

KARAKTETRISASI SIFAT MEKANIK DAN PEMBENTUKAN FASA PRESIPITAT PADA ALUMINIUM ALLOY 2024-T₈₁ AKIBAT PERLAKUAN PENUAAN

Rochman R¹, Hariyati P¹, Purbo C¹

¹ Staf Pengajar - Jurusan Teknik Material dan Metalurgi - Fakultas Teknologi Industri ITS

Keywords :

2024-T₈₁
Aging
Microstructure

Abstract :

Aluminum Alloy Al 2024-T₈₁ has been applied widely at otomotif and aerospace industry, because its high strenght and ductility, also have property that could be improved and repaired with aging process. However to obtain best property, aging process requires a correct timesharing. Aluminum alloy Al 2024-T3 will be given artificial aging treatment at $\pm 210^{\circ}\text{C}$ temperature, with 5,6,7, and 8 hours various time. The various aging time will cause the various phase transformation that have inflluent at mechanical property characterization. Transformation of phase and its influence to mechanical property Characterization will analyzed using XRD characterization analysis and metallografi, tensile test, and hardness test.

From this research known that the microstructure from 5, 6, 7, and 8 hours aging process is a that is alumunium matrix with copper in solid solution, θ' , and θ phase, both is phase with CuAl_2 chemical formula. The highest tensile strength and yield strength owned by specimen with 6 hours aging process, while the highest hardness owned by specimen with 8 hours aging process.

PENDAHULUAN

Dewasa ini paduan aluminium Al 2024-T₈₁ telah digunakan secara luas terutama pada industri kedirgantaraan (lapisan kulit luar pesawat Hercules C-130), bagian-bagian rudal, industri baut dan mur serta industri otomotif lainnya. Hal ini dikarenakan paduan ini memiliki keunggulan pada perbandingan kekuatan yang dihasilkan dengan berat struktur yang lebih tinggi daripada baja, ketahanan leleh yang baik, keuletan serta sifat mampu bentuk yang tinggi. Selain sifat mekanik tersebut, sifat yang amat disukai pada paduan ini adalah sifat mampu dikuatkan dengan penuaan (*age-hardening*).

Pada umumnya penuaan yang dialami paduan ini adalah penuaan alami, dimana setelah mengalami proses pembentukan akhir, paduan tidak lagi diberi perlakuan panas, cukup hanya diletakkan pada temperatur kamar. Disini selain memerlukan waktu yang relatif lama, pada penuaan alami kekuatan maksimum sulit dicapai. Untuk mempersingkat waktu penuaan dan kekuatan yang dihasilkan maksimum, maka dilakukan perlakuan *artificial aging*. Akan tetapi agar diperoleh material dengan kekuatan maksimum, proses penuaan memerlukan suatu perhitungan waktu yang tepat.

Paduan aluminium Al 2024-T₈₁ pada dasarnya adalah paduan Al-Cu-Mg dengan kadar Al 90.7- 94.7%, Cu 3.8-4.9%, dan Mg 1.2-1.8%. Proses penuaan yang akan dilakukan adalah dengan memanaskan spesimen sampai temperatur $\pm 210^{\circ}\text{C}$ dengan variasi waktu 5 jam, 6 jam, 7 jam, dan 8 jam. Karena dilakukan variasi waktu penuaan ini, maka

akan terjadi perubahan fasa, struktur mikro dan perubahan sifat mekanik. Perubahan struktur mikro akan diamati dengan metalografi, transformasi fasa akan diketahui setelah dilakukan metode difraksi sinar-x (*X-ray diffraction/XRD*). Kemudian akan dikaji lebih lanjut tentang transformasi fasa, perubahan struktur mikro dan perubahan sifat mekanik yang terjadi, tiap variasi waktu, agar diperoleh suatu variasi waktu penuaan yang menghasilkan suatu material dengan sifat yang maksimum.

TINJAUAN PUSTAKA

Aluminium merupakan salah satu logam yang terdapat paling banyak di bumi, penggunaannya pun meluas, mulai dari industri otomotif sampai kesehatan, dan logam ini amat berperan dalam perkembangan dunia penerbangan. Sifat-sifat penting yang menyebabkan aluminium banyak dipakai adalah ringan, tahan korosi, penghantar listrik dan panas yang baik. Berat jenisnya hanya $2,7 \text{ gr/cm}^3$ (kira-kira sepertiga berat jenis baja) karenanya aluminium banyak dipakai pada bagian-bagian pesawat terbang, kendaraan bermotor dan alat transportasi lainnya. Alat transportasi harus dibuat seringan mungkin sehingga akan dapat mengangkut beban lebih banyak. Aluminium berstruktur kristal kubus pemusatan sisi (FCC) dengan jari-jari atom sebesar 0,1431 nm. Sifat penghantar listriknya nomor tiga setelah perak dan tembaga, kira-kira 62 % dari konduktivitas tembaga. Penghantaran panasnya juga baik, karenanya banyak

dipakai untuk alat pemindahan panas (*heat exchanger*, radiator dll) dan alat masak di rumah tangga [Avner, 1982].

Sifat lain yang sangat menguntungkan pada aluminium adalah sangat mudah difabrikasi. Dapat dituang dengan cara penuangan apapun dan dapat di-forming dengan berbagai cara, seperti *rolling*, *forging*, *drawing*, dll menjadi bentuk yang cukup rumit sekalipun. Aluminium juga tahan korosi, tetapi sifat tahan korosi dari aluminium ini berlainan dengan logam-logam tahan korosi lainnya misalnya tembaga. Tembaga tahan korosi karena memang sukar bereaksi dengan air/udara atau zat-zat sekitarnya. Sedangkan aluminium justru sangat mudah bereaksi dengan oksigen dari udara. Reaksi ini menghasilkan aluminium oksida (Al_2O_3) yang melekat erat dan rapat pada permukaan aluminium. Lapisan oksida inilah yang sebenarnya tahan korosi, yang melindungi bagian dalam dari logam aluminium terhadap berbagai macam media yang korosif. Tetapi dengan adanya aluminium oksida yang menempel pada permukaan aluminium, selain menyebabkan aluminium itu tahan korosi, juga menimbulkan kerugian yaitu aluminium menjadi sukar dilas atau disolder

Dalam keadaan murni aluminium sangat lunak, *ductile* dan tidak begitu kuat. Aluminium murni memiliki kekuatan tegangan 49 MPa dan 700 Mpa. Aluminium memiliki warna perak mengkilap, warnanya berubah menjadi kelabu muda akibat pembentukan oksida apabila diletakkan di udara. Oksida ini sangat ulet dan tahan api. Dalam keadaan murni, temperatur leleh aluminium $660^\circ C$, untuk temperatur lebur paduannya antara $520^\circ C$ sampai $660^\circ C$. Juga tidak baik untuk penuangan dan sukar di-*machining*. Karenanya aluminium murni jarang sekali dipakai. Untuk memperbaiki keadaan ini ke dalam aluminium sering ditambahkan tembaga, mangan, magnesium silisium atau seng yaitu untuk mendapatkan kenaikan kekuatan dan kekerasan serta beberapa kebaikan lainnya [Sanders, 2001]. Penguatan aluminium akan optimal apabila dipadukan dengan unsur lain dan diberi perlakuan panas, yang akan menyebabkan terbentuknya presipitat yang kecil (submikro) namun kuat, yang akan menghalangi terjadinya dislokasi. Adapun sifat-sifat aluminium adalah seperti ditunjukkan oleh Tabel 1.

Paduan aluminium 2024 adalah suatu paduan aluminium dengan tembaga dan magnesium sebagai paduan utamanya, dengan kadar tiap unsur Al 90.7–94.7%, Cu 3.8–4.9%, dan Mg 1.2–1.8%. Paduan ini banyak digunakan untuk aplikasi-aplikasi yang memerlukan ketahanan leleh yang tinggi serta perbandingan kekuatan dan berat yang baik. Paduan ini memiliki *machinability* yang cukup baik, umumnya paduan ini dibentuk setelah di anil dan biasanya dilanjutkan dengan pemberian perlakuan panas. Pada paduan ini, partikel presipitat penguat

yang terbentuk jika mengalami proses penuaan adalah Al_2CuMg [Smith, 1981].

Kode T_3 menunjukkan keadaan fisik material tersebut, juga menunjukkan pemrosesan suatu paduan aluminium. urutan perlakuan pada kondisi T_3 adalah sebagai berikut :

1. *solution treatment*, yaitu memanaskan sampai temperatur fasa tunggal ($\pm 500^\circ C$).
 2. *quenching*, yaitu melakukan pendinginan cepat (dicelup) sampai temperatur kamar.
 3. *cold work*, dalam hal ini pengerjaan dingin yang dilakukan adalah *strain hardening* (*cold roll*).
- atau secara ringkas proses perlakuan untuk kondisi T_3 adalah *solution treatment plus cold work*.

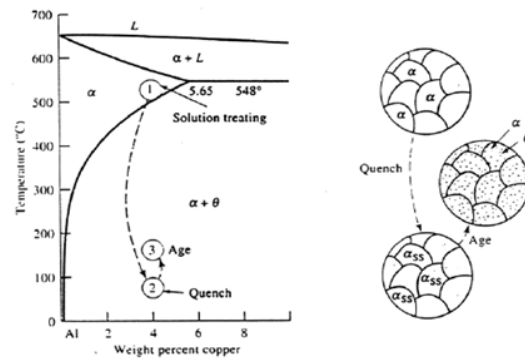
Kode T_{81} menunjukkan keadaan fisik material tersebut, juga menunjukkan pemrosesan suatu paduan aluminium. Sesuai pada Gambar 1, urutan perlakuan pada kondisi T_{81} adalah sebagai berikut :

1. *solution treatment*, yaitu memanaskan sampai temperatur fasa tunggal ($\pm 500^\circ C$).
2. *quenching*, yaitu melakukan pendinginan cepat (dicelup) sampai temperatur kamar.
3. *cold work*, dalam hal ini pengerjaan dingin yang dilakukan adalah *strain hardening* (*cold roll*).
4. *artificial aging*.

atau secara ringkas proses perlakuan untuk kondisi T_{81} adalah *solution treatment, cold work* dan *artificial aging*.

Tabel 1 Karakteristik aluminium

Karakteristik aluminium	
Nomor atom	13
Spesifik gravity	2,7 gr/cm ³
Temperatur leleh	660°C
Koefisien ekspansi linier	0,002081/°C
Modulus elastisitas	2386,67 N/mm ²
Modulus elastisitas geser	795,56 N/mm ²
Poisson ratio	0,33
Konduktivitas panas	200W/mK
Konduktivitas listrik	30 m/Ωm
Densitas	2,70 g.cm ⁻³
Brinnel hardness	245 HB



Gambar 1. Skema tiga langkah *presipitation hardening* dan struktur mikro yang dihasilkan

Precipitation hardening (penguatan presipitasi) adalah suatu proses dimana paduan aluminium atau baja diberi perlakuan panas. Tujuan dari proses ini adalah untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasan material tersebut. Proses ini terdiri dari dua langkah, yakni *solution treatment* dan penuaan. Pada proses *solution treatment*, paduan dipanaskan sampai temperatur diantara garis *solvus* dan *liquidus* dan ditahan sampai terbentuk larutan padat yang homogen [Smith, 1993]. Proses pemanasan ini menyebabkan elemen paduan akan larut ke dalam larutan padat, yang akan menyebabkan elemen tersebut tidak berkesempatan berdifusi keluar apabila paduan di-*quenching*, dengan demikian larutan padat yang homogen terbentuk. Proses setelah penahanan temperatur adalah *quenching*. Tujuan proses ini adalah menjaga agar paduan tetap dalam keadaan satu fasa, dengan cara menurunkan temperatur dengan cepat.

Penuaan adalah suatu proses dimana paduan ditahan pada suatu temperatur tertentu, di bawah garis *solvus*, selama beberapa waktu tertentu. Proses penuaan terdapat dua macam, yakni *natural aging* dan *artificial aging*. *Natural aging* dilakukan dengan cara membiarkan paduan lewat jenuh hasil proses *quenching* pada temperatur kamar selama waktu tertentu. Berbeda dengan *natural aging*, pada proses *artificial aging*, paduan lewat jenuh hasil proses *quenching* dipanaskan kembali sampai temperatur tertentu dibawah garis *solvus*, dan ditahan sampai beberapa waktu tertentu. Pemilihan temperatur serta lama waktu proses penuaan amat berpengaruh pada hasil penguatan.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian menggunakan material uji berupa plat paduan aluminium Al 2024-T₃ dengan komposisi kimia seperti ditunjukkan Tabel 2. Spesimen dibentuk sesuai dengan standard JIS Z 2201 kemudian dilakukan proses penuaan. Temperatur penuaan tiap spesimen sama tetapi dengan waktu yang berbeda, yaitu T = 210° C dengan waktu 5, 6, 7 dan 8 jam. Proses termal dilakukan dalam *furnace* tanpa vakum pada kondisi ambien.

Tabel 2. Komposisi kimia Al 2024-T₃

Jenis paduan	Komposisi (%)
Silicon (Si)	0.50
Besi (Fe)	0.50
Tembaga (Cu)	3.8 - 4.9
Mangan (Mn)	0.3 - 0.9
Magnesium (Mg)	1.2 - 1.8
Cromium (Cr)	0.10
Seng (Zn)	0.25
Titanium (Ti)	0.15
Aluminium (Al)	Balance

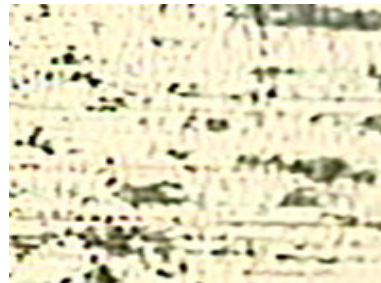
Karakterisasi sifat mekanik yang dilakukan adalah pengujian tarik dan pengujian kekerasan. Uji tarik dilakukan dengan menggunakan standard

JIS Z 2201(No.5 *Test Piece*). Uji ini bertujuan untuk mengetahui kekuatan tarik (σ_u) dan kekuatan luluh (σ_y) spesimen tiap variasi waktu penuaan. Uji tarik dilakukan pada spesimen sebelum dan sesudah proses penuaan. Pengujian kekerasan yang dilakukan pada penelitian ini adalah uji kekerasan Vickers, dengan beban 2 kg. Dari uji kekerasan ini diperoleh data berupa panjang diagonal indentasi, kemudian dicocokkan pada tabel konversi, sehingga diperoleh nilai kekerasan (VHN). Pengujian dilakukan pada material awal dan yang telah mengalami proses penuaan. Sebelum dilakukan pengujian kekerasan, permukaan spesimen harus dalam keadaan halus. Untuk mendapatkan permukaan yang halus, permukaan spesimen digosok sampai *grid* 2000. Sedangkan pengujian difraksi sinar-x dan pengamatan metalografi dilakukan untuk mengidentifikasi fasa dan struktur mikro paduan akibat variasi *aging* yang dilakukan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

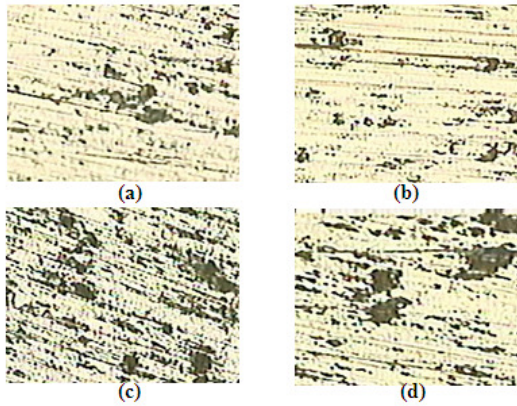
a. Hasil Pengujian Struktur mikro

Pengamatan mikroskop optik dilakukan untuk memperoleh informasi struktur mikro yang ada pada material awal maupun yang telah mengalami perlakuan penuaan. Pada Gambar 2 menunjukkan struktur mikro material aluminium yang belum mengalami perlakuan panas. Pembesaran yang diambil adalah 200 x dengan etsa keller's reagent. Hasil metalografi menunjukkan adanya fasa alpha dan fasa θ .



Gambar 2. Struktur mikro material awal menunjukkan adanya daerah gelap yang merupakan daerah fasa kedua (θ'), dan daerah terang yang merupakan larutan padat alpha, pembesaran 200 x etsa keller's reagent

Sedangkan Gambar 3 menunjukkan perubahan struktur mikro Al-2024 setelah perlakuan termal *ageing* dengan variasi lama pemanasan. Dari pengamatan struktur mikro, baik pada spesimen *as received* maupun spesimen dengan berbagai variasi waktu penuaan, maka akan terlihat adanya daerah gelap, butiran berupa titik-titik hitam dan daerah terang. Menurut hasil penelitian Chepko (2000), daerah berwarna terang merupakan daerah fasa α , daerah berwarna gelap merupakan daerah fasa θ , sedangkan butiran berwarna gelap merupakan presipitat θ' .



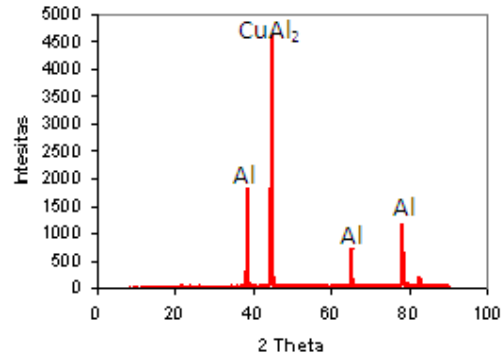
Gambar 3. Struktur mikro paduan Al 2024-T₈₁ setelah mengalami proses penuaan dengan variasi lama pemanasan (a) 5 jam (b) 6 jam, (c) selama 7 jam dan (d) 8 jam dengan spesifikasi pengambilan gambar pembesaran 200 x etsa keller's reagent

b. Hasil Pengujian Difraksi Sinar-X

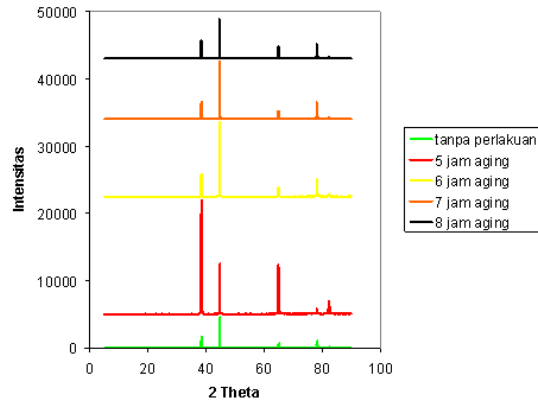
Pengujian difraksi sinar-x dilakukan pada paduan aluminium Al 2024-T₃ dan Al 2024-T₈₁ dengan berbagai waktu penuaan. Hasil pengujian XRD untuk Al 2024-T₃ awal sebelum perlakuan panas ditunjukkan pada Gambar 4. Hasil identifikasi fasa menunjukkan adanya fasa aluminium dan fasa intermetalik CuAl₂.

Berdasarkan hasil pengujian XRD pada aluminium Al 2024-T₃ dan Al 2024-T₈₁ dengan berbagai variasi waktu penuaan seperti ditunjukkan pada Gambar 5 terlihat pola difraksinya hampir sama dengan aluminium *as-received*, namun terdapat indikasi perubahan intensitas. Hasil identifikasi fasa akibat variasi perlakuan *ageing* menunjukkan masih adanya fasa aluminium dan fasa intermetalik CuAl₂. Hal ini mengindikasikan bahwa spesimen awal yang digunakan dalam proses fabrikasinya telah mengalami perlakuan panas sehingga fasa intermetalik telah terbentuk di awal. Namun identifikasi terhadap intensitas dan luasan kurva menunjukkan perubahan nilai akibat perlakuan panas *ageing*. Hal ini menunjukkan bahwa telah terjadi perubahan kuantitas fasa-fasa pembentuknya akibat perlakuan-perlakuan sebelumnya.

Jika memakai fasa CuAl₂ sebagai acuan, berdasarkan Gambar 5 terlihat bahwa pada setiap perlakuan memiliki tinggi puncak yang berbeda-beda. Spesimen dengan waktu penuaan 6 jam memiliki puncak tertinggi dibandingkan dengan perlakuan yang lain kemudian diikuti spesimen 5, 7, dan 8 jam penuaan, dan spesimen tanpa proses penuaan dengan puncak paling rendah.



Gambar 4. Kurva hasil pengujian XRD pada paduan aluminium Al 2024-T₃ (Spesimen *As received*)



Gambar 5. Kurva hasil pengujian difraksi sinar-x pada paduan aluminium Al 2024-T₈₁ dengan variasi perlakuan waktu penuaan

Pada dasarnya, tinggi puncak yang berarti juga tinggi intensitas berpengaruh terhadap komposisi fasa yang terbentuk. Semakin tinggi intensitas, maka komposisi fasa juga semakin banyak. Pada Gambar 5 terlihat spesimen dengan penuaan 6 jam memiliki puncak dengan intensitas tertinggi sehingga komposisi CuAl₂ yang terkandung juga paling banyak dibandingkan dengan perlakuan yang lain. Selanjutnya spesimen dengan 7 jam penuaan yang memiliki komposisi CuAl₂ terbanyak setelah spesimen tanpa perlakuan, kemudian diikuti spesimen dengan 8 dan spesimen tanpa perlakuan penuaan, terakhir yang memiliki komposisi CuAl₂ paling sedikit adalah spesimen dengan 5 jam penuaan.

Tabel 3. Hasil analisis *single profile fitting* fasa CuAl₂ pada puncak tertinggi (Caglioti, 1958)

Waktu Penuaan (jam)	2θ (°)	Integrated intensity	Intensitas	FWHM
<i>As received</i>	44.720	37200.20	4138	0.140
	44.713	41949.00	11325	0.185
5	44.707	67081.00	7097	0.185
6	44.259	54824.10	8932	0.192
7	44.684	39902.10	6180	0.202
8				

Dari hasil pengujian XRD dapat pula ditentukan besar ukuran kristal (*crystal size*) dengan menggunakan analisa lebar setengah puncak (FWHM). FWHM didapatkan dari pengambilan sudut 2 θ pada intensitas tertinggi yang merupakan hasil dari *profile fitting*. Analisis puncak dengan metode *Profile Fitting* menghasilkan parameter keluaran *Integrated intensity* dan lebar puncak (FWHM). Kedua parameter tersebut masing-masing digunakan sebagai data pembandingan aproksimasi pembentukan CuAl₂ karena transformasi fasa yang terjadi serta untuk analisis perubahan struktur kristal. Tabel 3 merupakan data profil puncak fasa CuAl₂ pada aluminium Al 2024-T₃ dan Al 2024-T₈₁ dengan berbagai variasi waktu penuaan. Variasi waktu penuaan mengakibatkan terjadinya variasi intensitas profil, ini terlihat jika dibandingkan dengan spesimen tanpa perlakuan, nilai intensitas untuk spesimen dengan penuaan 5 jam menunjukkan peningkatan yang signifikan, kenaikan intensitas kembali terjadi dari spesimen dengan penuaan 6 jam, setelah itu terjadi penurunan intensitas profil. Nilai FWHM pada setiap perlakuan juga mengalami perubahan. FWHM terbesar terjadi pada spesimen dengan lama 8 jam penuaan dengan nilai 0.2015 sedangkan FWHM terkecil terjadi pada spesimen tanpa perlakuan dengan nilai 0.1403. Variasi lama waktu penuaan telah mengakibatkan perubahan lebar puncak yang mengindikasikan adanya perubahan ukuran kristal. Purwaningsih (2005) menjelaskan bahwa dengan perubahan besarnya FWHM, maka ukuran kristal juga cenderung berubah.

Hasil analisis data difraksi untuk spesimen aluminium Al 2024-T₃ dan Al 2024-T₈₁ dengan berbagai variasi waktu penuaan (5, 6, 7, 8 jam) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3. Analisis profil menunjukkan perubahan *integrated intensity*. *Integrated intensity* terbesar pada material dengan variasi waktu penuaan 5 jam.

c. Hasil Pengujian Tarik

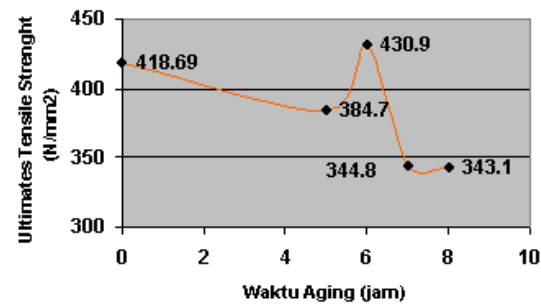
Pengujian tarik dilakukan untuk memperoleh informasi yang lebih detail tentang *UTS*, *Yield Strength* dan *Elongation* yang ada pada material awal maupun yang telah mengalami perlakuan penuaan. Pengujian tarik dengan *universal tensile machine* memberikan hasil seperti ditunjukkan Tabel 4.

Data hasil pengujian tarik menunjukkan bahwa variasi waktu penuaan memberikan suatu variasi kekuatan tarik pada paduan Al 2024-T₈₁ secara keseluruhan (Gambar 6). Sebagai pembandingan material awal Al 2024-T₈₁ mempunyai kekuatan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*) sebesar 418,69 N/mm², kekuatan luluh (*yield strength*) sebesar 330,2 N/mm² dan *elongation* sebesar 19,5%. Pada Gambar 6 ditampilkan grafik hubungan waktu penuaan terhadap kekuatan tarik maksimum dari spesimen setelah proses penuaan pada berbagai

variasi waktu penuaan (5, 6, 7, dan 8 jam). Terlihat bahwa spesimen yang memiliki kekuatan tarik maksimum (UTS) tertinggi adalah Al 2024-T₈₁ dengan variasi waktu penuaan selama 6 jam yaitu sebesar 430,9 N/mm² dan kekuatan tarik maksimum terendah adalah spesimen dengan variasi waktu penuaan 8 jam yaitu sebesar 343,1 N/mm².

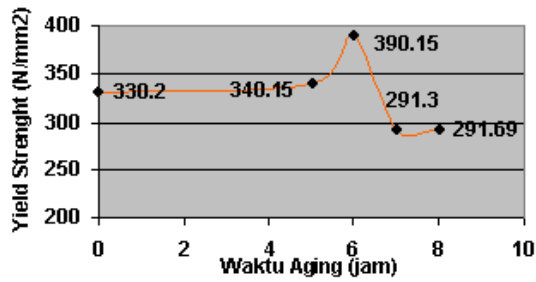
Tabel 4. Pengaruh waktu *aging* terhadap kekuatan tarik paduan Al 2024-T₈₁

No	Waktu Penuaan (jam)	UTS (N/mm ²)	Yield Strength (N/mm ²)	Elongation (%)
1	As received	418,69	330,2	19,5
2	5	384,7	340,15	16
3	6	430,9	390,15	14
4	7	344,8	291,3	10
5	8	343,1	291,69	10,8



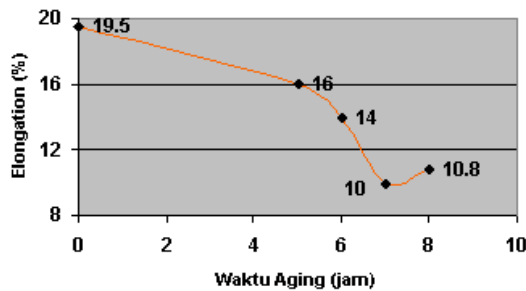
Gambar 6. Kurva pengaruh waktu tahan terhadap kekuatan tarik maksimum (UTS) pada paduan Al 2024-T₈₁

Beberapa hal menarik terlihat dari kurva tersebut adalah bahwa terjadi penurunan kekuatan tarik maksimum pada spesimen Al 2024-T₈₁ dengan waktu penuaan 4 jam dibandingkan dengan spesimen awal Al 2024 T₃ yakni dari 418,69 N/mm² menjadi 384,7 N/mm² untuk waktu penuaan 5 jam. Kenaikan kekuatan tarik maksimum paling besar terjadi pada spesimen dengan waktu penuaan 6 jam yakni menjadi sebesar 430,9 N/mm² ini merupakan kekuatan paling besar dari kelima spesimen. Fenomena ini berbeda pada spesimen dengan waktu penuaan 7 jam dimana pada kurva terlihat terjadinya penurunan drastis kekuatan tarik menjadi 344,8 N/mm² kemudian terjadi penurunan kembali kekuatan tarik walau sedikit, untuk spesimen dengan waktu penuaan 8 jam, yakni menjadi 343,1 N/mm². Dari Gambar 7 khususnya pada waktu 6 jam dapat dilihat bahwa kekuatan tarik maksimum spesimen Al 2024-T₈₁ setelah proses penuaan mengalami peningkatan yang cukup signifikan. Namun demikian fenomena ini tidaklah tepat digunakan sebagai acuan untuk menentukan waktu penuaan yang paling tepat tanpa memperhatikan kekuatan luluh (*yield strength*) dan *elongation* yang diperoleh.



Gambar 7. Kurva pengaruh waktu penuaan terhadap kekuatan luluh pada paduan Al 2024-T₈₁

Pada Gambar 7 ditampilkan grafik hubungan variasi waktu penuaan terhadap kekuatan luluh dari spesimen Al 2024-T₈₁. Pada kurva terlihat bahwa kekuatan luluh tertinggi dimiliki spesimen dengan variasi waktu penuaan 6 jam yaitu sebesar 390,15 N/mm². Kekuatan *yield* terendah sebesar 291,3 N/mm² terletak pada spesimen dengan variasi waktu penuaan 7 jam. Kenaikan kekuatan luluh paling besar terjadi pada perubahan waktu penuaan dari 5 jam yakni sebesar 340,15 N/mm² menjadi 390,15 N/mm² untuk variasi waktu 6 jam. Setelah 6 jam, terjadi penurunan drastis kekuatan luluh spesimen yakni menjadi 291,3 N/mm². Untuk variasi waktu penuaan 8 jam, terjadi sedikit peningkatan kekuatan luluh menjadi 291,69 N/mm².



Gambar 8. Kurva pengaruh waktu *aging* terhadap *elongation* pada paduan aluminium Al 2024-T₈₁

Pada Gambar 8 memperlihatkan grafik hubungan waktu penuaan terhadap *elongation* dari spesimen untuk berbagai variasi waktu (5, 6, 7, dan 8 jam), terlihat dengan semakin bertambahnya waktu penuaan, maka keuletan spesimen akan menurun. *Elongation* terbesar dimiliki oleh spesimen tanpa perlakuan yaitu sebesar 19,5 %. Sedangkan *elongation* terendah dimiliki oleh spesimen dengan variasi waktu penuaan 7 jam, yakni sebesar 10%. Hal menarik pada kurva di atas yaitu pada spesimen dengan variasi waktu 8 jam, terlihat adanya sedikit kenaikan *elongation* yang tidak terlalu signifikan daripada spesimen dengan waktu penuaan 7 jam yakni dari 10% untuk spesimen dengan variasi waktu 7 jam menjadi 10,8% untuk spesimen dengan variasi waktu 8 jam. Hal ini berbeda dengan spesimen lain untuk tiap variasi waktu, yang

menunjukkan kecenderungan penurunan keuletan. Fenomena menarik lainnya yaitu spesimen dengan kekuatan tarik dan kekuatan *yield* tertinggi, yakni spesimen dengan variasi waktu penuaan 6 jam, memiliki keuletan lebih rendah daripada spesimen tanpa perlakuan dan spesimen dengan waktu penuaan 5 jam. Meskipun demikian, spesimen ini masih memiliki keuletan lebih tinggi daripada spesimen untuk variasi waktu 7 dan 8 jam.

Untuk menjelaskan fenomena-fenomena yang terdapat pada kekuatan tarik maksimum, kekuatan luluh beserta *elongation* paduan Al 2024-T₈₁, sebagaimana teori bila paduan Al 2024-T₃, dengan adanya proses penuaan menjadi *grade* T₈₁, akan mengalami suatu proses *precipitation hardening*. Banyak tidaknya presipitat yang terbentuk, merata atau tidaknya penyebaran presipitat, serta apakah spesimen mengalami *underaged*, *criticalaged* atau *overaged* inilah yang akan mempengaruhi besarnya kekuatan tarik maksimum (σ_{UTS}), kekuatan luluh (σ_{yield}) dan *elongation* (ϵ) dari spesimen Al 2024-T₈₁ [Askeland, 1999].

Dari pengamatan struktur mikro, baik pada spesimen *as received* maupun spesimen dengan berbagai variasi waktu penuaan, maka akan terlihat adanya daerah gelap, butiran berupa titik-titik hitam dan daerah terang. Menurut Zainul Huda (2008), daerah berwarna terang merupakan daerah fasa α , daerah berwarna gelap merupakan daerah fasa θ , sedangkan butiran berwarna gelap merupakan presipitat θ' . Apabila hasil pengamatan struktur mikro dihubungkan dengan pengujian tarik, maka akan didapatkan suatu hubungan antara fasa yang terbentuk dengan kekuatan tarik (UTS) material tersebut. Semakin banyak butiran presipitat fasa θ' , maka kekuatan tarik akan semakin tinggi, seperti yang terlihat pada spesimen dengan lama waktu penuaan 6 jam, dimana memiliki struktur mikro berupa butiran presipitat θ' yang banyak dan menyebar merata, memiliki kekuatan tarik (UTS) terbesar, yakni 430,9 N/mm². Sedangkan bila mengkorelasikan hasil pengujian tarik dengan variasi waktu penuaan, maka dapat diestimasi hasil uji tarik dimana besarnya kekuatan tarik maksimum, kekuatan luluh akan meningkat dan *elongation* akan menurun bila terjadi penambahan waktu penuaan, akan tetapi hal ini terjadi hanya sampai waktu penuaan 6 jam, setelah 6 jam, baik kekuatan tarik, kekuatan luluh maupun *elongation*, akan menurun drastis.

Pengujian difraksi sinar-x pada penelitian ini memegang peranan yang sangat penting. Transformasi fasa akibat perlakuan termal dan variasi laju pendinginan dapat teridentifikasi. Jika fasa CuAl₂ digunakan sebagai acuan, maka dari pengujian XRD pada kelima spesimen didapatkan data yang menyatakan tinggi rendah intensitas yang menunjukkan kuantitas dari fasa tersebut. Karena presipitat θ' memiliki rumus kimia CuAl₂, maka dapat ditarik suatu hubungan bahwa, semakin

banyak presipitat yang terbentuk, semakin tinggi pula kekuatan tarik spesimen.

Fenomena peningkatan sifat mekanik pada spesimen yang mengalami proses *aging* terjadi karena terbentuknya presipitat sering menyebabkan terbentuknya dislokasi pada kisi kristal atom pelarut. Dislokasi bisa terbentuk apabila ukuran atom presipitat berbeda dengan ukuran atom zat pelarut, bila ukuran presipitat lebih kecil, akan menyebabkan terjadinya tegangan tarik, dan bila ukurannya lebih besar, partikel presipitat akan menyebabkan tegangan tekan, dislokasi juga akan menyebabkan suatu medan gaya. Hal ini menyebabkan terjadinya hubungan energi yang saling meniadakan (negatif) antara dislokasi dan presipitat. Masing-masing akan menyebabkan terjadinya tegangan tarik dan tekan atau sebaliknya. Dengan kata lain, dislokasi akan seperti tertarik ke arah presipitat. Sedangkan pada sisi lain, yakni hubungan saling melawan (positif), dislokasi akan dihambat oleh partikel presipitat, sehingga semakin banyak presipitat yang terbentuk, sifat mekanik spesimen, dalam hal ini kekuatan tarik, akan semakin meningkat.

KESIMPULAN

Berdasarkan serangkaian percobaan yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa :

1. UTS dan *yield strength* tertinggi dimiliki spesimen dengan waktu penuaan 6 jam yakni sebesar 430,9 N/mm² dan 390,15 N/mm². Sedangkan yang terendah adalah spesimen dengan waktu penuaan 7 jam yakni sebesar 343,1 N/mm² dan 291,69 N/mm².
2. Teridentifikasi adanya fasa aluminium dan CuAl₂.
3. Dari data hasil percobaan yang telah dilakukan, maka untuk penuaan dengan temperatur 210°C, sebaiknya dilakukan dengan waktu 6 jam.

DAFTAR PUSTAKA

- Askeland, Donald R., 1994, *The Science and Engineering of Materials*, PWS Publishing, Boston.
- Avner, Sidney H, 1982, *Introduction to Physical Metallurgy, Second Edition*, McGraw-Hill International Book Company, Tokyo.
- Caglioti, G., Paoletti, A. & Ricci, F. P., 1958, "Choice of Collimators for A Crystal Spectrometer for Neutron Diffraction", *Nucl. Instrum*, Vol.3, pp. 223-228.
- Chepko,Corin.,Dhanhani,Jaseem.,Figueroa,Carlos.,L andis Codi, 2000, *An Experimental and Analytical Study of the Properties of Precipitation Hardening Aluminum Alloys*, University of the Pacific School of Engineering, USA.

De,Keijser, T.H., Langford, J.I., Mittemeijer, E.J. & Vogels, A.B.P, 1982, "Use of The Voigt Function in A Single-Line Method for The Analysis of X-Ray Diffraction Line Broadening", *J. appl. Cryst*, Vol. 15, pp. 308-314.

Huda, Z., Taib, I., Zaharinie, T., 2008, "Characterization of 2024-T3: An aerospace aluminum alloy", Department of Geology, and Department of Mechanical Engineering, University of Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia.

Mier, Mike, 2004, *HT-Aluminum*, Department of Chemical Engineering and Materials Science University of California, Davis.

Smallman, R.E., and Bishop, R.J. 2006. *Metalurgi Fisik Modern dan Rekayasa Material*, Edisi IV, Erlangga, Jakarta.

Smith, William F.,1981, *Structure and Properties of Engineering Alloys*, McGraw-Hill Inc., New York

Smith, William F.,1993, *Foundations of Materials Science and Engineering*, McGraw-Hill Inc., New York.

Smith, William F., 1996, *Principles of Materials Science And Engineering*, McGraw-Hill Inc., New York.