai analisa pulsa atau peak tinggi. Teknik difraksi sinar x juga digunakan untuk menentukan ukuran kristal, regangan kisi, komposisi kimia dan keadaan lain yang memiliki orde yang sama. Analisa difraksi sinar x berdasarkan interaksi antara berkas cahaya sinar x yang menumbuk sampel, jika sampel memiliki struktur yang berurutan, beberapa berkas cahaya sinar x akan berubah arah pada sudut tersendiri tergantung dari struktur sampel dan panjang gelombang. Oleh sebab itu XRD diketahui dimensi kisi (d = jarak antar kisi) dalam struktur mineral. Sehingga dapat ditentukan apakah suatu material mempunyai kerapatan yang tinggi atau tidak, dan difraksi sinar-x suatu kristal. Berikut ini ilustrasi dari difraksi berkas cahaya menurut hukum Bragg,

Difraksi sinar X hanya akan terjadi pada sudut tertentu sehingga suatu zat akan mempunyai pola difraksi tertentu. Dari data XRD yang diperoleh, dilakukan identifikasi puncak-puncak grafik XRD dengan cara mencocokkan puncak yang ada pada grafik tersebut dengan database ICDD. Setelah itu, dilakukan refinement pada data XRD dengan menggunakan metode analisis Rietveld yang terdapat pada program RIETAN. Melalui *refinement* tersebut, fase beserta sruktur, *space group,* dan parameter kisi yang ada pada sampel yang diketahui.



Gambar 2.5. Peristiwa difraksi sinar X (3)

Sudut difraksi dapat ditentukan dari persamaan hukum bragg yaitu :

$$n\lambda = 2\, d_{hkl} \sin \theta_{hkl} \text{ -----(1)}$$

dimana : n = adalah orde difraksi

λ = panjang gelombang sinar x

d_{hkl} = jarak antar bidang difraksi dengan indeks miller$_{hkl}$

θ = sudut difraksi bragg untuk bidang difraksi

Dari persamaan tersebut terlihat bahwa jika panjang gelombang sinar x yang digunakan diketahui dan sudut θ_{hkl} diukur, dimungkinkan untuk menentukan jarak antar bidang difraksi, $d_{hkl.}$ Untuk struktur kubik jarak d bidang difraksi berhubungan dengan parameter kisi struktur kristal dengan persamaan berikut :

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \text{ ……(2)}$$

dimana : a = parameter kisi

hk = indeks miller bidang

d_{hkl} = jarak antar bidang

Pengujian struktur kristal seperti ukuran kristal, kerapatan dislokasi, dan mikro regangan kisi paduan Al 6061 menggunakan XRD (model Smartlab-Rigaku) dengan radiasi Cu Kα(λ = 1,5406 Å). Data XRD diperoleh pada suhu ruang dengan rentang dari 25 ° sampai 100° menggunakan kecepatan scan 2 °/min dan lebar step 0,02°. Parameter kristal seperti, rata-rata ukuran kristal, regangan kisi, kerapatan dislokasi, dan parameter kisi (a dan c) ditentukan dari hasil analisis XRD. Rata-rata ukuran kristal (D) dari paduan Al 6061 diestimasi dengan menggunakan persamaan Derby Scherrer[4],

$$D = 0{,}9\,\lambda/\beta \cos\theta \quad \ldots(3)$$

dimana, λ adalah panjang gelombang sinar-x (1,5405 Å), β adalah FWHM (full width at half maximum) dari puncak (hkl) dan θ adalah sudut difraksi.

Regangan mikro kisi (ε) dihitung menggunakan persamaan berikut[4],

$$\varepsilon = \beta/4\tan\theta \quad \ldots(4)$$

Kerapatan dislokasi (ρ) karena regangan kisi dapat dinyatakan dengan hubungan[4],

$$\rho = 1/D^2 \ldots(5)$$

Setelah kerapatan dislokasi diketahui, maka kekuatan luluh (Ys) dapat dihitung dengan persamaan berikut[4]:

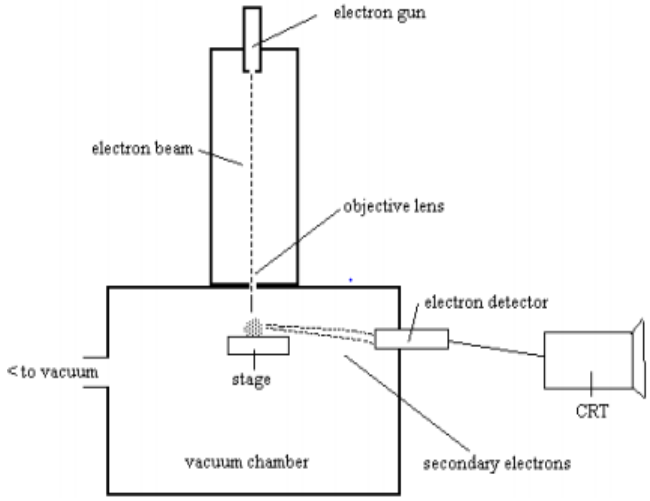
$$Ys = 274{,}54 + 4{,}963\times 10^{-6}\sqrt{\rho} \ldots(6)$$

dengan satuan Ys dalam MPa dan ρ dalam m/m^3 atau garis/m^2 .

2.6.2 SEM-EDAXS (*Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive Analysis X-ray Spectrometry)*

Karakterisasi mikrostruktur terhadap paduan suatu logam dilakukan menggunakan alat *Scanning Electron Microscope* (SEM). SEM merupakan sebuah mikroskop elektron yang berfungsi untuk melihat atau menganalisa suatu permukaan dari sampel dengan cara menembakkan elektron dengan energy tinggi pada sampel. Elektron-elektron ini akan diemisikan secara termionik (emisi elektron dengan membutuhkan kalor, sehingga dilakukan pada temperatur yang tinggi) dari sumber elektron. Elektron-elektron yang dihasilkan adalah elektron berenergi tinggi, yang biasanya memiliki energi berkisar 20 KeV-200 KeV atau sampai 1 MeV. Dalam prinsip pengukuran ini dikenal dua jenis elektron, yaitu elektron primer dan elektron sekunder. Elektron primer adalah elektron berenergi tinggi yang dipancarkan dari katoda (Pt, Ni,

W) yang dipanaskan. Elektron sekunder yang akan ditangkap oleh detektor, dan mengubah sinyal tersebut menjadi suatu sinyal *image.*



Gambar 2.6 Skematik Scanning Electron Microscope (SEM)

SEM dapat Mengamati struktur maupun bentuk permukaan yang berskala lebih halus, Dilengkapi Dengan EDS (*Electron Dispersive X ray Spectroscopy*) atau ada yang menyebut dengan EDX. *Electron Dispersive X ray Spectroscopy* adalah suatu teknik analisis yang digunakan untuk menganalisa unsur atau karakterisasi kimia dari sampel. Ini adalah salah satu varian *fluoresensi X-ray spektroskopi* yang mengandalkan penyelidikan sampel melalui interaksi antara radiasi elektromagnetik dan material menganalisa sinar-x yang diemisikan oleh material sebagai respon terhadap tumbukan dari partikel bermuatan (Octoviawan N, 2010)

Pada pengambilan data dengan alat SEM-EDX, sampel bubuk yang telah diletakkan di atas specimen holder dimasukkan kedalam specimen chamber, kemudian dimasukkan dalam alat SEM-EDX dan alat siap untuk dioperasikan. Dalam pengukuran SEM–EDX untuk setiap sampel dianalisis dengan menggunakan analisis area. Sinar electron yang di hasilkan dari area gun dialirkan hingga mengenai sampel. Aliran sinar electron ini selanjutnya di fokuskan menggunakan electron optic columb sebelum sinar electron tersebut membentuk atau mengenai sampel.

Setelah sinar electron mengenai sampel, akan terjadi beberapa interaksi – interaksi pada sampel yang disinari tersebut selanjutnya akan dideteksi dan di ubah ke dalam sebuah gambar berupa gambar struktur permukaan dari setiap sampel yang diuji dengan karakeristik gambar 3-D oleh analisis SEM. Hasil gambar dari SEM hanya ditampilkan dalam warna hitam putih. SEM

menerapkan prinsip difraksi elektron, dimana pengukurannya sama seperti mikroskop optik. Selain itu dihasilkan grafik hubungan antara energy (keV) pada sumbu horizontal dan pada sumbu vertikal dapat diketahui unsur – unsur atau mineral yang terkandung di dalam sampel tersebut, yang mana keberadaan unsur atau mineral tersebut dapat ditentukan atau diketahui berdasarkan nilai energy yang dihasilkan pada saat penembakan sinar electron primer pada sampel oleh analisis EDX (Bambang, 2011).

SEM memiliki pembesaran bervariasi mulai dari 500 kali sampai 10.000 kali pembesaran sehingga dapat menujukkan bagian-bagian yang tidak terlihat ketika diuji dengan mikroskop tinggi. Molekul gas (dalam hal ini gas nitrogen akan menangkap elektron sehingga elektron yang terhambur akan mengenai benda uji.

2.6.5 Pengujian Kekerasan

Kekerasan logam dapat diartikan sebagai sebagai ketahanan suatu bahan logam terhadap penetrasi, dan memberikan indikasi cepat mengenai perilaku deformasi (Murtiono, 2012). Harga kekerasan bahan tersebut dapat dianalisis dari besarnya beban yang diberikan terhadap luasan bidang yang menerima pembebanan. Kekerasan juga dapat didefinisikan sebagai ketahanan sebuah benda (benda kerja) terhadap penekanan atau daya tembus dari bahan lain yang lebih keras (penetrator) (Purwanto H, 2011). Penekanan terhadap suatu bahan tersebut dapat berupa mekanisme penggoresan (stratching), pantulan ataupun indentasi dari material terhadap suatu permukaan benda uji. Berdasarkan mekanisme penekanan tersebut, maka dibagi menjadi tiga metode kekerasan yaitu :

1. Metode Gores

Metode ini dikenalkan oleh Fredrich Mohss yang membagi kekerasan material di dunia ini berdasarkan skala Mohs. Skala ini bervariasi dari nilai 1 untuk kekerasan yang paling rendah, sebagaimana dimiliki oleh material talk, hingga skala 10 sebagai kekerasan tertinggi, sebagaimana dimiliki oleh intan.

2. Metode elastic/pantul (rebound)

Kekerasan suatu material ditentukan oleh alat Scleroscope yang mengukur tinggi pantulan suatu pemukul (hammer) dengan berat tertentu yang dijatuhkan dari suatu ketinggian terhadap benda uji. Tinggi pantulan (rebound) yang dihasilkan mewakili kekerasan benda uji.

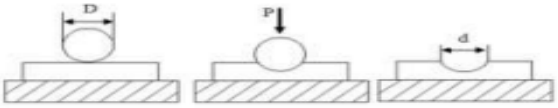
Semakin tinggi pantulan tersebut, yang ditunjukkan oleh dial pada alat pengukur, maka kekerasan benda uji dinilai semakin tinggi.

3. Metode Identasi

Tipe pengetasan kekerasan material atau logam ini adalah dengan mengukur tahanan plastis dari permukaan suatu material konstruksi mesin dengan specimen standar terhadap penetrator.

a. Pengujian Kekerasan Brinnel (*ball identation test)*

Pengujian kekerasan *Brinell* menggunakan penumbuk (*indentor/ penetrator*) yang terbuat dari bola baja. Metode ini dilakukan dengan cara bahan diindentasi dengan indentor pada permukaan benda uji dengan beban tertentu kemudian diukur bekas penekanan yang terbentuk. Untuk bahan benda yang memiliki struktur yang heterogen lebih bagus menggunakan pengujian kekerasan *Brinell*. Ini dikarenakan penetrasi penekanan pada pengujian kekerasan *brinell* merata dengan bentuk indenter bulat. Berikut skema pengujian kekerasan *brinell :*



Gambar 2.7 Skema pengujian B*rinell*

Pada Gambar 2. terlihat bahwa benda kerja ditekan menggunakan bola identor yang berdiameter (D), dan kemudian dilakukan pembebanan setelah selesai pembebanan kemudian bekas dari tekanan identor diukur diameter lubangnya (d).

Angka kekerasan *brinell* (BHN) dinyatakan sebagai beban P dibagi luas permukaan lekukan. Pada prakteknya, luas ini dihitung dari pengukuran mikroskopik panjang diameter jejak. BHN dapat ditentukan dari persamaan berikut ini :

$$BHN = \frac{2P}{\pi D[(D - \sqrt{(D^2 - d^2)})]}$$

Keterangan:

BHN = Angka Kekerasan Brinell(BHN)

P = Beban yang digunakan (kg atau Kgf)

D = Diameter bola baja yang digunakan (mm)

D = Diameter bekas penekanan (mm)

b. Pengujian *Vickers (Pyramida identation)*

Pengujian kekerasan dengan metode *Vickers* bertujuan menentukan kekerasan suatu material dalam bentuk daya tahan material terhadap intan berbentuk piramida dengan sudut puncak 136^o yang ditekankan pada permukaan material uji tersebut. Angka kekerasan *Vickers (Vickers hardness number*, VHN) didefinisikan sebagai beban dibagi dengan luas permukaan lekukan. VHN ditentukan oleh persamaan berikut,

$$\mathbf{HV = 1{,}854\ P/d_1 x d_2}$$

Dimana : HV= Nilai kekerasan skala Vickers

P= Beban yang digunakan (kg)

d_1,d_2= Panjang diagonal rata-rata (mm)

BAB III
METODOLOGI

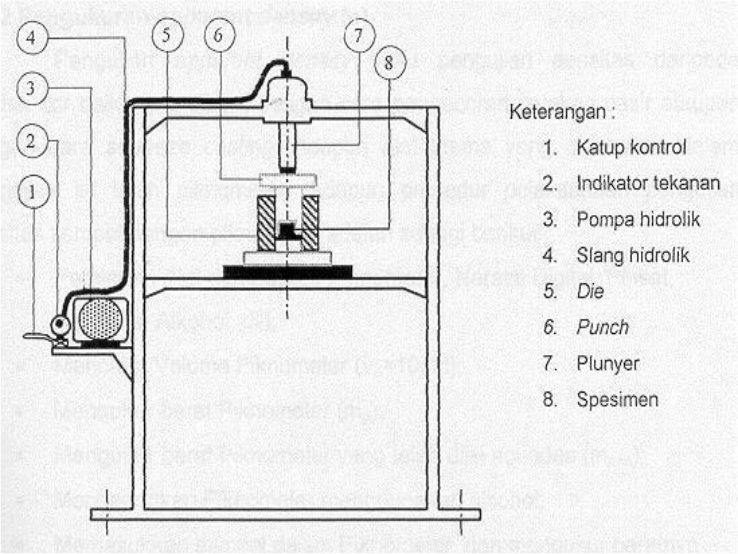
3.1. Bahan dan Alat

3.1.1. Bahan

Bahan powder alumunium (Al) kemurnian 99,99%, silicon (Si) kemurnian 99,9%, magnesium (Mg) 98%, dan MgSi teknik, serta bahan-bahan untuk metalografi lengkap.

3.1.2. Alat

1. Alat pembuatan sampel lengkap (alat press dan diesnya, alat ball mill/pencampur)
2. Alat *Furnace* (*Thermoline*)
3. Alat SEM-EDXS
4. Alat uji kekerasan metodeVickers.
5. Alat uji komposisi Optical Emisi Spektrometer (OES)
6. Alat ukur diameter
7. Alat difraktometer sinar-x (XRD)
8. Alat Timbangan analitik
9. Alat metalografi dan bahannya lengkap.



Gambar 3.1. Alat mesin press untuk pembuatan sampel, tekanan 20 ton.

Gambar 3.2. Timbangan analitik

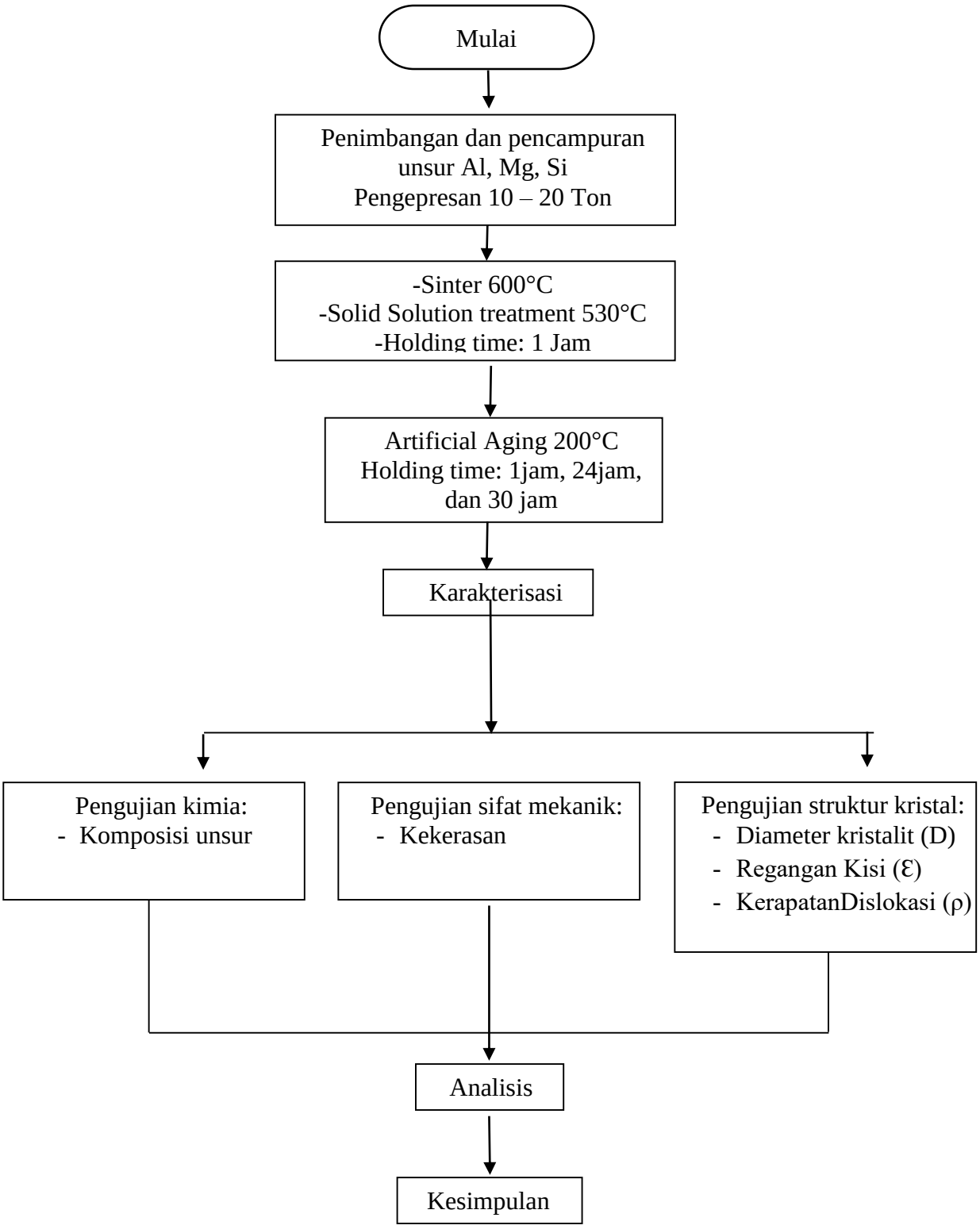
Gambar 3.3. Furnace merk B-ONE

Gambar 3.4 Alat uji kekerasan skala Vickers

Gambar 3.5 Alat Uji Komposisi Optical Emisi Spektrometer

Gambar 3.6 Alat Difraktometer Sinar-X, merk PAN-analys

Gambar 3.7 Alat Scanning Elektron Mikroskop (SEM-EDXS), merk Zess



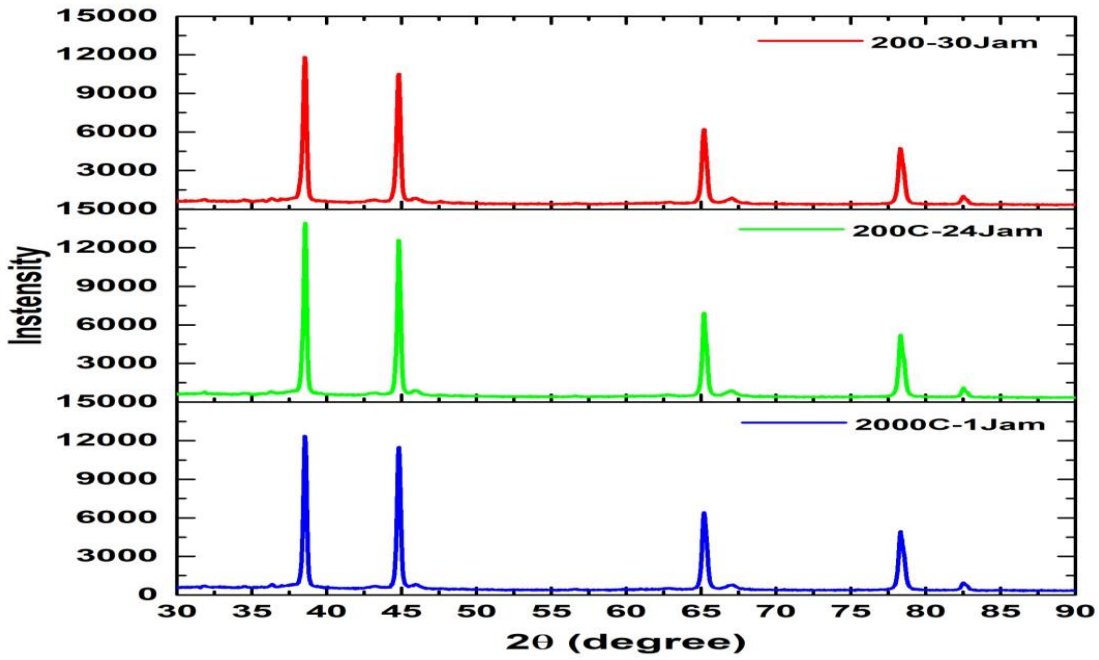
Gambar 3.8 Diagram alir penelitian

2, Cara kerja

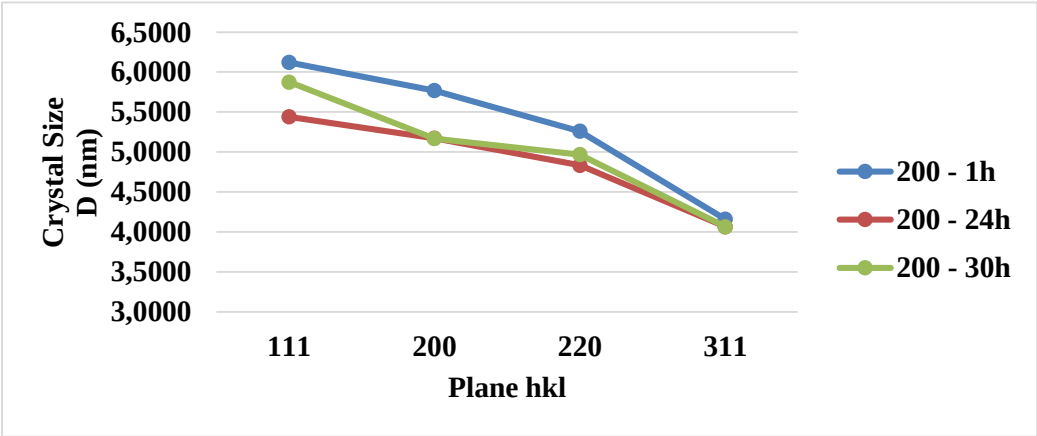
Pembuatan spesimen diawali dengan penimbangan dengan timbangan analitik serbuk alumuniun, serbuk silikon, dan serbuk magnesium sesuai ratio perbandingan berat. Pencampuran ketiga serbuk dengan ball mill dengan kecepatan sekitar 3000 rpm. Memasukan campuran ketiga serbuk(Al, Si, Mg) tersebut pada dies silinder ukuran 10 mm dengan penimbangan berat ingot yang sama sekitar 10 gram per sampel. Pengompakan campuran ketiga serbuk tersebut dengan mesin pres 10 ton. Pemanasan sintering pada temperatur 600 ^{0} C selama lebih kurang 1 jam, kemudian didinginkan perlahan-lahan hingga temperatur kamar.(**Percobaan pertama**) Selanjutnya dilakukan proses T6 kami lakukan dua kali percobaan. Percobaan pertama dimulai dengan pada *solid solution heat treatmment* pada temperatur 530°C ditahan selama 1 jam. kemudian *Quenching* (celup cepat) pada temperatur ruang media udara. Serta proses *artificial aging* (penuaan buatan) divariasi waktu penahanan yaitu 1jam, 24 jam, dan 30 jam, pada temperatur tetap 200°C. Percobaan kedua, pengompakan campuran ketiga serbuk tersebut dengan mesin pres 20 ton. Pemanasan sintering pada temperatur 475 ^{0} C selama lebih kurang 1 jam, kemudian didinginkan perlahan-lahan hingga temperatur kamar. Selanjutnya dilakukan proses T6 dimulai dengan pada *solid solution heat treatmment* pada temperatur 530°C ditahan selama 1 jam. kemudian *Quenching* (celup cepat) pada temperatur ruang media udara. Serta proses *artificial aging* (penuaan buatan) divariasi temperaturnya yaitu 140°C, 170°C, dan 200°C, serta waktu penahanan tetap 1jam. Selanjutnya, semua spesimen paduan alumunium/sampel uji (48 buah) ini kemudian dilakukan proses metalografi (grinding, poles, dstnya), pengujian sifat mekanis (uji kekerasan dengan alat *hardness tester* metode *Brinell*/*Vickers*) dan pengamatan struktur mikro dan komposisi unsur kimia secara kualitatif dan kuantitatif dengan alat SEM-EDXS dan alat Optical Emmision Spektrometer (OES). Pengujian strukturkristal dan diameter kristalit, dan regangan kisi Kristal mikro dengan alat Difraktometer Sinar-X (XRD).

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

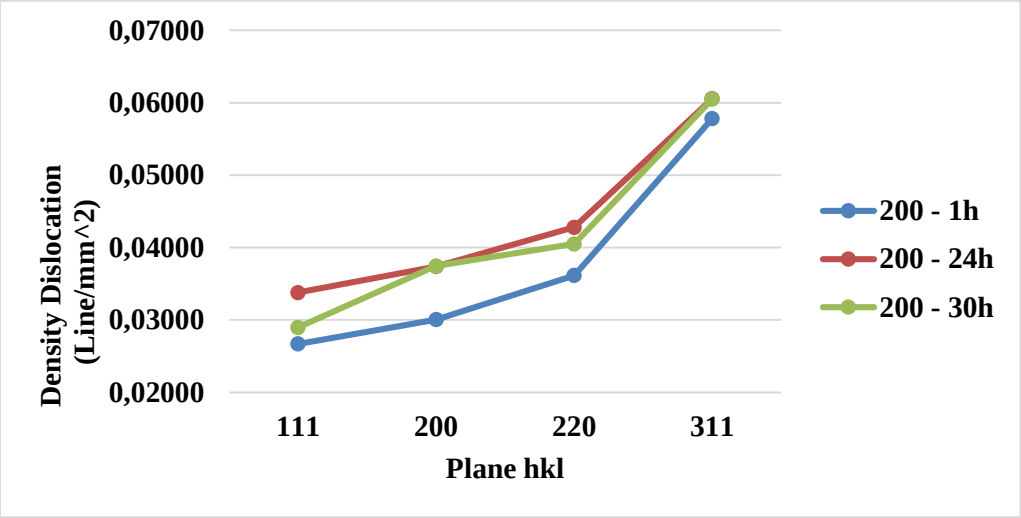
4.1.1a.Analisa ukuran kristal, kerapatan dislokasi, mikro regangan kisi dengan XRD



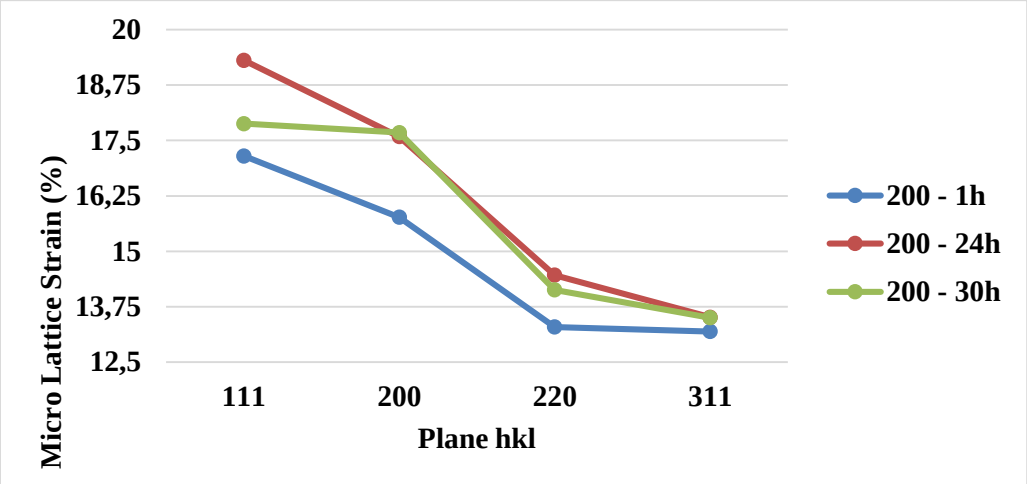
Gambar 4.1.1a. Difraktogram dari paduan Al 6061, penuaan buatan temperatur 200 ^{0}C Dengan waktu tahan 1 jam, 24 jam, dan 30 jam.



Gambar 4.1.2a Grafik hubungan antara bidang Indek Miller dengan ukuran Kristal pada Variasi waktu tahan penuaan buatan paduan Al 6061.



Gambar 4.1.3a. Grapik hubungan antara bidang Indek Miller dengan kerapatan dislokasi Pada Variasi waktu tahan penuaan buatan paduan Al 6061.



Gambar 4.1.4a. Grapik hubungan antara bidang Indek Miller dengan regangan kisi mikro Pada Variasi waktu tahan penuaan buatan paduan Al 6061.

Dari gambar 4.1.1a – 4.1.4a, terlihat difraktogram sinar-X dan grafiknya dari hasil uji XRD menunjukkan bahwa paduan Al 6061 terdapat 4 fasa α-Al pada bidang indeks Miller yaitu (111), (200), (220), dan (311) terhadap ukuran kristal terlihat makin lama waktu penahanan makin kecil ukuran kristalnya (6,3nm menjadi 5,8nm) pada bidang indeks Miller (111), demikian pula pada bidang indeks Miller (311) makin kecil pula diameter kristalnya (4,3nm menjadi 4,0 nm) lihat pada gambar 4.1.4a.

Diameter kristalit pada bidang indeks Miller (111) yaitu 6,3nm berkurang seiring dengan waktu penahanan penuaan buatan 30 jam adalah 4 nm pada bidang indeks Miller (311). Data ini menunjukkan bahwa naiknya ukuran kristalit kemungkinan disebabkan oleh terjadinya proses rekristalisasi dan pertumbuhan butir selama penuaan. Hal ini dapat dijelaskan karena regangan mikro kisi, bahwa deformasi plastis paduan Al 6061 mayoritas terjadi melalui proses dislokasi *slip* dan *twin.* Dengan demikian penuaan buatan yang dikenakan pada bahan paduan Al 6061 tidak berubah menjadi regangan butir tetapi menjadi rotasi pada kisi kristal. Pergeseran kisi kristal ini menghasilkan kristalit. Karena perlakuan panas (artificial age) yang kedua menyebabkan terjadinya difusi atom-atom pada batas butir, dimana hal ini ditandai dengan peningkatan ukuran kristal. Pada gambar 4.1.3a, memperlihatkan nilai kerapatan dislokasi terlihat makin lama waktu penahanan makin besar kerapatan dislokasinya (0,028 garis/mm^2 pada bidang indeks Miller (111) menjadi 0,058 garis/mm^2 pada bidang indeks Miller (311).

Pada gambar 4.1.4a, terdapat 4 puncak difraksi dari hasil XRD menunjukkan bahwa paduan Al 6061 yang terdiri dari bidang indeks Miller yaitu (111), (200), (220), dan (311) terhadap regangan mikro kisi terlihat makin lama waktu penahanan makin besar regangan mikro kisi (17,2%) pada bidang indeks Miller (111), demikian pula pada bidang indeks Miller (311) makin lama waktu penahanan regangan mikro kisi makin kecil yaitu 13%.

Gambar 4.2a - 4.4a, menunjukkan bahwa peningkatan waktu tahan pada perlakuan panas penuaan mengakibatkan penyempitan puncak difraksi, dimana ditandai dengan penurunan nilai FWHM. Hasil tersebut mengungkapkan bahwa terjadi pertumbuhan butir dari paduan Al 6061. Selain itu, pola difraktogram juga menunjukkan bahwa intensitas dari puncak difraksi meningkat dengan meningkatnya waktu penahanan penuaan buatan saat perlakuan panas. Hal itu mengindikasikan bahwa terjadi peningkatan kualitas kristal dari paduan Al 6061. Kualitas kristal dari paduan Al 6061 dipengaruhi oleh regangan mikro kisi dan kerapatan dislokasi. Nilai regangan dan kerapatan dislokasi yang rendah mengindikasikan kualitas kristal yang baik. Hasil tersebut berkaitan erat dengan berkurangnya cacat kristal bentuk garis pada paduan Al 6061.

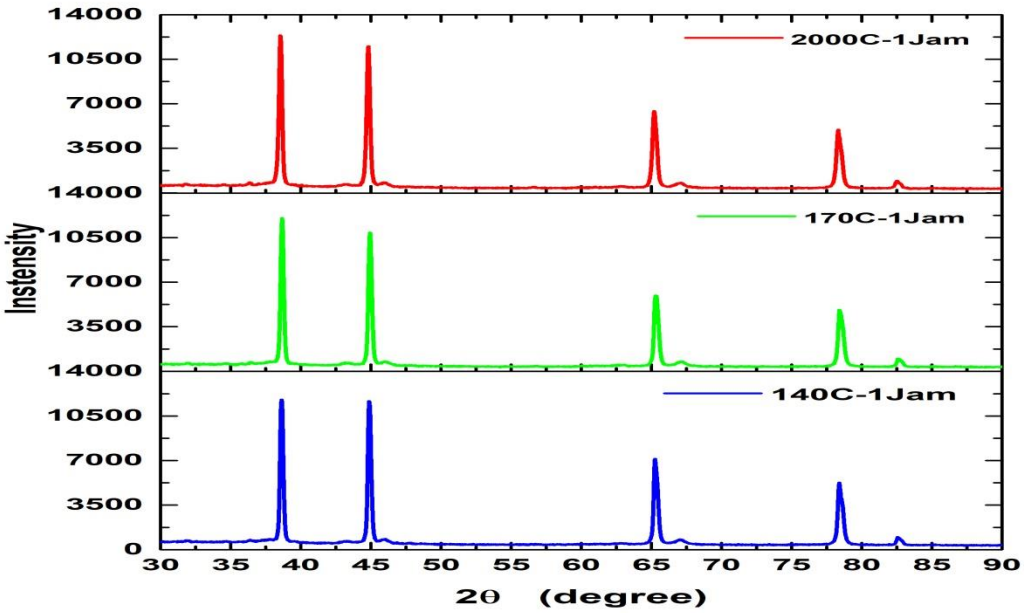
Karena peningkatan cacat kristal bentuk garis ditunjukkan dengan meningkatnya nilai regangan mikro kisi yang berakibat pada peningkatan kerapatan dislokasi. Karena regangan mikro kisi mempengaruhi panjang garis dislokasi per satuan volume kristal.[9]

Selain itu regangan mikro kisi sampel paduan Al 6061 hasil celup cepat dan penuaan buatan waktu 24 jam pada bidang indeks Miller (311) adalah 13 % lebih kecil jika dibandingkan dengan

bidang indeks Miller (111) penuaan buatan waktu 24 jam yaitu 19%. Data ini menunjukkan bahwa rendahnya regangan mikro kisi kemungkinan terjadinya proses rekristalisasi dan pertumbuhan butir selama penuaan buatan. Berdasarkan data bahwa kerapatan dislokasi hasil dari penuaan buatan didang indeks Miller (311) lebih besar dibandingkan dengan bidang indeks Miller (111), berarti ada batas regangan maksimum akibat deformasi. Regangan maksimum disebabkan oleh mekanisme deformasi dan harus memenuhi konstansi rasio c/a, sehingga kerapatan dislokasi menjadi bertambah. Penambahan kerapatan dislokasi mengakibatkan naiknya tegangan sisa yang selanjutnya pada kekuatan luluh.[9]

4.1.1b. Analisa kerapatan dislokasi, regangan mikro kisi, ukuran kristal matetial paduan alumunium

variasi temperatur penuaan buatan.



Gambar 4.1.1b. Difraktogram sinar-X dari paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$
Waktu penuaan buatan 1jam, variasi temperatur 140,170,dan 200 ^{0}C

Tabel 4.1b. Puncak difraksi sinar-X dari paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ penuaan buatan waktu 1 jam, variasi temperatur 140 ^{0}C

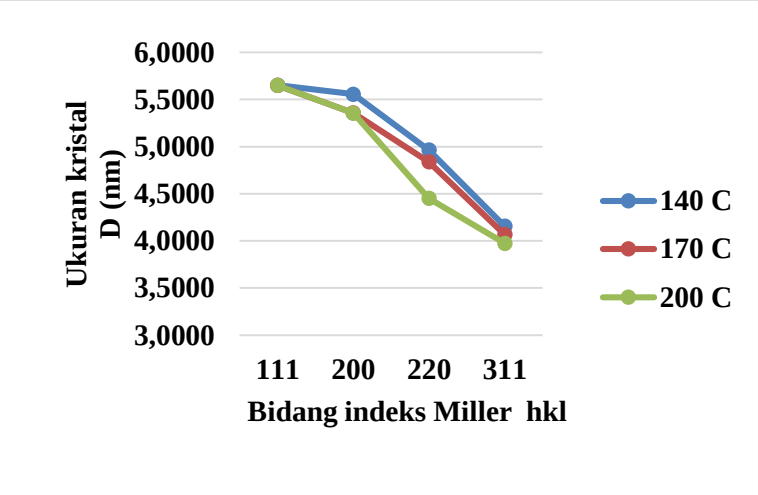
PEAK NO	2 θ (deg)	d (Å)	I/I_o	FWHM (deg)	JCPDS	(h k l)
1	38,67	1,9579	100	0,150	Fasa α -Al	111
2	45,91	1,6244	78	0,180	Fasa α -Al	200
3	65,24	1,9727	56	0,250	Fasa α -Al	220
4	78,55	1,2938	34	0,160	Fasa α -Al	311

Tabel 4.2b. Puncak difraksi sinar-X dari paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ penuaan buatan waktu 1 jam, variasi temperatur 170 ^{0}C

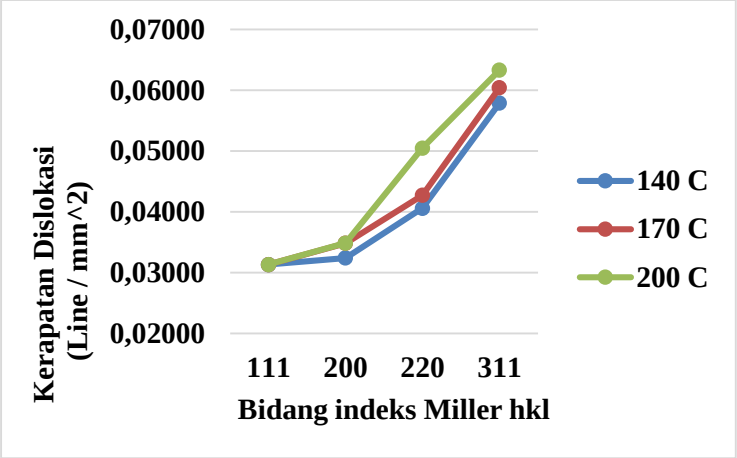
PEAK NO	2 θ (deg)	d (Å)	I/I_o	FWHM (deg)	JCPDS	(h k l)
1	38,49	1,9173	100	0,140	Fasa α -Al	111
2	45,93	1,7727	60	0,150	Fasa α -Al	200
3	66,19	1,9898	54	0,270	Fasa α -Al	220
4	78,64	1,3927	39	0,180	Fasa α -Al	311

Tabel 4.3b. Puncak difraksi sinar-X dari paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ penuaan buatan waktu 1 jam, variasi temperatur 200 ^{0}C

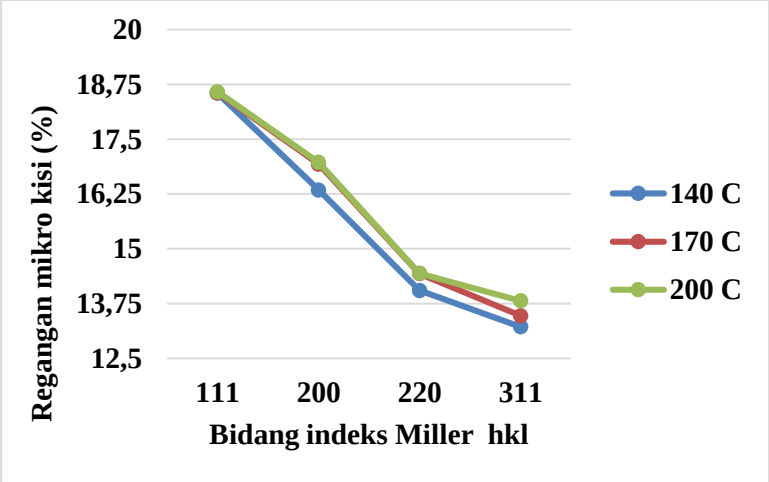
PEAK NO	2 θ (deg)	d (Å)	I/I_o	FWHM (deg)	JCPDS	(h k l)
1	38,87	1,9259	100	0,160	Fasa α -Al	111
2	45,74	1,6332	79	0,180	Fasa α -Al	200
3	65,29	1,9666	59	0,250	Fasa α -Al	220
4	78,65	1,2943	38	0,170	Fasa α -Al	311



Gambar 4.1.2b. Grafik hubungan diameter kristalit terhadap bidang indeks Miller (111), (200), (220), (311). Variasi temperatur penuuan buatan 140, 170, dan 200 ^{0}C waktu 1 jam.



Gambar 4.1.3b. Grafik hubungan kerapatan dislokasi terhadap bidang indeks Miller (111), (200), (220),(311).Temperatur penuaan buatan 140, 170, dan 200 ^{0}C waktu 1 jam.



Gambar 4.1.4b. Grafik hubungan regangan mikro kisi terhadap bidang indeks Miller (111), (200),(220), (311).Temperatur penuaan buatan 140, 170, dan 200 ^{0}C waktu 1 jam.

Pada gambar 4.1.1b, menunjukkan difraktogram sinar-X dari paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ terdapat empat puncak difraksi yang datanya dapat dilihat pada Tabel 4.1b sampai Tabel 4.3b. Dari gambar 4.1.2b, memperlihatkan bidang indeks Miller yaitu (111), (200), (220), dan (311) terhadap ukuran kristal terlihat makin besar temperature penuaan buatan dan waktu penahanan tetap (1jam), menunjukkan bahwa ukuran kristalnya makin kecil(dari 6,3nm menjadi 5,8nm) mulai bidang indeks Miller (111) hingga bidang indeks Miller (311) dari 4,3nm menjadi 4,0 nm. Data ini menunjukkan bahwa naiknya ukuran kristalit kemungkinan disebabkan oleh terjadinya proses rekristalisasi dan pertumbuhan butir selama penuaan. Hal ini dapat dijelaskan karena

adanya regangan mikro kisi, bahwa deformasi plastis paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ mayoritas terjadi melalui proses dislokasi *slip* dan *twin.* Dengan demikian penuaan buatan yang dikenakan pada bahan paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ tidak berubah menjadi regangan butir tetapi menjadi rotasi pada kisi kristal. Dimana pergeseran kisi kristal ini menghasilkan kristalit. Karena perlakuan panas (*artificial age*) yang kedua menyebabkan terjadinya difusi atom-atom pada batas butir, dimana hal ini ditandai dengan peningkatan ukuran Kristal dibidang indeks Miller (111). Pada gambar 4.1.3b, memperlihatkan kerapatan dislokasi terlihat makin besar temperatur penuaan buatannya, makin besar kerapatan dislokasinya (0,028 garis/mm^2 pada bidang indeks Miller (111) menjadi 0,058 garis/mm^2 pada bidang indeks Miller (311). Hal ini berarti makin besar temperature penuaan buatannya makin banyak cacat garisnya pada bidang indeks Miller (311). Pada gambar 4.1.4b, terdapat 4 puncak difraksi dari hasil XRD menunjukkan bahwa paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ yang terdiri dari bidang indeks Miller yaitu (111), (200), (220), dan (311) terhadap regangan mikro kisi terlihat makin besar temperatur penuaan buatannya, nilai regangan mikro kisi sama besarnya di bidang indeks Miller (111) yaitu 18,5%. Demikian pula pada bidang indeks Miller (311) terlihat makin besar temperatur penuaan buatannya, regangan mikro kisi makin kecil yaitu 13 – 13,75 %. Dari gambar 4.1.1b – 4.1.4b, menunjukkan bahwa peningkatan temperatur pada perlakuan panas penuaan mengakibatkan penyempitan puncak difraksi, dimana ditandai dengan penurunan nilai FWHM. Hasil tersebut mengungkapkan bahwa terjadi pertumbuhan butir dari paduan terlihat makin besar temperatur penuaan buatannya, makin besar kerapatan/kerapatan dislokasinya. Data ini menunjukkan bahwa rendahnya regangan mikro kisi kemungkinan terjadinya proses rekristalisasi dan pertumbuhan butir selama penuaan buatan. Berdasarkan data bahwa kerapatan dislokasi hasil dari penuaan buatan didang indeks Miller (311) lebih besar dibandingkan dengan bidang indeks Miller (111), berarti ada batas regangan maksimum akibat deformasi. Regangan maksimum disebabkan oleh mekanisme deformasi dan harus memenuhi konstansi rasio c/a, sehingga kerapatan dislokasi menjadi bertambah. Penambahan kerapatan dislokasi mengakibatkan naiknya tegangan sisa yang selanjutnya pada kekuatan luluh.[10,11]

Selain itu, pola difraktogram juga menunjukkan bahwa intensitas dari puncak difraksi meningkat dengan meningkatnya temperatur penuaan buatan saat perlakuan panas. Hal itu mengindikasikan bahwa terjadi peningkatan kualitas kristal dari paduan terlihat makin besar temperatur penuaan buatannya, makin kecil kerapatan/kerapatan dislokasinya yang dipengaruhi regangan mikro kisi.

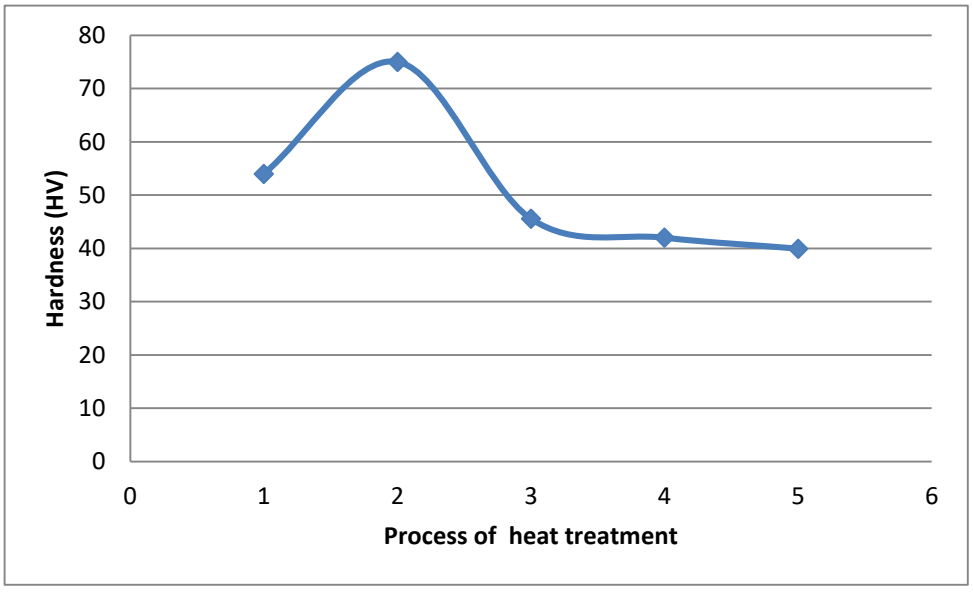
Nilai regangan mikro kisi dan kerapatan/ kerapatan dislokasi yang rendah mengindikasikan kualitas kristal yang baik. Hasil tersebut berkaitan erat dengan berkurangnya cacat kristal bentuk garis(dislokasi). Karena peningkatan cacat kristal bentuk garis ditunjukkan dengan meningkatnya nilai regangan mikro kisi yang berakibat pada peningkatan kerapatan dislokasi. Karena regangan mikro kisi mempengaruhi panjang garis dislokasi per satuan volume kristal.[10,11]

4.2a.Analisa Kekerasan skala Mikro Vickers

Dari hasil pengujian kekerasan rata-rata sampel uji Al 6061 yang mengalami perlakuan panas T6 yaitu pemanasan *solid solution treatment* pada temperatur 530 ^{0}C dan penuaan buatan (*artificial aged*) pada temperature 200°C dengan variasi waktu selama 1 jam, 24 jam dan 30 jam.

Tabel 4.2.1a. Hasil pengujian Kekerasan skala mikro Vickers dari paduan Al 6061

No.	Nilai Kekerasan (HV)		
1	As cast		54
2	Quenching		75
3	Penuaan	Waktu 1 jam	45,5
4		Waktu 24 jam	42
5		Waktu 30 jam	39,95



Gambar 4.2.2a. Grafik hubungan kekerasan terhadap proses T6 dan penuaan paduan Al 6061.

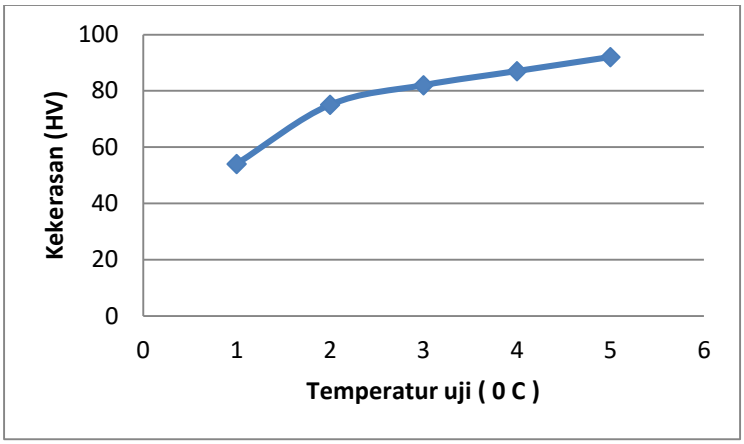
Dari gambar 4.2.2a dan tabel 4.2.1a, terlihat bahwa sampel paduan alumunium (Al 6061) as cast(asli) nilai kekerasan sebesar 54 HV dan setelah *quenching* 75 HV. Proses penuaan buatan dengan suhu 200°C dan variasi waktu penahanan 1 jam, 24 jam, dan 30 jam terjadi penurunan nilai kekerasan dibandingkan bahan tanpa perlakuan panas sebesar 15,74% atau semula 54 HV menjadi 45,5 HV. Nilai kekerasan tertinggi setelah *quenching* yaitu 75 HV.Hal ini disebabkan oleh hadirnya fasa kedua yaitu Mg_2Si sebagai presipitat. Hadirnya presipitat ini berperan dalam meningkatkan kekerasan paduan Al 6061, dengan cara menghalangi pergerakan dislokasi dan terjadi penumpukan dislokasi yang menyebabkan terjadinya distorsi kisi pada paduan Al 6061 saat dikenakan deformasi.[13] Setelah penuaan buatan nilai kekerasan menurun seiring lama waktu penahanan yaitu dari 1 jam (45,5 HV) menjadi 30 jam (39,95 HV). Hal ini konsisten untuk semua variasi waktu penuaan buatan pada paduan Al 6061. Fenomena menurunnya nilai kekerasan saat proses penuaan buatan dinamakan over aging.[11] Hal ini sesuai peneliti terdahulu Demir H. dan Gunduz S., mengatakan bahwa penambahan waktu penuaan dapat menurunkan nilai kekerasan. Hal ini disebabkan karena bergabungnya presipitat menjadi partikel berukuran yang lebih besar yang mengakibatkan penghalang pergerakan dislokasi menjadi semakin lemah, sehingga sifat mekanik menurun. Selain itu disebabkan oleh presipitat tidak menyebar merata dan ukuran presipitat yang besar pada paduan Al 6061.[10]

4.2b.Analisa kekerasan terhadap variasi temperatur *artificial age* paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$

Hasil pengujian kekerasan material paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ dengan skala Vicker terlihat adanya kenaikan nilai kekerasan sebelum dan sesudah perlakuan panas T6 (lihat gambar 4.2.1b, dan Tabel 4.2.1b).

Tabel 4.2.1b. Hasil uji kekerasan paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$

Nama	Kekerasan (HV)
Asli	54
Solid solution 530 ^{0}C dan *Quenching* dimedia air es	75
Temperatur 140 ^{0}C	82
Temperatur 170 ^{0}C	87
Temperatur 200 ^{0}C	94

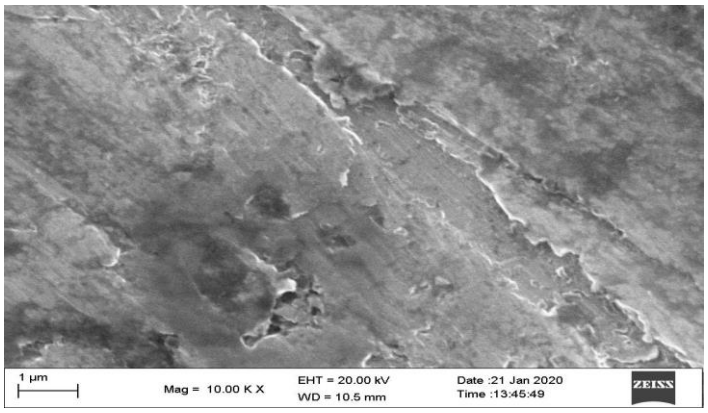


Gambar 4.2.1b. Grafik hubungan nilai kekerasan terhadap kondisi uji pada paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ 1).as cast, 2). *Solid solution*, 3). *Artificially age* 140 ^{0}C, 4). *Artificially age* 170 ^{0}C, 5). *Artificially age* 200 ^{0}C

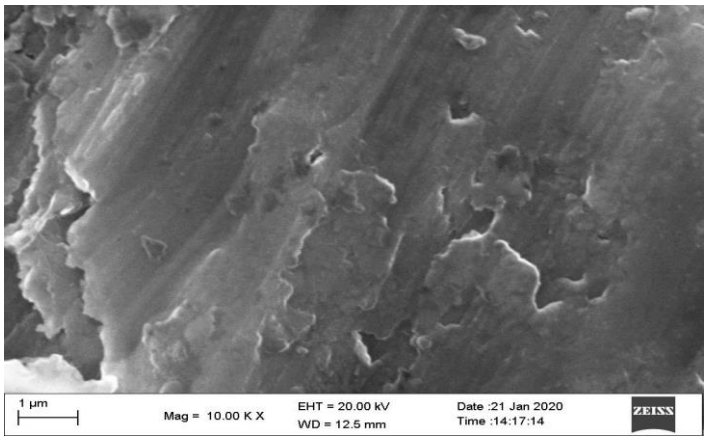
Sampel paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ sebelum perlakuan panas T6 nilai kekerasannya (as cast) 54 HV(Tabel 4.2.1b.). Setelah diberi perlakuan panas *solid solution* pada 530 ^{0}C, selama 1 jam kemudian di *quenching* media air es nilai kekerasan adalah 75 HV. Setelah proses *artificially age* pada 140, 170, dan 200 ^{0}C waktu tahan 1 jam terjadi kenaikan nilai kekerasan yang signifikan yaitu 82–94 HV. Hal ini disebabkan pada paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ telah terbentuk fasa Mg_2Si yang menyebar merata baik di batas butir maupun di matriknya fasa α-Al. Meningkatnya kekerasan tersebut disebabkan karena fasa Mg_2Si memasuki tempat diantara atom-atom Aluminium *(lattice kristal)* sehingga susunan atom akan menjadi lebih rapat dan menimbulkan ikatan yang semakin kuat. Gaya yang diperlukan untuk menimbulkan dislokasi semakin besar, yang berarti kekerasan semakin besar. Namun paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ mempunyai kekerasan harga maksimum, apabila telah melebihi batas kelarutannya, tetapi fasa Mg_2Si yang terbentuk akan memperlemah ikatan antar atom. Sehingga gaya yang diperlukan untuk mendeformasi/merusak akan semakin kecil, yang berarti menurunkan kekerasan.[9]

4.3a.Analisa Struktur mikro dengan SEM-EDXS

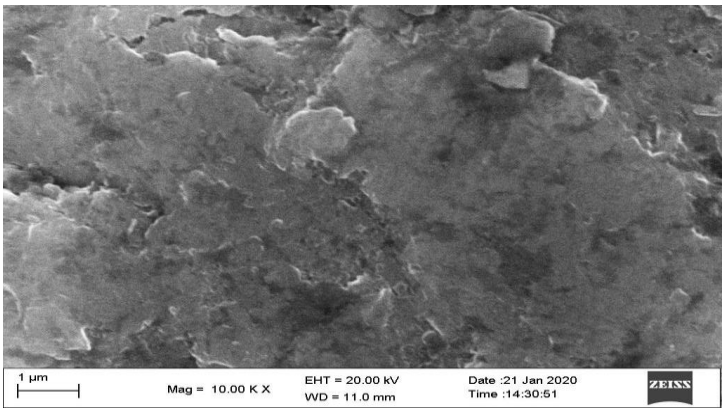
Hasil pengamatan struktur mikro dengan Scanning Elektron Mikroskop (SEM) dari material paduan Al 6061 dapat dilihat pada Gambar 4.3.1a dan Gambar 4.3.1b, di bawah ini.



Gambar 4.3.1a. Mikrogram paduan Al 6061 penuaan buatan temperatur 200 ^{0}C, waktu 1jam, pembesaran 10.000X



Gambar 4.3.2a Mikrogram paduan Al 6061 penuaan buatan temperatur 200 ^{0}C, waktu 24 jam, pembesaran 10.000X

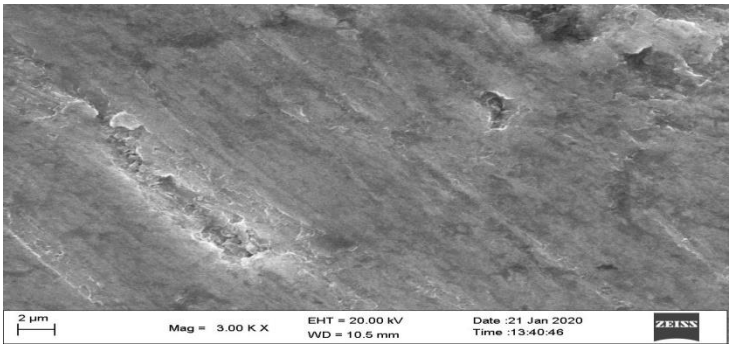


Gambar 4.3.3a Mikrogram paduan Al 6061 penuaan buatan temperatur 200 ^{0}C, waktu 30 jam, pembesaran 10.000X

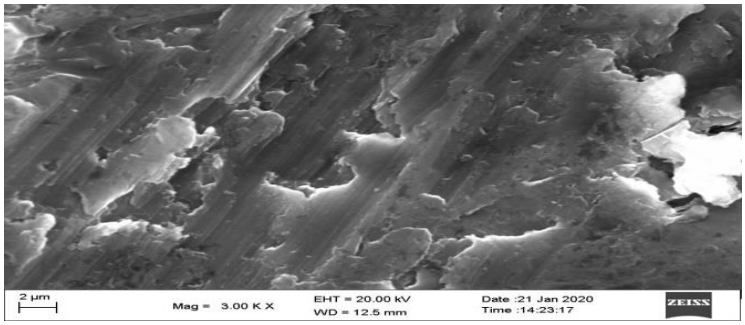
Dari gambar 4.3.1a, 4.3.2a dan 4.3.3a, menunjukkan bahwa mikrogram dari paduan Al 6061 setelah penuaan bantuan dengan variasi waktu dari 1 jam, 24jam, dan 30jam. Terlihat semuanya

berbentuk *equaxial* pada kondisi waktu 1 sampai 30 jam. Butir hasil penuaan buatan menunjukkan *elongated grain*. Berubahnya bentuk butir setelah penuaan buatan ini akibat deformasi sehingga mengubah bentuk butiran bahan paduan Al 6061. Hal ini juga akan berdampak pada sifat mekanik yaitu kekerasan yang dihasilkan.

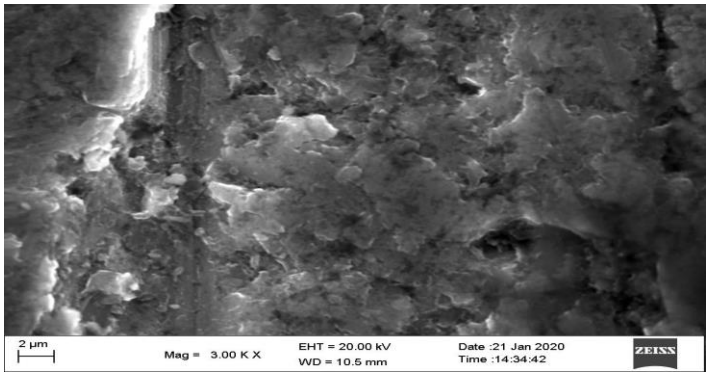
4.3b.Analisa hasil pengamatan struktur mikro dari material paduan alumunium



Gambar 4.3.1b Mikrograf dari paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$, Penuaan buatan temperatur 140 ^{0}C, pembesaran 3000X



Gambar 4.3.2b Mikrograf dari paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$, Penuaan buatan temperatur 170 ^{0}C, pembesaran 3000X



Gambar 4.3.3b Mikrograf dari paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$, Penuaan buatan temperatur 200 ^{0}C, pembesaran 3000X

Dari gambar 4.3.1b - 4.3.3b, menunjukkan bahwa mikrograf dari paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$, setelah penuaan bantuan dengan variasi temperature 140 ^{0}C, 170 ^{0}C, dan 200 ^{0}C, waktu 1 jam. Terlihat semuanya berbentuk *equaxial* pada kondisi temperature 140 ^{0}C, 170 ^{0}C, dan 200 ^{0}C serta waktu 1 jam. Butir hasil penuaan buatan menunjukkan *elongated grain*. Berubah bentuk butir setelah penuaan buatan ini akibat deformasi sehingga 200 ^{0}C mengubah bentuk butiran bahan paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$. Hal ini juga akan berdampak pada sifat mekanik yaitu kekerasan yang dihasilkan.

BAB V
KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan dan analisa, maka disimpulkan, sebagai berikut :

1.Paduan alumunium (Al 6061) yang dibuat dengan metalurgi butiran, kondisi pengompakan 10 ton, temperature sinter 600 ^{0}C. Setelah proses T6 mulai *solid solution treatment* (530^{0}C), *quenching* media air, dan variasi *holding time artificially aging* 1jam, 24 jam, dan 30 jam, serta temperatur tetap 200 ^{0}C.

2.Paduan Al 6061 menunjukkan bahwa proses T6 dapat mengakibatkan terjadinya rekristalisasi dan pertumbuhan butir, yang terbukti dengan naiknya regangan mikro kisi dan diameter kristalit dari fasa α-Al pada bidang indeks Miller (111), (200), (220), dan (311) waktu 24 jam, serta turunnya kerapatan dislokasi pada sampel paduan Al 6061.

3.Paduan Al 6061 dimana nilai kekerasan menurun seiring dengan penambahan waktu penuaan. Hal ini disebabkan karena bergabungnya presipitat sebagai fase dua Mg_2Si menjadi partikel berukuran yang lebih besar yang mengakibatkan penghalang pergerakan dislokasi menjadi semakin lemah, sehingga nilai kekerasan (sifat mekanik) menurun. Berubahnya bentuk butir setelah penuaan buatan ini akibat deformasi sehingga mengubah bentuk butiran bahan paduan Al 6061. Hal ini juga akan berdampak pada sifat mekanik yaitu kekerasan yang dihasilkan.

4.Paduan alumunium ($Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$) yang dibuat dengan metalurgi butiran, kondisi pengompakan 20 ton, temperatur sinter 475 ^{0}C. Setelah proses T6 mulai *solid solution treatment* (530^{0}C), *quenching* dan penuaan buatan dengan variasi temperatur 140^{0}C, 170^{0}C, dan 200^{0}C, serta waktu penahanan tetap 1 jam pada paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$. Secara menyeluruh pada sampel yang diuji dengan XRD, memperlihatkan rekristalisasi dan pertumbuhan butir yang terbukti dengan naiknya regangan mikro kisi dan diameter kristalit dari fasa α-Al pada bidang indeks Miller (111), (200), (220), dan (311), proses variasi waktu penuaan buatan dan waktu penahan tetap 1 jam, serta turunnya kerapatan dislokasi.

5. Hasil uji kekerasan paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ meningkat seiring dengan bertambahnya temperatur penuaan buatan. Hal ini disebabkan karena bergabungnya presipitat sebagai fase dua Mg_2Si menjadi partikel berukuran yang lebih kecil yang mengakibatkan penghalang pergerakan dislokasi menjadi semakin kuat, sehingga sifat mekanik meningkat. Berubahnya bentuk butir

setelah penuaan buatan ini akibat deformasi sehingga mengubah bentuk butiran bahan paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih disampaikan kepada Rektor Universitas Kristen Indonesia yang telah mendanai penelitian dan *Internasional Conferensi Chemical Sceince and Technology (* ICCST)-2020 ini.

DAFTAR PUSTAKA

[1].Edi Sofyan, Paripurno, Dode Andhika*," Karakterisasi aerodinamik sayap/sirip roket RX 420 subsonik dan supersonic",* Proceeding Teknologi Dirgantara, Diskusi Teknik, LAPAN, ISBN/ISSN :9798554-00-0, athun 1994, hal.120-129.

[2]. Martin Djamin dan Budiarto, *"Pengaruh waktu penuaan terhadap sifat fisik pada sintesa bahan paduan ingat bentuk CuNiAl*" Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah, P3TM-BATAN, Yogyakarta, 14-15 Juli 1999.

[3]. Anugerah Novrio Angga, "Pengaruh Aging 200°C dengan Waktu 1-9 jam terhadap Sifat Mekanik pada Al-Cu *Remelting*", 2018.

[4].Juli Susabto, Harjo Seputro, Edi Santoso, "Analisa Pengaruh Variasi Media Pendingin dan Waktu *Aging* pada Perlakuan Panas T terhadap Struktur Mikro Komposit Aluminium Abu Dasar Batubara", 2018.

[5].Jaelani Sidik, M. Sholihin, Riyan Arthur, "Pengaruh Variasi Temperatur Perlakuan Panas *Aging* terhadap sifat Mekanik Aluminium AA 6061", 2019.

[6]. Edy Djatmiko dan Budiarto, *Analisis sifat mekanis dan strukturmikro pada produk paduan Al78Si22 hasil pengecoran cara squeezing casting,* Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir IV-2011, PPEN, BATAN, Jakarta

[7]. Habibie,B.J., *Strategi Pengembangan Industri*, disampaikan pada berbagai Kesempatan Seminar nasional.1982.

[8]. Djoko Suharto, *Pengembangan SDM untuk industri*, Orasi Ilmiah di Sidang Senat ITB. 1993.

[9]. Mahallawy N.A., Taha M.A. and M. Lotfizamzam, *Journal of Materials Processing Technology; On the microstructure and mechanical properties of squeeze cast Al-7 wt%Si alloy,* Vol. 40.1994.

[10]. H.Demir dan S.Gunduz.2009, The effecf of aging on machinability of 6061 Al alloy, Materials and design, 30-5, 1480-1483.

[11].H.H.Kim, S.H.Cho dan C.G.Kang.2008, Evalution of microstructure and mechanical properties by using nano-micro-indenfation and nanoscratch during aging treatment of rheo-forget Al-6061 alloy, Materials Science and Engineering, A485-1, 272-281.

[12]. Suhariyanto,2004, Peningkatan Sifat Mekanik Paduan Aluminium A 356.0 dengan penambahan TiC dan Perlakuan Panas T6, *SAINTEK Jurnal Ilmiah Teknik dan Rekyasa*, Vol.8, No.2 ISSN 1411-5662.

[13].John E.Hatch,1995, *Aluminium Properties and Physical Metallurgy. American Sociaty for Metals*, Ohio.

[14].Mudjijana dan Hadrizal, *Analisis Kualitas Produk Gokart dari Paduan Alumunium*, Prosiding Pertemuan Ilmiah 1997, PPSM-BATAN, Jakarta, pp. 146-151, 1997.

[15].Surdia, T., 1987. "Pengetahuan Bahan Teknik," Jakarta, Pradnya Paramita.

[16].Callister Jr., William. D., 1994, "Material Science And Enginering," 3rd edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey/

[17].Smallman R. E, Bishop R. J dan Djaprie, Sriati, 2000,"Metalurgi Fisik Modern dan Rekayasa Material", Erlangga, Jakarta

[18].Hawas, N.M.,2013, "Effect of Ageing Time on Adhesive Wear of AL Alloy AA6061-T6," Journal Kerbala University, Vol. 11 No.4.

[19].Singh, G., Kumar., Singh, A., 2013, "Influence of Current on Microstructure and Hardness of Butt Welding Aluminium AA 6082 Using GTAW Process," International Journal of Research in Mechanical Engineering & Technology :1- 4

[20].Aryanto, P. Marwoto, T. Sudiro, M. D. Birowosuto, Sugianto, and Sulhadi.,2016 "Structure evolution of zinc oxide thin films deposited by unbalance DC magnetron sputtering." in. AIP Conference Proceedings, vol. 1729, pp. 020039(1-5).

LAMPIRAN

1.Personil Tim peneliti

1.	Ir. Budiarto, M.Sc.	Ketua Tim
2.	Susilo,S.Kom, MT	Anggota
3.	Kombes Ir. Ulung Sanjaya,MT	Anggota
4.	Daniel	Teknisi
5.	Shena	Teknisi

2. Jadwal Pelaksanaan

Pelaksanaan dilakukan 1 semester :

1. **Semester Ganjil 2019/2020.** Pada semester ganjil ini ditargetkan semua konstruksi selesai di laksanakan dan mahasiswa dapat mulai melakukan pengamatan yang dibutuhkan berkaitan dengan tugas mahasiswa.

3. Daftar Riwayat Hidup Peneliti.

3.1Ketua Tim Peneliti.

Nama	: Ir. Budiarto, M.Sc
NIP	: 141111
Sertifikat Pendidik	: 16103100904154 Tahun 2016
NIDN	: 03-021158-01
Tempat dan Tanggal Lahir	: Klaten 02 Nopember 1958
Jenis Kelamin	: Laki-laki
Status Perkawinan	: Kawin
Agama	: Islam
Golongan / Pangkat	: Pembina Utama / IV e
Jabatan Fungsional Akademik	: Lektor
Perguruan Tinggi	: Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Kristen Indonesia

Alamat : Jl. Mayjend. Sutoyo, Cawang, Jakarta Timur, 13630
Telp./Faks. : 021-8009190 Ext. 408, Faks.021-8093948
Alamat Rumah : Jln Garuda VIII No 10-11 Rt 01/ Rw 12 Kel. Pulogebang, Cakung – Jakarta Timur
Telp./Faks. : 08179844896
Alamat e-mail : budidamaz@gmail.com

RIWAYAT PENDIDIKAN PERGURUAN TINGGI

Tahun Lulus	Program Pendidikan (diploma, sarjana,magister, spesialis, dan doktor)	Perguruan Tinggi	Jurusan/ Bidang Studi
1985	S 1	Universitas Diponegoro	Teknik Kimia
1994	S 2	Universitas Indonesia	Material science

PENGALAMAN PENELITIAN (5 TAHUN TERAKHIR)

Tahun	Judul Penelitian	Ketua/Anggota Tim	Sumber Dana
2015	Analisis waktu penuaan terhadap sifat mekanis dan strukturmikro pada paduan ingat bentuk Cu53,4 Zn38,6Sn2,3.	Peneliti Utama	Pribadi
2016	The effect of antioxidant and concentration of IPPD and TMQ and mixing time of physical, thermal, mechanical properties and microstructure on natural rubber compound.	Peneliti Utama	Pribadi
2017	Analisis pengaruh inhibitor asam askorbat terhadap morfologi permukaan dan laju korosi media air laut pada baja A242.	Peneliti Utama	Pribadi
2017	The Effect Analysis OF Ascorbic Acid inhibitors On the Morfologi surface,	Peneliti Utama	Pribadi

	Crystal structure, and Corrosion rate in sea water media using A 242 Steel		
2018	Analysis Of Physical And Microstructure Liquid Fuels From Waste Plastic Pyrolysis Polypropylene	Peneliti	Penelitian Mandiri-UKI
2018	Pengaruh *Heat Treatment* Dan Media Pendingin Terhadap Struktur Kristal Dan Kekerasan Paduan Cu-Be	Peneliti Pertama	Kerja sama
2018	Studi Pemilihan Material Pemberat Cement *Slurry* Untuk Penyemenan Pipa Selubung 9 5/8 *Inchi* Pada Sumur Minyak dan Gas.	Peneliti Pertama	Kerja sama
2018	Studi Perbandingan *Electrical Submersible Pump* Dengan Dan Tanpa Gas Separator Terhadap Kinerja Pompa Untuk Sumur Rama-X	Peneliti Pertama	Kerja sama
2018	Analisis Perbandingan Teknologi Proses Elektro De-ionisasi Dengan Demineralisasi Di Industri Farmasi	Peneliti Pertama	Kerja sama
2019	Pengaruh Temperatur Penuaan Buatan Terhadap Kekerasan Dan Strukturmikro Pada Paduan $Cu_{92,60}Pb_{5,42}Sn_{1,98}$	Peneliti Pertama	Kerja sama
2019	The heat treatment of austenisation analysis of medium carbon steel to the hardness, microstructure, and tensile strength	Peneliti Pertama	Kerja sama

Saya menyatakan bahwa semua keterangan dalam ***Curriculum Vitae*** ini adalah benar dan apabila terdapat kesalahan, saya bersedia mempertanggungjawabkannya

Jakarta, 13 September 2019.

Dosen yang bersangkutan

(Ir. Budiarto, M.Sc)
NIP/NIDN :141111/ 03-021158-01

MAKALAH INI AKAN DI TERBITKAN PADA KONFERENSI INTERNASIONAL DI UNIVERSITAS SUMATERA UTARA, MEDAN. TANGGAL 5 SEPTEMBER 2020.

BUDIARTO LOA ICCST-2020 11550.pdf

The Effect of Artificial Age Time On Crystal size, Dislocation Density, Hardness and Micro Structure On Al 6061 Materials Alloy

Budiarto[1], Susilo[2] and Ulung Sanjaya[3]
[1]Mechanical Engineering Study Program, Faculty of Engineering, UKI, Jakarta
[2]Electrical Engineering Study Program, Faculty of Engineering, UKI, Jakarta
Jl. Mayjen Sutoyo no.2 Cawang - Jakarta 13630 Indonesia
[3]Fields of Balmetsenpi, Puslabfor, Police Headquarters, Jakarta
[1]budidamaz@gmail.com

Abstract.Research on the effect of T6 heat treatment and artificial life time on crystal size, density dislocation, hardness, and microstructure of Al 6061 alloy material made from powder metallurgy. The T6 heat treatment starts with a solid solution which is heated at 530 ° C, held for 60 minutes, then quenching into the water media, and the artificial aging process at 200 ° C and variations in the holding time of 1h, 24h, and 30h. Crystal size, dislocation density and lattice microstructure testing using X-ray diffractometer, hardness testing with Vickers scale and surface microstructure with SEM-EDX. Test results of crystal size, dislocation density, and micro lattice strain on 4 phase α-Al at the miller index plane (111), (200), (220), and (311) show that the crystal size increases with the duration of heating time of artificial aging. While dislocation density and micro lattice strain increase over a heating period of 1h to 30h, dislocation density and lattice strain decrease at the Miller index plane (111) to (311). The hardness testing of Al 6061 as-cast material was 54 HV after quenching the water hardness value of 75 HV, but after artificial aging the hardness decreased with a longer holding time from 45.50 HV to 39.95 HV. Microstructure observations with SEM-EDX, showed that the Al 6061 test sample without heat treatment showed a dominant α-Al matrix, whereas in the Al 6061 sample after the T6 process it was seen that the Mg_2Si phase functioned to harden the Al 6061 alloy.

Keywords: Al-6061 material, T6, artificial age, crystal size, dislocation density

INTRODUCTION

Aluminum is the 4th most abundant element on earth which is a lightweight metal which has mild properties, good corrosion resistance and good conductivity of electricity and heat, easily formed either through the process of forming or machining, and other good properties as metal properties. In nature, aluminum is a stable oxide which cannot be reduced in the same way as other metals. Aluminum reduction can only be done by electrolysis. In addition to its mechanical strength which is greatly increased with the addition of Cu, Mg, Si. Mn, Zn, Ni, etc., individually or together, also provide other good qualities such as corrosion resistance, wear resistance, low expansion coefficient and so on. [1,2]

Aluminum is a material that is widely used for construction, ranging from bicycles, automotive, ships, rockets, to aircraft. The advantages of aluminum material are its light weight and strength which can be increased according to needs. The strength of aluminum is usually increased by means of alloying and heat treatment. Most aluminum materials are strengthened by a metal strengthening mechanism called precipitation hardening. In precipitation hardening must have two phases, namely a phase which is more numerous is called a matrix and a phase whose number is smaller is called precipitate. This strengthening mechanism includes three stages, namely a). solid solution treatment: heating up above the solvus line to get a homogeneous solid solution phase, b). quenching: better quickly to maintain a homogeneous solid phase microstructure to prevent diffusion, and c). aging: heated to a temperature not too high so that the alpha phase diffusion occurs at a short distance to form precipitate. [3,4]

In the industrial world, especially automotive, the use of aluminum materials and alloys is often used, so innovations for aluminum materials continue to be developed to get maximum results. In the aluminum-based casting process for sub-assy transmission components one of the problems faced is the lack of perfection in the sub-assy transmission component products, such as uncomplate filling, low mechanical properties, shrinkage, and porosity. Through the heat treatment process aluminum alloy serves to improve the mechanical properties of the material, and modification of the microstructure of the material itself. Research on the addition of Sr to the mechanical properties analysis of Aluminum Casting with the modifier process based on variations of 0wt strontium variations. % Sr, 0.05wt. % Sr, 0.075wt. % Sr, and 0.1 wt. % Sr will increase tensile strength by 30.1% and compressive strength by 14.8% and the formation of Al-Fe-Mn-Si phase, silicon phase and α-Al phase has been carried out. [5]

hanges in properties that occur at the end of the heat treatment process are caused by changes in the microstructure of the metal during the heating and cooling process. The magnitude of this microstructure is greatly influenced by the chemical composition of metals or their alloys and the type of heat treatment they undergo, therefore the type of heat treatment process is divided into, heat treatment which causes changes in the micro structure throughout the metal parts. Precipitation of the second phase particles involves a diffusion process that is highly dependent on temperature and time, therefore both temperature and aging time are two important parameters in the process of hardening the precipitate. During the aging process, the hardness and tensile strength of the material will increase and reach a maximum value when coherent deposition particles reach optimal distortion and size. If the size of the particles is too coarse, the distance between the particles will be too far away so that it is no longer effective in resisting the movement of dislocations. [6,7]

This study aims to determine the effect of artificial aging resistance time on crystal size, dislocation density, lattice microstructure by X-ray diffraction method, hardness and microstructure in Al 6061 alloys made with powder metallurgy method after T6 process.

METHODOLOGY

The material used in the form of Al 6061 cylindrical shape is made by powder metallurgy method by weighing, mixing Al, Mg, and Si powder then printed and pressed 20 Ton and sintered temperature 475 ^{0}C. Size 20 mm in diameter, 2 mm thick.

Table 1. Data on the composition of the chemical elements of Al 6061 alloys with an OE Spectrometer

Unsure	Al	Si	Mg	Cu	Mn	Zn	Fe	Pb	Cr	Ti
Wt%	97,11	0,86	1,52	0,018	0,002	0,51	0,005	0,001	0,003	0,002

Before testing, the material was given a T6 heat treatment at a temperature of 530 ^{0}C solid solution treatment for 1 hour, then quenched in cold water media. After that artificial aging is carried out with a temperature of 200 ^{0}C held for 1 hour, 24 hours, and 30 hours. The metallographic process starts grinding, polishing to etching. The Al 6061 alloy specimens were then subjected to three tests, namely the Vickers micro scale hardness test, Crystal size test, dislocation density, and micro lattice strain with the XRD tool at UPT FMIPA, UI, and surface microstructure test with SEM-EDXS and hardness testing using a standard Vickers micro scale ASTM E384 with a compressive time of 12 seconds and a 0.5 KgF major load at the Forentik Laboratory, Puslabfor, Police Headquarters.

Testing of crystal structure such as crystal size, dislocation density, and microstructure of Al 6061 alloy lattice using XRD (Smartlab-Rigaku model) with Cu Kα radiation (λ = 1.5406 Å). XRD data were obtained at room temperature in the range of 25 ° to 100 ° using a scan speed of 2 ° / min and a step width of 0.02 °. Crystal parameters such as, average crystal size, lattice strain, dislocation density, and lattice parameters (a and c) are determined from the results of XRD analysis. The average crystal size (D) of Al 6061 alloys is estimated using the Derby Scherrer equation [4],

$$D = 0.9 \lambda / \beta \cos \theta \quad (1)$$

where, λ is the wavelength of x-rays (1.5405 Å), β is FWHM (full width at half maximum) of the peak (hkl) and θ is the diffraction angle.

Lattice micro strain (ε) is calculated using the following equation [4],

$$\varepsilon = \beta / 4\tan \theta \quad (2)$$

The density of dislocation (ρ) due to lattice strain can be expressed by the relationship [4],

$$\rho = 1 / D^2 \quad (3)$$

After the dislocation density is known, the yield strength (Ys) can be calculated by the following equation [4]:

$$Ys = 274.54 + 4{,}963 \times 10\text{-}6 \sqrt{\rho} \quad (4)$$

with units of Ys in MPa and ρ in m/m^3 or lines/m^2

RESULTS AND DISCUSSION

a. Analysis of Crystal size, dislocation density, micro lattice strain with XRD

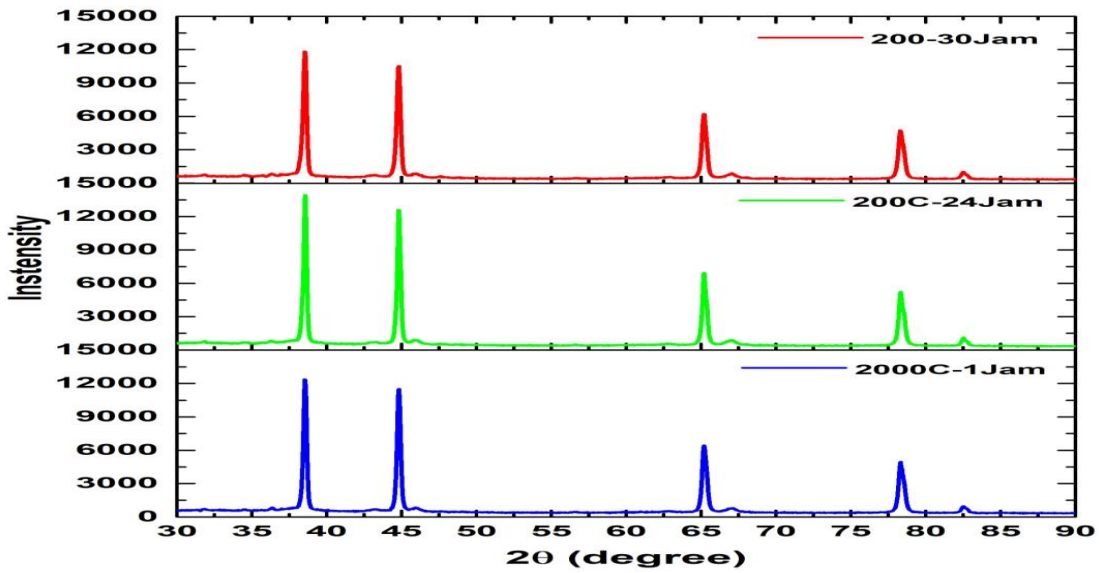


Figure 1. Difractogram from Al 6061 alloy on temperature 200 ^{0}C artificially age with holding time 1 h, 24 h, and 30h.

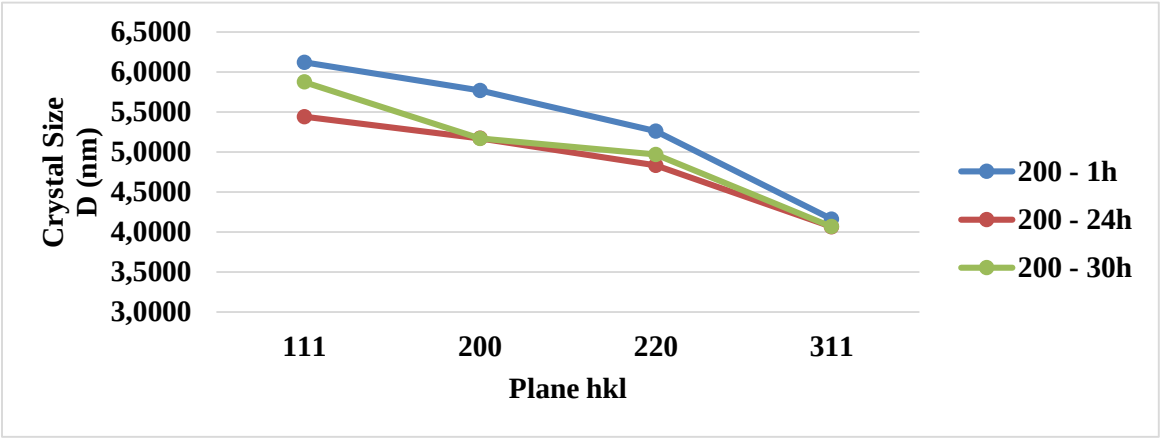


Figure 2. Graph of relationship between Miller's index field and crystal size at the time variation artificial age of Al 6061 alloys

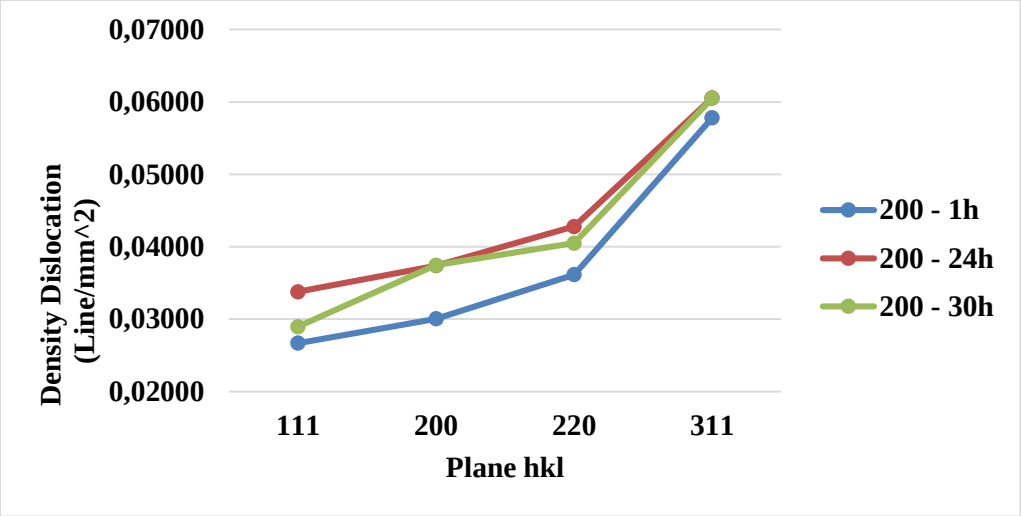


Figure 3. Graph of relationship between Miller's index field and density of dislocation at the time variation artificial age of Al 6061 alloys

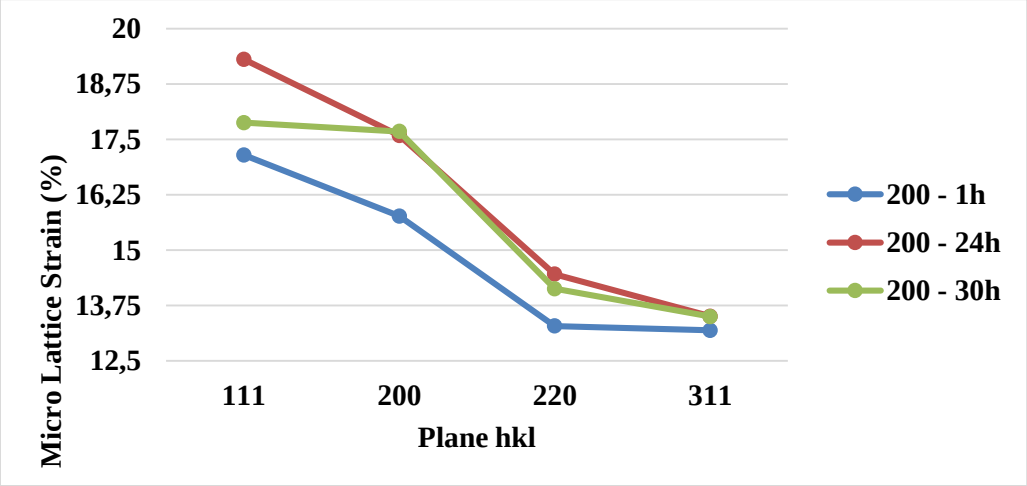


Figure 4. Graph of relationship between Miller's index field and micro lattice strain at the time variation artificial age of Al 6061 alloys

The diffraction peaks of the XRD results show that Al 6061 alloys have 4 α-Al phases in the Miller index plane namely (111), (200), (220), and (311) of the crystal size seen the longer the holding time the smaller the crystalline size (6.3nm to 5.8nm) in the Miller index field (111), as well as in the Miller index field (311) the smaller the crystal size (4.3nm to 4.0 nm) see in Figure 2.

The size of the crystallites in the Miller index field (111) which is 6.3nm decreases with the holding time of artificial aging 30 hours is 4 nm in the Miller index plane (311). These data indicate that the increase in crystallite size is likely due to the recrystallization process and grain growth during aging. This can be explained by the micro lattice strain, that the majority of Al 6061 alloy plastic deformations occur through a dislocation process slip and twin. Thus the artificial aging imposed on the Al 6061 alloy material does not turn into grain strain but into rotation on the crystal lattice. This crystal lattice shift produces crystallites. Because the heat treatment (artificial age), the second causes the diffusion of atoms at the grain boundary, which is characterized by an increase in crystal size. In Figure 2 shows the value of the dislocation density seen the longer the holding time the greater the density of the dislocation (0.028 lines / mm2 in the Miller index plane (111) to 0.058 lines / mm2 in the Miller index plane (311).

In Figure 3, there are 4 diffraction peaks from the XRD results showing that Al 6061 alloys consisting of Miller index fields namely (111), (200), (220), and (311) of the lattice microstructure show that the longer the holding time the greater micro lattice strain (17.2%) in the Miller index field (111), as well as in the Miller index field (311) the longer the holding time the micro lattice strain is getting smaller at 13%.

Figures 1.2,3, and 4, show that increasing the holding time of aging heat treatment results in narrowing of the diffraction peak, which is marked by a decrease in the FWHM value. The results revealed that grain growth occurred from Al 6061 alloys. In addition, the diffractogram pattern also showed that the intensity of the diffraction peaks increased with increasing time to hold artificial aging during heat treatment. This indicates that there is an increase in the crystal quality of Al 6061 alloys. The crystal quality of Al 6061 alloys is influenced by micro lattice strain and dislocation density. Low strain value and dislocation density indicate good crystal quality. These results are closely related to the reduction in line shape crystal defects in Al 6061 alloys.

Due to the increase in the crystal defect line shape is shown by increasing the lattice microstructure value resulting in an increase in the density of the dislocation. Because lattice microstructure affects the length of the dislocation line per unit volume of crystal. [7]

In addition the micro lattice strain of Al 6061 alloy samples resulting from rapid dipping and artificial aging within 24 hours in the Miller index field (311) is 13% smaller when compared to the Miller index field (111) artificial aging within 24 hours ie 19%. This data shows that the low lattice microstructure is likely to occur the process of recrystallization and grain growth during artificial aging. Based on data that the dislocation density resulting from artificial aging in the Miller index (311) is greater than that of the Miller index field (111), it means that there is a maximum strain limit due to deformation. The maximum strain is caused by the deformation mechanism and must meet the constant c / a ratio, so the dislocation density increases. Increasing the dislocation density results in a further increase in residual stress to the yield strength.[7,8]

b. Analysis of Micro Vickers Hardness

From the results of the average hardness testing of the Al 6061 test sample which experienced T6 heat treatment, namely heating of a solid solution at a temperature of 530 0C and artificial aging at an temperature of 200 C with time variations for 1 hour, 24 hours and 30 hours.

Table 2. Results of Vickers micro-scale Hardness testing from Al 6061 alloys

No.	Hardness Vickers (HV)		
1	As cast		54
2	Quenching		75
3	Aging	Time 1 hour	45,5
4		Time 24 hours	42
5		Time 30 hours	39,95

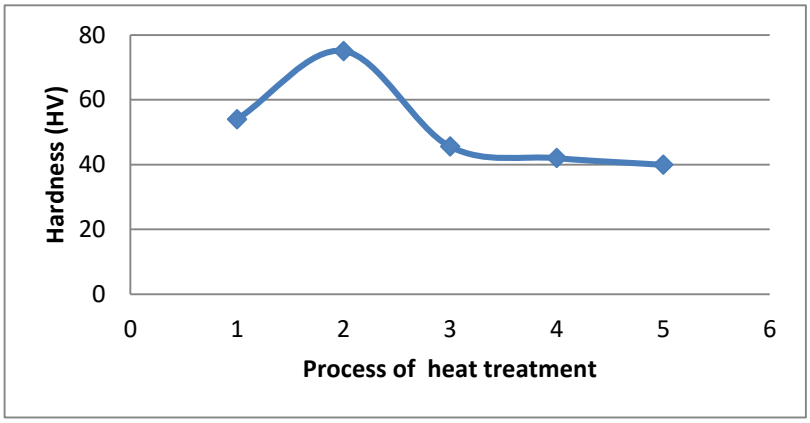


Figure 5. Graph of relationship between hardness on process T6, at the time variation artificial age of Al 6061 alloys

Hardness test results for Al 6061 alloys using the Micro Vickers scale see Table 2. Samples of Al 6061 as cast (original) alloys were 54 HV and after quenching 75 HV. The artificial aging process with a temperature of 200 C and a holding time variation of 1 hour, 24 hours, and 30 hours decreased the value of hardness compared to materials without heat treatment by 15.74% or originally 54 HV to 45.5 HV. The highest hardness value after

quenching is 75 HV. This is caused by the presence of the second phase, Mg2Si as precipitate. The presence of this precipitate plays a role in increasing the hardness of Al 6061 alloys, by blocking dislocation movements and dislocation buildup which causes lattice distortion in Al 6061 alloys when subjected to deformation. [7] After artificial aging the value of violence decreases with length of detention time from 1 hour (45.5 HV) to 30 hours (39.95 HV). This is consistent for all variations of artificial aging time on Al 6061 alloys. The phenomenon of decreasing the value of violence during the artificial aging process is called over aging. [10/8] decrease the value of violence. This is due to the joining of precipitates into larger sized particles which causes the dislocation movement barrier to become weaker, thus decreasing mechanical properties. Also caused by precipitates not spread evenly and large sizes of precipitates in Al 6061 alloys. [7,9]

b.Analysis of Micro Structure with SEM-EDXS

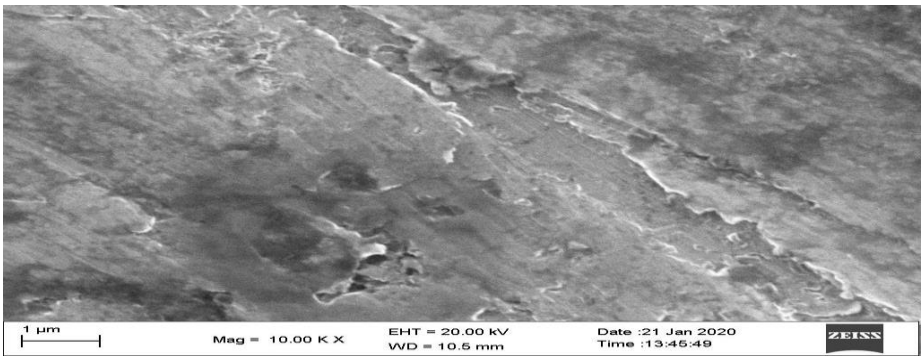


Figure 5. Micrographs of Al 6061 alloy micrographs at age temperatures of 200 ^{0}C, 1 hour time, 10,000X enlargement

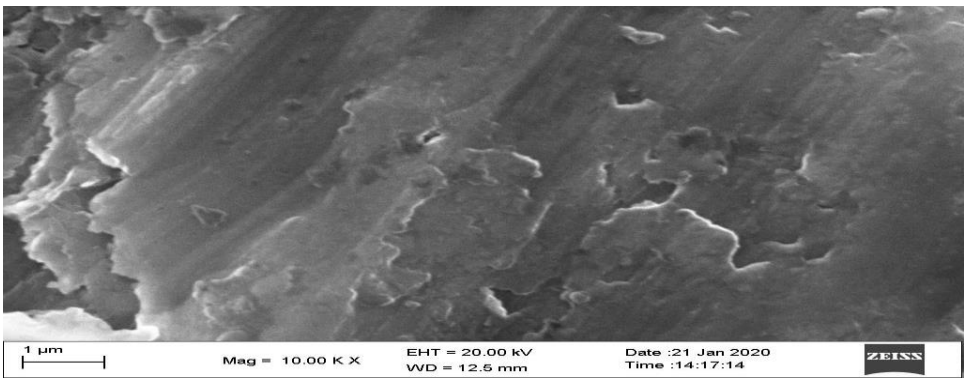


Figure 6. Micrographs of Al 6061 alloy micrographs at age temperatures of 200 ^{0}C, 24 hours time, 10,000X enlargement

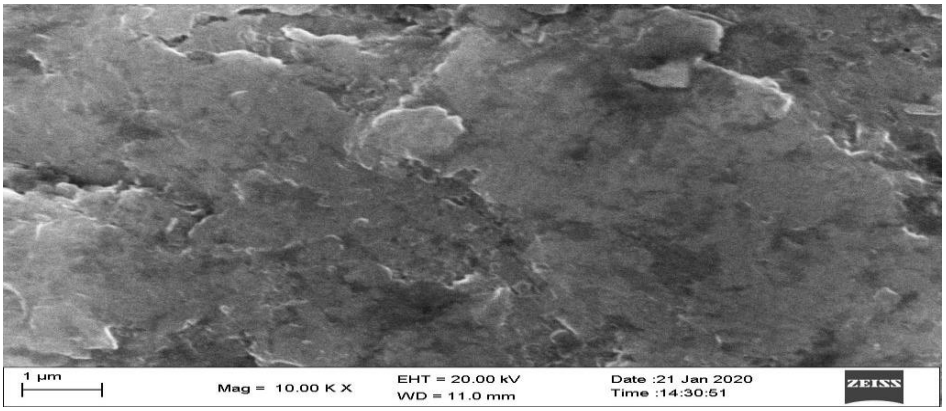


Figure 7. Micrographs of Al 6061 alloy micrographs at age temperatures of 200 ^{0}C, 30 hours time, 10,000X enlargement

From Figures 5, 6, and 7 show that micrograms of Al 6061 alloy after aging help with time variations of 1 hour, 24 hours, and 30 hours. Everything looks equaxial in the condition of 1 to 30 hours. Artificial aging grains indicate elongated grain. The changing shape of the grain after artificial aging is due to deformation so that it changes the shape of the Al 6061 alloy material. This will also have an impact on the mechanical properties ie the hardness produced.

CONCLUSIONS

From the results of calculations and analysis, it was concluded that after the T6 process began solid solution treatment, quenching and holding time variations artificially aging on Al 6061 alloys resulted in recrystallization and grain growth as evidenced by the increase in lattice microstructure and crystallite size of the α-Al phase at the Miller index fields (111), (200), (220) and (311) within 24 hours, and the dislocation density decreases. Hardness value decreases with increasing aging time. This is due to the joining of precipitates as phase two Mg2Si into larger sized particles which causes dislocation movement barriers to become weaker, so that the value of hardness (mechanical properties) decreases. The changing shape of the grain after artificial aging is due to deformation so that it changes the shape of the Al 6061 alloy material. This will also have an impact on the mechanical properties ie the hardness produced.

ACKNOWLEDGMENTS

Thank you to the Chancellor of the University of Kristen Indonesian for funding this research and the International \Conference on Chemical Sceince and Technology (ICCST) -2020.

REFERENCES

1 N.M.Hawas,, "Effect of Aging Time on Adhesive Wear of AL Alloy AA6061-T6," Journal of Kerbala University, Vol. 11 No.4.(2013)
2 T.Surdia, "Knowledge of Engineering Materials," Jakarta, Pradnya Paramit.(1987)
3 G .Singh, Kumar., A. Singh, "Influence of Current on Microstructure and Hardness of Butt Welding Aluminum AA 6082 Using GTAW Process," International Journal of Research in Mechanical Engineering & Technology: 1- 4(2013)
4 W.D. Callister , "Material Science and Engineering," 3rd edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey (1994)
5 R.E.Smallman R.Bishop and S. Djaprie, "Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering", Erlangga, Jakarta.(2000)
6 D.S.Budiarto, W. Hernowo Widodo, Analysis of the Effects of Strontium Addition on Mechanical and Micro-Structure Properties of Al90.28 Si6.42Cu2.66Fe.67, Journal of Scientific Studies, Vol. 19, No. 3, September 2019, p-ISSN 1410-9794, e-ISSN 2597-792X (195-202)

7 D. Aryanto, P. Marwoto, T. Sudiro, M. D. Birowosuto, Sugianto, and Sulhadi.,"The structure of the evolution of zinc oxide thin films deposited by unbalanced DC magnetron sputtering." in. AIP Conference Proceedings, vol. 1729, pp. 020039 (1-5).(2016)
8 H. Demir and S.Gunduz. The effect of aging on machinability of 6061 Al alloy, Materials and design, 30-5, 1480-1483(2009)
9 H.H.Kim, SH.Cho and CG.Kang, Evalution of microstructure and mechanical properties by using nano-micro-indentation and nanoscratch during aging treatment of rheo-forget Al 6061 alloy, Materials Science and Engineering, A485-1, 272 -281(2008).

MAKALAH INI AKAN DITERBITKAN KE JURNAL SINTA

ANALISIS KERAPATAN DISLOKASI, REGANGAN MIKRO DAN KEKERASAN AKIBAT PROSES T6 PADUAN $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$

Budiarto
Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indonesia
Jl. Mayjen Sutoyo no.2 Cawang Jakarta
e-mail : budidamaz@gmail.com

ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian analisis kerapatan dislokasi, regangan mikro kisi, ukuran kristal, sturktur mikro dan kekerasan terhadap perlakuan pemanasan T6 dengan variasi temperatur *artificial age* pada paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$. Sampel paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ ini dibuat dengan metalurgi butiran selanjutnya dilakukan pemanasan T6 (pemanasan *solid solution* pada temperatur 530 ^{0}C selama 1 jam dan variasi temperatur *artificial age* 140^{0}C, 170^{0}C, dan 200^{0}C serta waktu selama 1jam). Hasil pengujian kekerasan menunjukkan bahwa paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ kekerasan naik akibat adanya variasi temperatur *artificial age*. Pengamatan struktur mikro menunjukkan struktur *hypoeutektik* terdiri dari dendrit aluminium primer dan campuran *eutektik* paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$. Hasil analisa kerapatan dislokasi, regangan mikro, dan ukuran kristal setelah perlakuan panas T6 menunjukkan bahwa paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$. terdiri dari fasa α-Al, dan fasa Mg_2Si.

Kata kunci: Paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$, kerapatan dislokasi, kekerasan, XRD.

ABSTRACT

The dislocation density, micro lattice strain, crystal size, microstructure and hardness of T6 heating treatment have been carried out with variations in temperature of artificial age in $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ alloys. The $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ alloy sample was made with granular metallurgy and then T6 was heated (solid solution heating at 530 0C for 1 hour and temperature variations of artificial age 1400C, 1700C, and 2000C and time for 1 hour). The hardness test results showed that the $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$alloy increased due to variations in artificial age temperatures. Microstructure observation shows hypoeutectic structure consisting of primary aluminum dendrite and eutectic mixture of $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$. The results of the analysis of dislocation density, microstructure, and crystal size after T6 heat treatment showed that the $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ alloy. consists of the □-Al phase, and the Mg2Si phase.

***Keywords**: $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ Alloys, dislocation density, hardness, XRD*

PENDAHULUAN

Aluminium adalah logam yang ringan dan cukup penting dalam kehidupan manusia. Aluminium merupakan unsur kimia golongan IIIA dalam sistim periodik unsur, dengan nomor atom 13 dan berat atom 26,98 gram per mol (sma) [1]. Struktur kristal aluminium adalah struktur kristal FCC, sehingga aluminium tetap ulet meskipun pada temperatur yang sangat rendah.

Keuletan yang tinggi dari aluminium menyebabkan logam tersebut mudah dibentuk atau mempunyai sifat mampu bentuk yang baik.[1] Aluminium memiliki beberapa kekurangan yaitu kekuatan dan kekerasan yang rendah bila dibanding dengan logam lain seperti besi. Juga aluminium merupakan logam ringan yang mempunyai ketahanan korosi yang baik dan hantaran listrik yang baik dan sifat – sifat yang baik lainnya sebagai sifat logam. Sebagai tambahan terhadap, kekuatan mekaniknya yang sangat meningkat dengan penambahan Cu, Mg, Si, Mn, Zn, Ni, dsb. Secara satu persatu atau bersama-sama, memberikan juga sifat-sifat baik lainnya seperti ketahanan korosi, ketahanan aus, koefisien pemuaian rendah. Material ini dipergunakan di dalam bidang yang luas bukan saja untuk peralatan rumah tangga tapi juga dipakai untuk keperluan material pesawat terbang, mobil, kapal laut, konstruksi [1]**.** dan baja. Aluminium memiliki karakteristik sebagai logam ringan dengan kerapatan 2,7 g/cm^3 [1].
Selain sifat-sifat tersebut aluminium mempunyai sifat-sifat yang sangat baik dan bila dipadu dengan logam lain bisa mendapatkan sifat-sifat yang tidak bisa ditemui pada logam lain. Adapun sifat-sifat dari aluminium antara lain : ringan, tahan korosi, penghantar panas dan listrik yang baik. Sifat tahan korosi pada aluminium diperoleh karena terbentuknya lapisan oksida aluminium pada permukaaan aluminium. Memadukan aluminium dengan unsur lainnya merupakan salah satu cara untuk memperbaiki sifat aluminium tersebut. Paduan adalah kombinasi dua atau lebih jenis logam, kombinasi ini dapat merupakan campuran dari dua struktur kristalin. Paduan dapat disebut juga sebagai larutan padat dalam logam. Larutan padat mudah terbentuk bila pelarut dan atom yang larut memiliki ukuran yang sama dan strukrur elektron yang serupa. Larutan dalam logam utama tersebut memiliki batas kelarutan maksimum. Paduan yang masih dalam batas kelarutan disebut dengan paduan logam fasa tunggal. Sedangkan paduan yang melebihi batas kelarutan disebut dengan fasa ganda. Peningkatan kekuatan dan kekerasan logam paduan disebabkan oleh adanya atom-atom yang larut yang menghambat pergerakan dislokasi dalam kristal sewaktu deformasi plastik [1]. Secara garis besar paduan aluminium dibedakan menjadi dua jenis yaitu paduan aluminium tempa dan aluminium cor.

Sifat-sifat umum pada paduan aluminium adalah:[1-2]
a.Jenis Al-murni teknik (seri 1xxx)

Jenis paduan ini mempunyai kandungan minimal aluminium 99,0% dengan besi dan silikon menjadi kotoran utama (elemen paduan). Aluminium dalam seri ini memiliki kekuatan yang rendah tapi memiliki sifat tahan korosi, konduksi panas dan konduksi listrik yang baik juga memiliki sifat mampu las dan mampu potong yang bagus. Aluminium seri ini banyak digunakan untuk *sheet metal work.*

b.Paduan Al-Cu (seri 2xxx)

Elemen paduan utama pada seri ini adalah tembaga, tetapi magnesium dan sejumlah kecil elemen lain juga ditambahkan kesebagian besar paduan jenis ini. Jenis paduan Al-Cu adalah jenis yang dapat diperlaku-panaskan. Dengan melalui pengerasan endap atau penyepuhan, sifat mekanikpaduan ini dapat menyamai sifat dari baja lunak, tetapi daya tahan korosinya rendah bila dibandingkan dengan jenis paduan yang lainnya. Sifat mampu lasnya juga kurang baik, karena itu paduan jenis ini biasanya digunakan pada kontruksi keling dan banyak sekali digunakan dalam kontruksi pesawat terbang seperti duralumin dan super duralumin.

c.Paduan jenis Al-Mn (seri 3xxx)

Manganesee merupakan elemen paduan utama seri ini. Paduan ini adalah jenis yang tidak dapat diperlaku-panaskan, sehingga penaikan kekuatannya hanya dapat diusahakan melalui pengerjaan dingin pada proses pembuatannya. Bila dibandingkan dengan jenis alumunium murni, paduan ini mempunyai sifat yang sama dalam hal ketahanan terhadap korosi, mampu potong dan sifat mampu lasnya, sedangkan dalam hal kekuatannya, jenis paduan ini jauh lebih unggul.

d.Paduan jenis Al-Si (seri 4xxx)

Paduan Al-Si termasuk jenis yang tidak dapat diperlaku-panaskan. Jenis ini dalam keadaaan cair mempunyai sifat mampu alir yang baik dan dalam proses pembekuannya hampir tidak terjadi retak. Karena sifat-sifatnya, maka paduan jenis Al-Si banyak digunakan sebagai bahan atau logam las dalam pengelasan paduan aluminium baik paduan cor atau tempa.

e.Paduan jenis Al-Mg (seri 5xxx)

Magnesium merupakan paduan utama dari komposisi sekitar 5%. Jenis ini mempunyai sifat yang baik dalam daya tahan korosi, terutama korosi oleh air laut dan sifat mampu lasnya. Paduan ini juga digunakan untuk *sheet metal work*, biasanya digunakan untuk komponen bus, truk, dan untuk aplikasi kelautan.

f.Paduan jenis Al-Mg-Si (seri 6xxx)

Elemen paduan seri 6xxx adalah magnesium dan silicon. Paduan ini termasuk dalam jenis yang dapat diperlaku-panaskan dan mempunyai sifat mampu potong dan daya tahan korosi yang cukup. Sifat yang kurang baik dari paduan ini adalah terjadinya pelunakan pada daerah las sebagai akibat dari panas pengelasan yang timbul. Paduan jenis ini banyak digunakan untuk tujuan struktur rangka.

g.Paduan jenis Al-Zn (seri 7xxx)

Paduan ini termasuk jenis yang dapat diperlaku-panaskan. Biasanya ke dalam paduan pokok Al-Zn ditambahkan Mg, Cu dan Cr. Kekuatan tarik yang dapat dicapai lebih dari 504 Mpa, sehingga paduan ini dinamakan juga *ultra duralumin* yang sering digunakan untuk struktur rangka pesawat. Berlawanan dengan kekuatan tariknya, sifat mampu las dan daya tahannya terhadap korosi kurang menguntungkan. Akhir-akhir ini paduan Al-Zn-Mg mulai banyak digunakan dalam kontruksi las, karena jenis ini mempunyai sifat mampu las dan daya tahan korosi yang lebih baik daripada paduan dasar Al-Zn.

Proses kondisi padat bisa dilakukan dengan salah satu cara yaitu dengan metalurgi serbuk. Metalurgi serbuk merupakan suatu proses pembuatan serbuk dan benda jadi dari serbuk logam atau paduan logam dengan ukuran serbuk tertentu tanpa melalui proses peleburan. Tahapan dari proses metalurgi serbuk secara umum dibagi menjadi 3(tiga) bagian, yaitu pencampuran serbuk matriks dan penguat *(mixing)*, penekanan, dan pemanasan *(sintering)* pada suhu tinggi. Teknik pembuatan dengan metalurgi serbuk memiliki kelebihan dibanding proses lainnya, diantaranya adalah diperoleh distribusi partikel penguat lebih merata dan sifat mekanik yang lebih baik, produk lebih beraneka ragam dan temperatur proses lebih rendah. Sedangkan kekurangan dari proses metalurgi serbuk dibandingkan teknik pengecoran adalah biaya relatif lebih mahal, ukuran benda yang dibuat terbatas dan dihasilkan produk dengan porositas lebih tinggi.[2,3]

Melihat prospek kedepan perlakuan panas T6 sebagai metode yang dapat digunakan untuk mendapatkan material dengan kombinasi sifat-sifat yang lebih baik dan dapat diterapkan pada hampir semua kelompok paduan aluminium pengerasan presipitat, atau bahkan paduan pengerasan presipitat pada umumnya dan melihat sampai sejauh ini di Indonesia perlakuan tersebut sudah banyak mendapat perhatian, maka penelitian yang dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi temperature penuaan buatan (artificially age) terhadap kerapatan dislokasi, regangan mikro kisi dan ukuran kristal dan sifat mekanik serta strukturmikronya. Manfaat lainnya adalah mendapat pemahaman yang lebih baik mengenai pembuatan paduan alumunium metode metalurgi butiran, proses T6 dan pertumbuhan presipitat serta hubungannya dengan sifat material yang dihasilkan sehingga diperoleh material dengan sifat-sifat yang diinginkan.

Proses perlakuan panas T6 terhadap paduan Aluminium dilakukan melalui metode pengerasan dengan terbentuk endapan (*Precipitation hardening*) yang secara garis besar terdiri dari tiga langkah.Langkah pertama, perlakuan panas pelarutan (*solution heat treatment)*, langkah kedua, pendinginan cepat (*quenching)* untuk mendapatkan larutan lewat jenuh *(supersaturated*) dan langkah ketiga: Proses penuaan buatan (*artifical aging*)
Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari proses T6 mulai *solid solution treatment* temperatur 530^{o}C selama 1 jam dan pengaruh variasi temperatur *artificially age* 140, 170 dan 200^{o}C waktu tahan 1 jam dari paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ yang dibuat dengan metode metalurgi serbuk untuk bahan roket, kemudian dilakukan uji kekerasan, kerapatan dislokasi, regangan mikro kisi, ukuran kristal dan pengamatan struktur mikro.

METODE PENELITIAN

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ yang dibuat dengan metalurgi serbuk. Pembuatan dimulai dengan menimbang sernuk Al, Mg, Si, Zn dan mencampur ke empat serbuk Al, Mg, Si, dan Zn. Kemudian dicetak pada dies dan ditekan 20 Ton serta di sinter temperatur 475 ^{0}C. Ukuran dies diameter 20 mm, tebal 2 mm. Selanjutnya dilakukan perlakuan panas T6.

Tabel 1. Data komposisi unsur kimia paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ dengan OE Spektrometer

Unsur	Al	Si	Mg	Cu	Mn	Zn	Fe	Pb	Cr	Ti
Wt%	97,11	0,86	1,52	0,018	0,002	0,51	0,005	0,001	0,003	0,002

Pada penelitian ini sampel paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$. dilakukan perlakuan panas T6 (*solid solution* pada temperatur 530 ^{0}C selama 1 jam dan *artificial age* dengan waktu tahan tetap 1 jam dan variasi temperatur 140^{0}C, 170^{0}C, dan 200^{0}C). selanjutnya dilakukan uji kekerasan dengan skala mikro Vickers, pengujian kerapatan dislokasi, regangan mikro kisi, ukuran kristal, dan struktur kristal dengan alat difraktometer sinar-X, dan pengamatan struktur mikro dengan SEM-EDXS.

Pengujian struktur kristal seperti ukuran kristal, kerapatan dislokasi, dan mikro regangan kisi paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ menggunakan XRD (model Smartlab-Rigaku) dengan radiasi Cu Kα(λ = 1,5406 Å). Data XRD diperoleh pada suhu ruang dengan rentang dari 25 ° sampai 100° menggunakan kecepatan scan 2 °/min dan lebar step 0,02°. Parameter kristal seperti, rata-rata ukuran kristal, regangan kisi, kerapatan dislokasi, dan parameter kisi (a dan c)

ditentukan dari hasil analisis XRD. Rata-rata ukuran kristal (D) dari paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$. diestimasi dengan menggunakan persamaan Derby Scherrer[3,7],

$$D = 0{,}9\ \lambda/\beta \cos\theta \ldots(1)$$

dimana, λ adalah panjang gelombang sinar-x (1,5405 Å), β adalah FWHM (full width at half maximum) dari puncak (hkl) dan θ adalah sudut difraksi.

Regangan mikro kisi (ε) dihitung menggunakan persamaan berikut[7,9],

$$\varepsilon = \beta/4\tan\theta \ldots (2)$$

Kerapatan dislokasi (ρ) karena regangan kisi dapat dinyatakan dengan hubungan[7,9],

$$\rho = 1/D^2 \ldots(3)$$

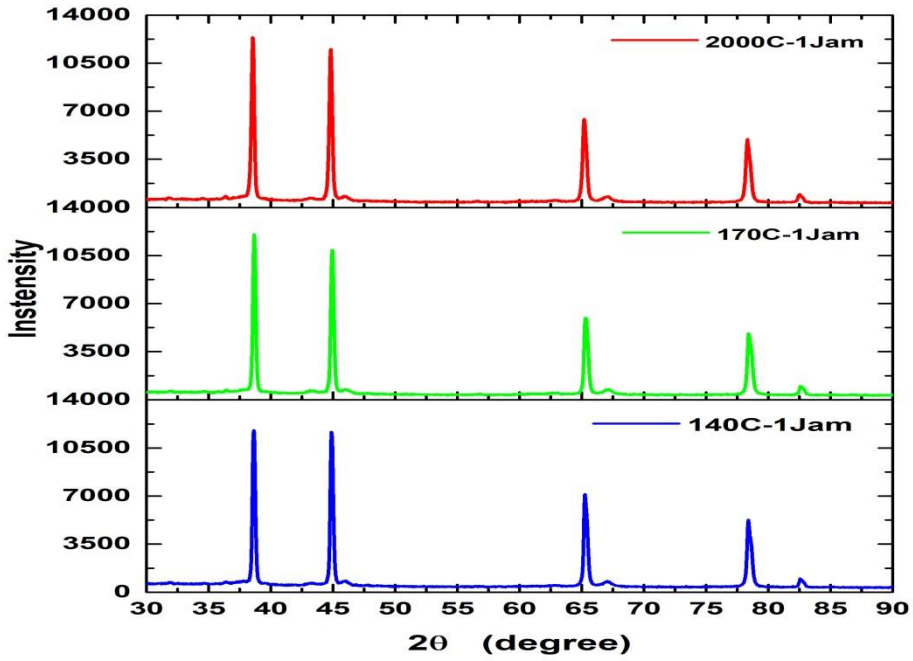
Setelah kerapatan dislokasi diketahui, maka kekuatan luluh (Ys) dapat dihitung dengan persamaan berikut[9]:

$$Ys = 274{,}54 + 4{,}963\times 10^{-6}\ \sqrt{\rho}\ \ldots(4)$$

dengan satuan Ys dalam MPa dan ρ dalam m/m^3 atau garis/m^2 .

HASIL DAN PEMBAHASAN

1.Analisa kerapatan dislokasi, regangan mikro kisi, dan diameter kristalit, terhadap variasi temperatur *artificial age* paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$



Gambar 1. Difraktogram sinar-X dari paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$
Waktu penuaan buatan 1jam, variasi temperatur 140,170,dan 200 ^{0}C

Tabel 2. Puncak difraksi sinar-X dari paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ penuaan buatan waktu 1 jam, variasi temperatur 140 ^{0}C

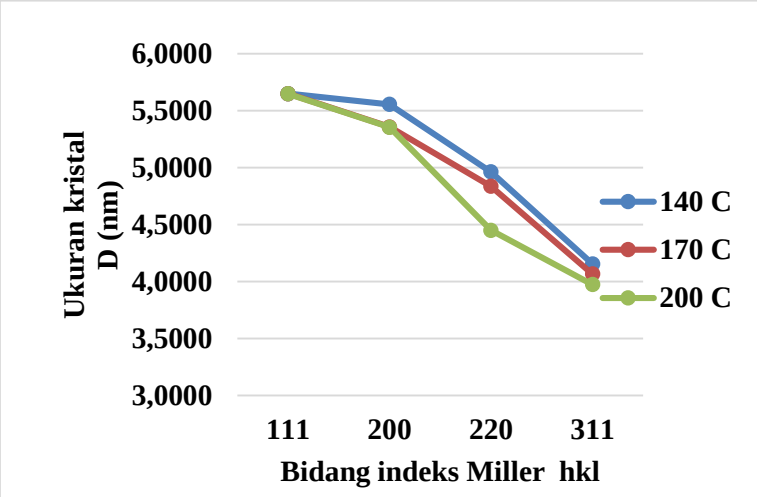
PEAK NO	2 θ (deg)	d (Å)	I/I_o	FWHM (deg)	JCPDS	(h k l)
1	38,67	1,9579	100	0,150	Fasa α -Al	111
2	45,91	1,6244	78	0,180	Fasa α -Al	200
3	65,24	1,9727	56	0,250	Fasa α -Al	220
4	78,55	1,2938	34	0,160	Fasa α -Al	311

Tabel 3. Puncak difraksi sinar-X dari paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ penuaan buatan waktu 1 jam, variasi temperatur 170 ^{0}C

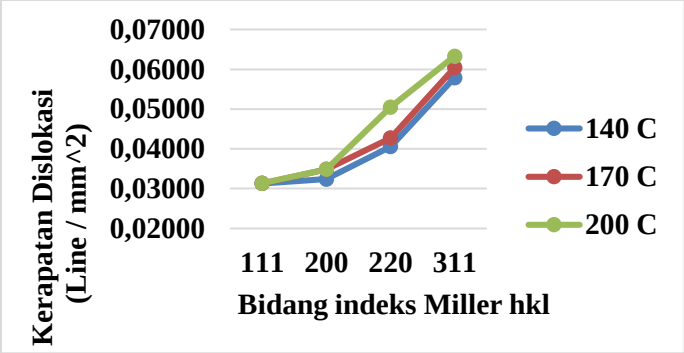
PEAK NO	2 θ (deg)	d (Å)	I/I_o	FWHM (deg)	JCPDS	(h k l)
1	38,49	1,9173	100	0,140	Fasa α -Al	111
2	45,93	1,7727	60	0,150	Fasa α -Al	200
3	66,19	1,9898	54	0,270	Fasa α -Al	220
4	78,64	1,3927	39	0,180	Fasa α -Al	311

Tabel 4. Puncak difraksi sinar-X dari paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ penuaan buatan waktu 1 jam, variasi temperatur 200 ^{0}C

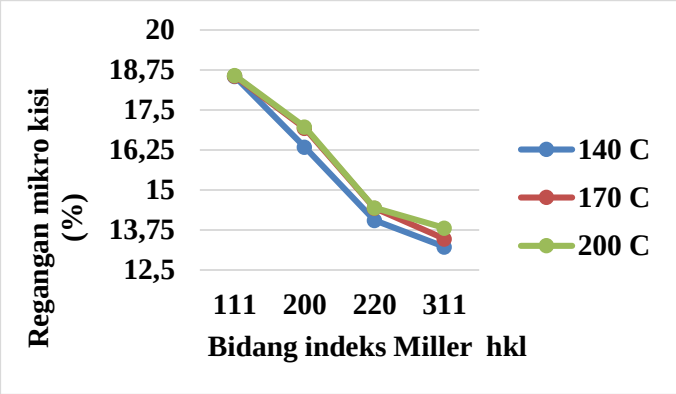
PEAK NO	2 θ (deg)	d (Å)	I/I_o	FWHM (deg)	JCPDS	(h k l)
1	38,87	1,9259	100	0,160	Fasa α -Al	111
2	45,74	1,6332	79	0,180	Fasa α -Al	200
3	65,29	1,9666	59	0,250	Fasa α -Al	220
4	78,65	1,2943	38	0,170	Fasa α -Al	311



Grafik 1. Hubungan ukuran kristal terhadap bidang indeks Miller (111), (200), (220), (311). Variasi temperatur penuuan buatan 140, 170, dan 200 ^{0}C waktu 1 jam.



Grafik 2. Hubungan kerapatan dislokasi terhadap bidang indeks Miller (111), (200), (220),(311).Temperatur penuaan buatan 140, 170, dan 200 ^{0}C waktu 1 jam.



Grafik 3. Hubungan regangan mikro kisi terhadap bidang indeks Miller (111), (200), (220), (311).Temperatur penuaan buatan 140, 170, dan 200 ^{0}C waktu 1 jam.

Pada gambar 1, menunjukkan difraktogram sinar-X dari paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ terdapat empat puncak difraksi yang datanya dapat dilihat pada Tabel 2 sampai Tabel 4. Dari grafik 1, memperlihatkan bidang indeks Miller yaitu (111), (200), (220), dan (311) terhadap ukuran kristal terlihat makin besar temperature penuaan buatan dan waktu penahanan tetap (1jam), menunjukkan bahwa ukuran kristalnya makin kecil(dari 6,3nm menjadi 5,8nm) mulai bidang indeks Miller (111) hingga bidang indeks Miller (311) dari 4,3nm menjadi 4,0 nm.

Data ini menunjukkan bahwa naiknya ukuran kristalit kemungkinan disebabkan oleh terjadinya proses rekristalisasi dan pertumbuhan butir selama penuaan. Hal ini dapat dijelaskan karena adanya regangan mikro kisi, bahwa deformasi plastis paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ mayoritas terjadi melalui proses dislokasi *slip* dan *twin.* Dengan demikian penuaan buatan yang dikenakan pada bahan paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ tidak berubah menjadi regangan butir tetapi menjadi rotasi pada kisi kristal. Dimana pergeseran kisi kristal ini menghasilkan kristalit. Karena perlakuan panas (*artificial age*) yang kedua menyebabkan terjadinya difusi atom-atom pada batas butir, dimana hal ini ditandai dengan peningkatan ukuran Kristal dibidang indeks Miller (111). Pada Grafik 2, memperlihatkan kerapatan/kerapatan dislokasi terlihat makin besar temperatur penuaan buatannya, makin besar kerapatan dislokasinya (0,028 garis/mm^2 pada bidang indeks Miller (111) menjadi 0,058 garis/mm^2 pada bidang indeks Miller (311). Hal ini berarti makin besar temperature penuaan buatannya makin banyak cacat garisnya pada bidang indeks Miller (311).

Pada Grafik 3, terdapat 4 puncak difraksi dari hasil XRD menunjukkan bahwa paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ yang terdiri dari bidang indeks Miller yaitu (111), (200), (220), dan (311) terhadap regangan mikro kisi terlihat makin besar temperatur penuaan buatannya, nilai regangan mikro kisi sama besarnya di bidang indeks Miller (111) yaitu 18,5%. Demikian pula pada bidang indeks Miller (311) terlihat makin besar temperatur penuaan buatannya, regangan mikro kisi makin kecil yaitu 13 – 13,75 %. Dari Grafik 1,2 dan 3,menunjukkan bahwa peningkatan temperatur pada perlakuan panas penuaan mengakibatkan penyempitan puncak difraksi, dimana ditandai dengan penurunan nilai FWHM. Hasil tersebut mengungkapkan bahwa terjadi pertumbuhan butir dari paduan terlihat makin besar temperatur penuaan buatannya, makin besar kerapatan/kerapatan dislokasinya. Data ini menunjukkan bahwa rendahnya regangan mikro kisi kemungkinan terjadinya proses rekristalisasi dan pertumbuhan butir selama penuaan buatan. Berdasarkan data bahwa kerapatan dislokasi hasil dari penuaan buatan didang indeks Miller (311) lebih besar dibandingkan dengan bidang indeks Miller (111), berarti ada batas regangan maksimum akibat deformasi. Regangan maksimum disebabkan oleh mekanisme deformasi dan harus memenuhi konstansi rasio c/a, sehingga kerapatan dislokasi menjadi bertambah. Penambahan kerapatan dislokasi mengakibatkan naiknya tegangan sisa yang selanjutnya pada kekuatan luluh.[7,8]

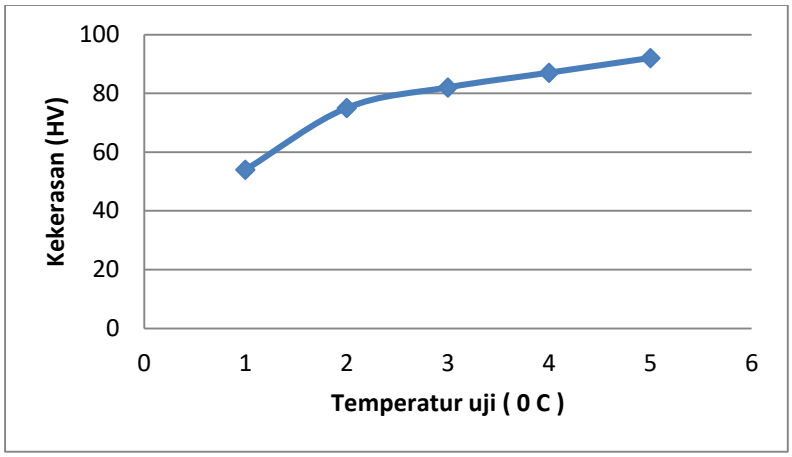
Selain itu, pola difraktogram juga menunjukkan bahwa intensitas dari puncak difraksi meningkat dengan meningkatnya temperatur penuaan buatan saat perlakuan panas. Hal itu mengindikasikan bahwa terjadi peningkatan kualitas kristal dari paduan terlihat makin besar temperatur penuaan buatannya, makin kecil kerapatan/kerapatan dislokasinya yang dipengaruhi regangan mikro kisi. Nilai regangan mikro kisi dan kerapatan/ kerapatan dislokasi yang rendah mengindikasikan kualitas kristal yang baik. Hasil tersebut berkaitan erat dengan berkurangnya cacat kristal bentuk garis(dislokasi). Karena peningkatan cacat kristal bentuk garis ditunjukkan dengan meningkatnya nilai regangan mikro kisi yang berakibat pada peningkatan kerapatan dislokasi. Karena regangan mikro kisi mempengaruhi panjang garis dislokasi per satuan volume kristal.[7,8]

2.Analisa kekerasan terhadap variasi temperatur *artificial age* paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$

Hasil pengujian dengan skala Vicker terlihat adanya kenaikan nilai kekerasan sebelum dan sesudah perlakuan panas T6 (lihat Tabel 4).

Tabel 4. Hasil uji kekerasan paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$

Nama	Kekerasan (HV)
Asli	54
Solid solution 530 ^{0}C dan *Quenching* dimedia air es	75
Temperatur 140 ^{0}C	82
Temperatur 170 ^{0}C	87
Temperatur 200 ^{0}C	94

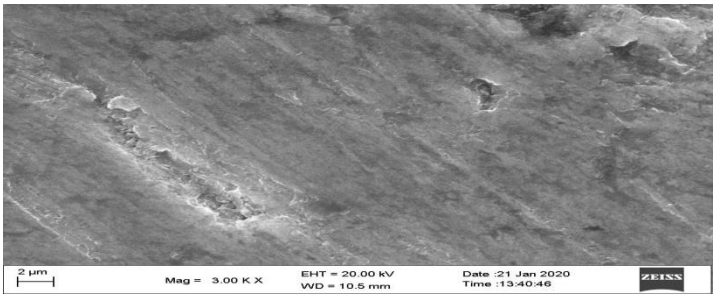


Gambar 2. Hubungan nilai kekerasan terhadap kondisi uji pada paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ 1).as cast, 2). *Solid solution*, 3). *Artificially age* 140 ^{0}C, 4). *Artificially age* 170 ^{0}C, 5). *Artificially age* 200 ^{0}C

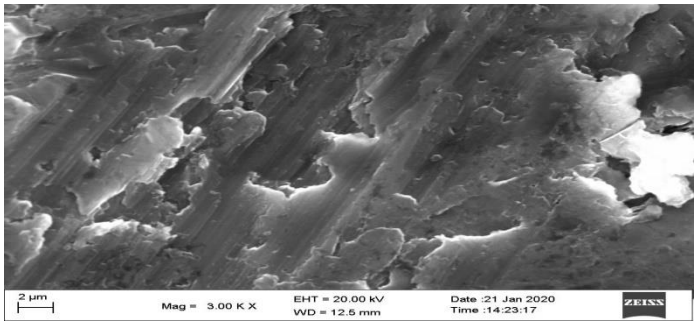
Sampel paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ sebelum perlakuan panas T6 nilai kekerasannya (as cast) 54 HV(Tabel 2). Setelah diberi perlakuan panas *solid solution* pada 530 ^{0}C, selama 1 jam kemudian di *quenching* media air es nilai kekerasan adalah 75 HV. Setelah proses *artificially age* pada 140, 170, dan 200 ^{0}C waktu tahan 1 jam terjadi kenaikan nilai kekerasan yang signifikan yaitu 82–94 HV. Hal ini disebabkan pada paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ telah terbentuk fasa Mg_2Si yang menyebar merata baik di batas butir maupun di matriknya fasa α-Al. Meningkatnya kekerasan tersebut disebabkan karena fasa Mg_2Si memasuki tempat diantara atom-atom Aluminium *(lattice kristal)* sehingga susunan atom akan menjadi lebih rapat dan menimbulkan ikatan yang semakin kuat. Gaya yang diperlukan untuk menimbulkan dislokasi semakin besar, yang berarti kekerasan semakin besar. Namun paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ mempunyai kekerasan harga maksimum, apabila telah melebihi batas kelarutannya, tetapi fasa Mg_2Si yang terbentuk akan memperlemah ikatan antar atom. Sehingga gaya yang diperlukan untuk mendeformasi/merusak akan semakin kecil, yang berarti menurunkan kekerasan.[9]

3. Analisa hasil pengamatan struktur mikro

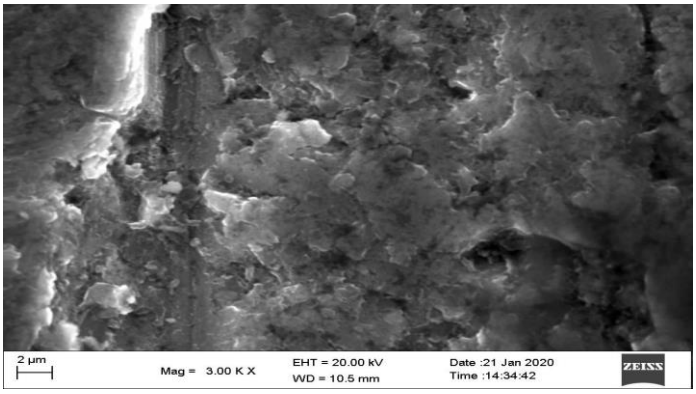
Hasil pengamatan morfologi permukaan dengan SEM-EDX dilihat pada Gambar 3, 4,dan 5. Dari Gambar 3, paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ menunjukkan bahwa semakin besar temperatur pemanasan maka bintik bintik putih akan semakin besar dan menyebar merata. Dengan adanya Mg yang membentuk senyawa $MgSi_2$ yang tersebar merata maka akan menghambat terjadinya *dislokasi* bila ada gaya dari luar, atau dengan kata lain gaya yang diperlukan untuk mendeformasi/merusak akan semakin besar, yang berarti kekerasan akan semakin besar. Nilai kekerasan, pada kondisi perlakuan panas T6 selalu lebih besar dari pada kondisi *as-cast.* Hal ini disebabkan karena jumlah presipitat sebagai fasa Mg_2Si yang terlarut dalam paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ akan semakin besar karena kemampuan untuk mengandung presipitat sebagai fasa Mg_2Si meningkat setelah diberi perlakuan panas.Disamping itu juga disebabkan karena, dengan adanya perlakuan panas T6 maka bentuk butiran berubah dari bentuk bulat menjadi lonjong. Bentuk butiran yang lonjong menyebabkan gaya yang diperlukan untuk mendeformasi akan semakin besar dibandingkan dengan bentuk butiran yang bulat.[10]



Gambar 3. Mikrograf dari paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$, Penuaan buatan temperatur 140 ^{0}C, pembesaran 3000X



Gambar 4. Mikrograf dari paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$, Penuaan buatan temperatur 170 ^{0}C, pembesaran 3000X



Gambar 5. Mikrograf dari paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$, Penuaan buatan temperatur 200 ^{0}C, pembesaran 3000X

Dari Gambar 3 -5, menunjukkan bahwa mikrograf dari paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$, setelah penuaan bantuan dengan variasi temperature 140 ^{0}C, 170 ^{0}C, dan 200 ^{0}C, waktu 1 jam. Terlihat semuanya berbentuk *equaxial* pada kondisi temperature 140 ^{0}C, 170 ^{0}C, dan 200 ^{0}C serta waktu 1 jam. Butir hasil penuaan buatan menunjukkan *elongated grain*. Berubah bentuk butir setelah penuaan buatan ini akibat deformasi sehingga 200 ^{0}C mengubah bentuk butiran bahan paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$. Hal ini juga akan berdampak pada sifat mekanik yaitu kekerasan yang dihasilkan.

KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan dan analisa, maka disimpulkan bahwa setelah proses T6 mulai *solid solution treatment*, *quenching* dan variasi *holding time artificially aging* pada paduan

$Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$ mengakibatkan terjadinya rekristalisasi dan pertumbuhan butir yang terbukti dengan naiknya regangan mikro kisi dan ukuran kristalit dari fasa α-Al pada bidang indeks Miller (111), (200), (220), dan (311) waktu 1 jam, serta turunnya kerapatan dislokasi. Nilai kekerasan meningkat seiring dengan bertambahnya temperatur penuaan buatan. Hal ini disebabkan karena bergabungnya presipitat sebagai fase dua Mg_2Si menjadi partikel berukuran yang lebih kecil yang mengakibatkan penghalang pergerakan dislokasi menjadi semakin kuat, sehingga sifat mekanik meningkat. Berubahnya bentuk butir setelah penuaan buatan ini akibat deformasi sehingga mengubah bentuk butiran bahan paduan $Al_{97,11}Mg_{1,52}Si_{0,86}Zn_{0,51}$.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih disampaikan kepada Rektor Universitas Kristen Indonesia yang telah mendanai penelitian dan *Internasional Conferensi Chemical Sceince and Technology (* ICCST)-2020 serta ke jurnal nasional terakreditasi (Sinta) ini.

REFERENSI

1. Surdia, T., 1987. “Pengetahuan Bahan Teknik,” Jakarta, Pradnya Paramit
2. Callister Jr., William. D., 1994, “Material Science And Enginering,” 3rd edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey/
3. Smallman R. E, Bishop R. J dan Djaprie, Sriati, 2000,”Metalurgi Fisik Modern dan Rekayasa Material”, Erlangga, Jakarta
4. Hawas, N.M.,2013, “Effect of Ageing Time on Adhesive Wear of AL Alloy AA6061-T6,” Journal Kerbala University, Vol. 11 No.4.
5. Singh, G., Kumar., Singh, A., 2013, “Influence of Current on Microstructure and Hardness of Butt Welding Aluminium AA 6082 Using GTAW Process,” International Journal of Research in Mechanical Engineering & Technology :1- 4
6. Aryanto, P. Marwoto, T. Sudiro, M. D. Birowosuto, Sugianto, and Sulhadi.,2016 “Structure evolution of zinc oxide thin films deposited by unbalance DC magnetron sputtering.” in. AIP Conference Proceedings, vol. 1729, pp. 020039(1-5).
7. H.Demir dan S.Gunduz.2009, The effecf of aging on machinability of 6061 Al alloy, Materials and design, 30-5, 1480-1483.
8. H.H.Kim, S.H.Cho dan C.G.Kang.2008, Evalution of microstructure and mechanical properties by using nano-micro-indenfation and nanoscratch during aging treatment of rheo-forget Al-6061 alloy, Materials Science and Engineering, A485-1, 272-281.
9. Suhariyanto,2004, Peningkatan Sifat Mekanik Paduan Aluminium A 356.0 dengan penambahan TiC dan Perlakuan Panas T6, *SAINTEK Jurnal Ilmiah Teknik dan Rekyasa*, Vol.8, No.2 ISSN 1411-5662.
10. John E.Hatch,1995, *Aluminium Properties and Physical Metallurgy. American Sociaty for Metals*, Ohio.