

PENGARUH PERLAKUAN PANAS T6 TERHADAP KEKERASAN DAN STRUKTURMIKRO PADA PADUAN Al-Si-Mg

Eddy Djatmiko¹ dan Budiarto²

¹Jurusan Teknik Mesin, FT - Universitas Pancasila
Kampus Srengseng Sawah, Jagakarsa, Jakarta 12640

²Pusat Pengembangan Energi Nuklir (PPEN) - BATAN
Jl. Kuningan Barat Mampang Prapatan, Jakarta 12710
e-mail : mesin_jtm-up@telkom.net

ABSTRAK

PENGARUH PERLAKUAN PANAS T6 TERHADAP KEKERASAN DAN STRUKTURMIKRO PADA BAHAN PADUAN Al-Si-Mg. Pertumbuhan industri otomotif di Indonesia, telah berkembang cukup pesat, tahun ini produksi motor roda dua sekitar 6 juta buah. Untuk itu diperlukan komponen produk lokal, seperti *velg*, *gear* dan piston. Untuk memenuhi kebutuhan komponen tersebut, bahan paduan Al-Si-Mg merupakan salah satu paduan aluminium yang cocok dipakai untuk material piston motor. Paduan ini mempunyai kelebihan seperti; ringan, tahan korosi dan warnanya menarik, tetapi sifat mekaniknya belum memenuhi standar JIS H 5201. Oleh karena itu sifat mekaniknya perlu ditingkatkan. Sifat mekanik paduan Al-Si-Mg dapat ditingkatkan dengan beberapa cara, salah satunya adalah dengan perlakuan panas. Pada penelitian ini paduan diberi perlakuan panas T6 (waktu tahan 4 jam dengan suhu yang bervariasi, yaitu 30 °C, 150 °C, 180 °C, 210 °C dan 240 °C), kemudian dilakukan uji kekerasan, kekuatan impak, identifikasi fasa dan pengamatan strukturmikro. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sifat mekanik paduan Al-Si-Mg, naik akibat adanya penambahan suhu saat perlakuan panas T6. Sifat mekanik optimum diperoleh ketika pemanasan pada suhu 210 °C. Pada kondisi ini paduan mempunyai nilai kekerasan 93,30 HVN, kekuatan impak 5,13 J/cm² dan telah memenuhi standar JIS H 5201. Pengamatan strukturmikro menunjukkan terbentuknya struktur *hypoeutektik* yang terdiri dari dendrit aluminium primer dan campuran *eutektik* Al-Si-Mg. Hasil identifikasi fasa setelah perlakuan panas T6 menunjukkan bahwa paduan Al-Si-Mg terdiri dari fasa α -Al, fasa Si dan fasa MnAl₆.

Kata kunci : Paduan Al-Mg-Si, Kekerasan, Kekuatan impak, Identifikasi fasa

ABSTRACT

THE INFLUENCE OF T6 HEAT TREATMENT TO HARDNESS AND MICROSTRUCTURE OF Al-Si-Mg ALLOYS MATERIALS. Al-Si-Mg alloy is one of aluminum alloys that is suitable to be used as a car piston material. This is because it has some benefits such as light weight, corrosion resistance and interesting color but its mechanical properties do not meet criteria of JIS H5201. For that reason, to meet the standard, its mechanical properties need to be improved. Mechanical properties of this alloy can be improved using many ways. In this research the alloy was T6 heat treated (holding times 4 hour with treatment temperature variation of 30, 150, 180, 210 and 240 °C). Some tests were conducted to these new alloys including hardness test, impact test, phase identification and micro structural analysis. Test results showed that the change of mechanical properties occurs due to increasing temperature during T6 heat treatment to these alloys. The optimum mechanical properties were obtained at treatment temperature of 210 °C. In this condition, the alloy has hardness of 93.30 HVN and impact strength of 5.13 J/cm² and these results fulfill JIS H5201 standard. The alloy microstructure showed hypoeutectic structure comprising primary aluminium dendrite and Al-Si-Mg eutectic mixture. The result of phase identification after T6 heat treatment showed that Al-Si-Mg alloys have α -Al phase, Si phase and MnAl₆ phase.

Key words : Al-Si-Mg alloy, Hardness, Impact strength, Phase identification

PENDAHULUAN

Laju pertumbuhan industri otomotif di Indonesia, produksi motor roda dua tahun 2008 diperkirakan sebesar telah berkembang dengan cukup pesat. Sebagai contoh 6 juta buah. Untuk memenuhi komponen kandungan lokal

tersebut, maka perlu ditingkatkan kuantitas dan kualitas komponen kendaraan bermotor tersebut.

Salah satunya metode pengecoran yang banyak diaplikasikan di industri otomotif. Sebagai contoh adalah proses pengecoran cetak (*die casting*) yang menggunakan material paduan aluminium-silikon (Al-Si). Proses ini memiliki banyak keuntungan ekonomis karena dapat memproduksi komponen dengan toleransi ukuran yang sangat kecil dan permukaan yang halus. Meskipun keuntungan tersebut terkendala oleh mahalnya biaya material dan pembuatan cetakan (*dies*). Biasanya biaya cetakan akan mempengaruhi setidaknya 20% biaya produksi total pada industri Al *die casting* [1]. Semakin banyak komponen yang dapat diproduksi dengan menggunakan sebuah cetakan, maka biaya produksi akan semakin rendah.

Umur pakai sebuah cetakan merupakan faktor penting dalam proses Al *die casting*. Selain itu, pada industri *die casting*, merupakan suatu tantangan untuk menurunkan waktu siklus proses pengecoran sehingga dapat meningkatkan produktivitas dan menurunkan biaya produksi. Kerusakan pada cetakan dapat merupakan penghambat untuk hal ini, sebab mengakibatkan perlu diadakannya perbaikan atau penggantian cetakan sehingga menurunkan produktivitas.

Pada umumnya kerusakan cetakan disebabkan karena retak termal, *washout*, dan *die soldering* yang terjadi pada permukaan cetakan yang mengalami kontak langsung dengan logam cair. *Die soldering* didefinisikan sebagai fenomena adesi dari logam ke permukaan cetakan atau inti. Hal ini akan menyebabkan masalah pada proses *die casting* yaitu melekatnya komponen pada cetakan dan meningkatkan keausan adesif ketika komponen dilepaskan dari cetakan. Melekatnya komponen ke permukaan cetakan biasanya terjadi pada saat proses pembekuan.

Peristiwa *die soldering* umumnya lebih sering terjadi di sekitar saluran (*gate*) yang disebabkan tingginya suhu dan kecepatan Al cair masuk ke cetakan. Suhu logam cair dan permukaan cetakan memegang peranan penting dalam menyebabkan *die soldering*. Tingginya suhu cetakan dan logam cair akan menurunkan kekerasan dan ketahanan aus sehingga cetakan akan mudah tererosi. Suhu yang tinggi, baik untuk pertumbuhan fasa intermetalik karena laju difusi atom-atom besi (Fe) dan Al meningkat. Itulah sebabnya tingginya suhu logam cair mempermudah terjadinya *die soldering*. Tingginya suhu juga akan merusak lapisan pelumas sehingga menurunkan kemampuannya untuk mencegah *die soldering*[2-4]. Sebaiknya dihindari suhu logam cair dan permukaan cetakan yang tinggi, sebab dapat menyebabkan terjadinya *soldering*.

Hot spot juga harus dihindari pada permukaan cetakan atau dalam inti. Menurut peneliti terdahulu [5] menjaga suhu logam cair konstan pada ~ 663 °C dapat

meminimalisir kemungkinan terjadinya *hot spot* pada logam cair. Suhu logam dan cetakan juga jangan terlalu rendah karena dapat menyebabkan pengisian buruk dan terjadi *cold solder*.

Sebagai bahan piston untuk motor 125 cc, sifat mekanik yang dibutuhkan sesuai dengan Standar JIS H 5201 adalah ; *Ultimate Tensile Strenght (UTS)* minimal sebesar 25 kg/mm² atau 245,25 Mpa, *Elongation* minimal 5%, *Hardness* 75 s/d 95 Hv dan *Impact Strenght (IS)* 5,5 J/cm². Paduan Al-Si hanya mempunyai kekuatan tarik 160 Mpa , *Hardness* 71 Hv, sehingga perlu adanya penelitian yang bertujuan untuk meningkatkan sifat mekanik paduan tersebut agar sesuai standar yang ditentukan. Penelitian itu juga bertujuan untuk mengkaji pengaruh perlakuan panas T6 terhadap sifat mekanik paduan, dan suhu optimum dalam paduan Al-Si-Mg. Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi sifat mekanik suatu paduan adalah: komposisi kimia, perlakuan panas (*heat treatment*), proses pengecoran dan proses pengerjaan. Jadi dengan mengubah komposisi kimia sampai batas tertentu, dan memberi perlakuan panas, maka sifat mekanik paduan akan menjadi lebih baik sesuai dengan yang diinginkan.

Untuk perlakuan panas T5 dengan suhu *heat solution* 154 °C, misalnya dipilih unsur Mn sebagai elemen paduan, karena Mn dapat meningkatkan kekuatan tarik, *elongation* dan kekerasan. Perlakuan panas T5 dapat mengubah strukturmikro dari bentuk bulat menjadi lonjong atau mendekati bulat. Dengan bentuk yang lebih lonjong maka kuat tarik dan kekerasan akan semakin tinggi. Sebagai contoh, paduan Al-Si-Mg dengan nomor seri AC9B untuk bahan piston, kekerasannya meningkat karena perlakuan panas T5. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekerasan tertinggi yang dapat dicapai adalah sebesar 75 HRB, yaitu ketika diberi perlakuan panas dengan suhu tahan 200 °C dan dengan waktu tahan 4 jam [3].

Hasil cor (*as cast*) Aluminium mudah mengalami perubahan dimensi, penurunan kekuatan, ketangguhan, dan ketahanan terhadap korosi. Untuk mengatasi hal tersebut serta untuk meningkatkan kekuatan dan keuletan, hasil cor diproses termal dengan satu pemanasan atau lebih yang diikuti pendinginan. Dalam penelitian ini proses termal yang dilakukan adalah T6 dengan suhu *heat solution* 538 °C dan waktu tahan selama 4 jam, kemudian dilanjutkan dengan *quenching* sampai 75 °C dan dipanaskan lagi ke suhu 154 °C dan ditahan selama 5 jam, kemudian didinginkan secara lambat di udara.

Proses perlakuan panas T6 terhadap paduan Aluminium dilakukan melalui metode pengerasan dengan terbentuk endapan (*Precipitation hardening*) yang secara garis besar terdiri dari tiga langkah. yaitu perlakuan panas pelarutan (*solution heat treatment*), pendinginan cepat (*quenching*) untuk mendapatkan larutan lewat jenuh (*supersaturated*) dan proses penuaan buatan (*artificial aging*) [7,8].

Penelitian yang dilakukan ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh suhu perlakuan panas T6 (waktu tahan 4 jam dengan suhu yang bervariasi, yaitu 30 °C, 150 °C, 180 °C, 210 °C dan 240 °C) dari paduan Al-Si-Mg sebagai bahan piston motor roda dua, kemudian dilakukan uji kekerasan, kekuatan impact, identifikasi fasa dan pengamatan strukturmikro.

METODE PERCOBAAN

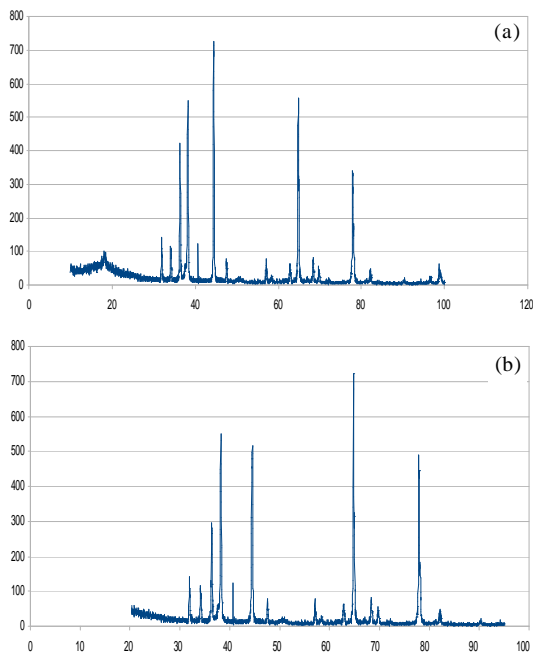
Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah piston dari produksi lokal di pasaran. Piston A adalah sampel awal dan piston B setelah dilakukan perlakuan panas T6.

Pada penelitian ini sampel piston B dipotong menjadi beberapa buah, kemudian diberi perlakuan panas T6 (waktu tahan 4 jam dengan suhu yang bervariasi, yaitu 30 °C, 150 °C, 180 °C, 210 °C dan 240 °C), selanjutnya dilakukan uji kekerasan dengan metode *Vickers* merek Shimadzu, uji kekuatan impact, identifikasi fasa dengan alat difraktometer sinar-X merek Philips, dan pengamatan strukturmikro dengan mikroskop optik merek Nikon. Pengujian sifat mekanik terdiri dari uji UTS yang dilakukan dengan standar JIS [9].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Hasil Identifikasi Fasa

Hasil pengujian identifikasi fasa terlihat adanya perbedaan intensitas puncak difraksi sinar-X dan fasa yang terbentuk, tapi posisi sudut 2θ tetap, sebelum dan sesudah perlakuan panas T6



Gambar 1. Difraktogram sinar-X dari : (a). Bahan Piston A motor roda dua dan (b). Bahan Piston B motor roda dua.

Tabel 1. Hasil uji komposisi unsur kimia dengan alat Spektrometer

Unsur	Al	Si	Mg	Cu	Mn	Zn	Ni	Fe	Pb	Cr	Ti
Piston A	80,56	13,76	2,12	1,58	0,02	0,05	1,33	0,56	0,01	0,03	0,02
Piston B	82,18	13,00	1,98	1,1	0,01	0,07	1,22	0,57	0,03	0,009	0,03

Tabel 2. Puncak difraksi sinar-X dari Piston motor komersial lokal A.

PEAK NO	2θ (deg)	d(Å)	I/I ₀	FWHM (deg)	JCPDS	(h k l)
1	31,45	2,8173	32	0,140	Fasa α -Al	211
2	33,24	2,5925	11	0,100	Fasa α -Al	110
3	36,92	1,2738	10	0,110	Fasa α -Al	210
4	38,67	1,9579	56	0,280	Fasa -Si	111
5	41,37	1,6244	18	0,130	Fasa α -Al	111
6	46,31	1,4727	100	0,150	Fasa α -Al	220
7	57,45	1,3767	17	0,310	Fasa-Si	311
8	64,61	1,3571	11	0,170	Fasa α -Al	200
9	65,24	2,4738	70	0,180	Fasa α -Al	220
10	70,29	1,3267	13	0,220	Fasa α -Al	321
11	71,44	1,3112	16	0,130	Fasa α -Al	301
12	78,55	1,2938	31	0,160	Fasa α -Al	311

Tabel 3. Puncak difraksi sinar-X dari Piston motor komersial lokal B

PEAK NO	2θ (deg)	d(Å)	I/I ₀	FWHM (deg)	JCPDS	(h k l)
1	31,49	2,9173	33	0,140	Fasa α -Al	211
2	33,27	2,8925	13	0,100	Fasa α -Al	110
3	36,94	1,8238	12	0,110	Fasa α -Al	210
4	38,64	1,9882	54	0,280	Fasa -Si	111
5	41,32	1,8334	16	0,130	Fasa α -Al	111
6	46,35	1,7727	60	0,150	Fasa- MnAl ₆	220
7	57,41	1,6767	19	0,310	Fasa-Si	311
8	64,63	1,5571	14	0,170	Fasa α -Al	200
9	65,12	2,4838	100	0,180	Fasa α -Al	220
10	70,21	1,4667	12	0,220	Fasa α -Al	321
11	71,43	1,4312	19	0,130	Fasa α -Al	301
12	78,11	1,3938	34	0,160	Fasa - MnAl ₆	311

diperlihatkan pada (Gambar 1(a) dan Gambar 1(b), serta pada Tabel 1, Tabel 2 dan Tabel 3

Sebelum perlakuan panas T6 paduan Al-Si-Mg terdiri dari fasa α-Al dan fasa Si. Hal ini menunjukkan bahwa saat perlakuan panas ada elemen paduan tersebar merata, baik di dalam matriks (α-Al) maupun di batas butir. Sedang unsur Si banyak berada di batas butir.

Sesudah perlakuan panas T6 paduan Al-Si-Mg terdiri dari fasa α-Al, fasa Si, dan fasa MnAl₆ (Tabel 2). Dengan terbentuknya fasa MnAl₆, maka akan mempengaruhi nilai kekerasan, nilai impact dan strukturmikro dari paduan tersebut.

Analisis Hasil Uji Kekerasan

Berdasarkan hasil pengujian terlihat adanya kenaikan nilai kekerasan sebelum dan sesudah perlakuan panas T6 diperlihatkan pada Tabel 4 dan Tabel 5.

Tabel 4. Hasil uji kekerasan pada Piston motor komersial A

No.	NILAI KEKERASAN (HVN)			
	Uji ke 1	Uji ke 2	Uji ke 3	Rata-rata
Piston A	62,6 ± 6,1	64,1 ± 6,3	63,2 ± 6,2	63,3 ± 6,2

Tabel 5. Hasil uji kekerasan pada Piston motor komersial B

No	NILAI KEKERASAN (HVN)			
	Uji ke 1	Uji ke 2	Uji ke 3	Rata-rata
Piston B (3 ^o)	76,2 ± 6,9	76,3 ± 7,0	76,4 ± 7,4	76,3 ± 7,1
Piston B (15 ^o)	77,2 ± 7,0	78,3 ± 7,2	79,1 ± 7,4	78,2 ± 7,2
Piston B (18 ^o)	78,4 ± 7,3	79,3 ± 7,5	79,9 ± 7,8	79,2 ± 7,2
Piston B (21 ^o)	93,4 ± 8,2	93,9 ± 8,1	92,6 ± 8,3	93,3 ± 8,2
Piston B (24 ^o)	91,1 ± 7,4	91,3 ± 7,2	91,2 ± 7,3	91,2 ± 7,3

Dari Tabel 4 menunjukkan sebelum perlakuan panas T6 nilai kekerasannya 63,3 HVN yang belum memenuhi standar *JIS H5201*. Setelah diberi perlakuan panas T6 terjadi kenaikan nilai kekerasan yang signifikan. Nilai nilai (76,3-93,3) HVN (Tabel 5), sehingga bisa memenuhi standar *JIS H 5201*. Hal ini disebabkan pada paduan Al-Si-Mg telah terbentuk senyawa MnAl₆ yang menyebar merata baik di batas butir maupun di matriksnya (α -Al). Meningkatnya kekuatan tarik dan kekerasan tersebut disebabkan senyawa MnAl₆ memasuki tempat diantara atom-atom Aluminium sehingga susunan atom akan menjadi lebih rapat dan menimbulkan ikatan yang semakin kuat. Gaya yang diperlukan untuk menimbulkan dislokasi semakin besar, yang berarti kekuatan tarik dan kekerasan semakin besar.

Namun penambahan Mn pada paduan Al-Si-Mg mempunyai harga maksimum. Apabila telah melebihi batas kelarutannya, senyawa MnAl₆ yang terbentuk akan memperlemah ikatan antar atom. Sehingga gaya yang diperlukan untuk mendeformasi akan semakin kecil, yang berarti menurunkan kekerasan.

Analisis Hasil Pengujian Kekuatan Impak

Hasil pengujian impak terlihat adanya penurunan nilai impak sebelum dan sesudah perlakuan panas T6 diperlihatkan pada Tabel 6.

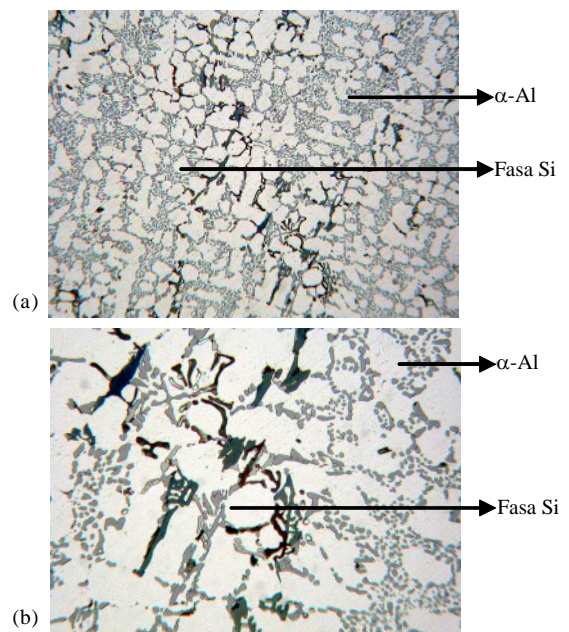
Tabel 6. Hasil uji kekuatan impak pada Piston motor komersial B

Suhu (°C)	Piston A	Piston B 30	Piston B 150	Piston B 180	Piston B 210	Piston B 240
Impak(J/cm ²)	6,42	5,36	5,22	5,17	5,13	5,09

Sebelum perlakuan panas T6, nilai kekuatan impak 6,42 J/cm², ini memenuhi standar *JIS H5201*. Setelah diberi perlakuan panas T6 terjadi penurunan nilai kekuatan impak yang signifikan dari 6,42 menjadi 5,09 J/cm². Bila gaya yang terjadi secara mendadak (bukan ditarik secara pelan-pelan) maka material akan segera patah, yang secara fisik ditandai dengan turunnya nilai impak. Secara teori *elongation* akan naik sedangkan kekuatan impak semakin turun. Hal ini disebabkan adanya senyawa MnAl₆ sebagaimana ditunjukkan oleh Tabel 6, akan menambah kemampuan ikatan antar atom secara menyeluruh. Sehingga kemampuan untuk mulur terlebih dahulu ketika material ditarik juga meningkat, yang berarti *elongation* meningkat (tapi nilai impak turun).

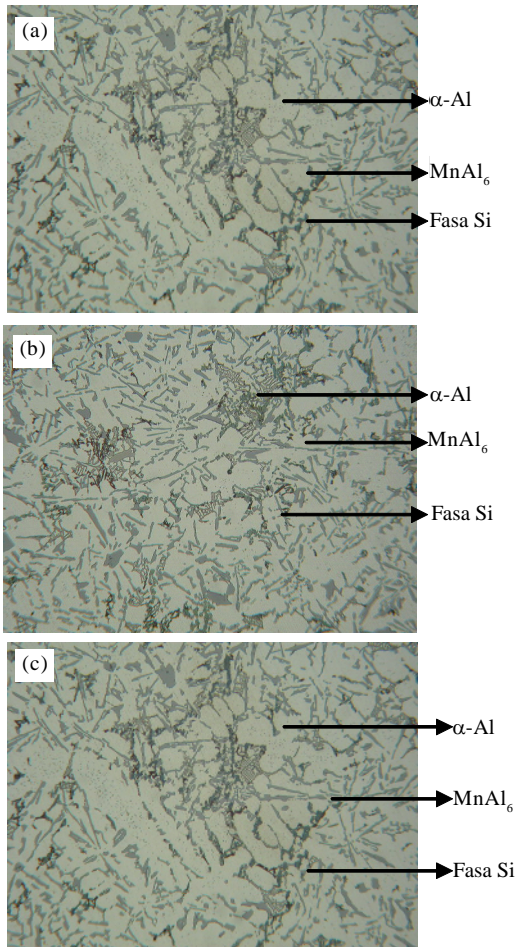
Analisis Hasil Pengamatan Strukturmikro

Hasil pengamatan strukturmikro terlihat adanya perbedaan morfologi sebelum dan sesudah perlakuan panas T6 (Gambar 2 hingga Gambar 5). Sebelum perlakuan panas T6 morfologi berbentuk bulat (Gambar 2 (a)).

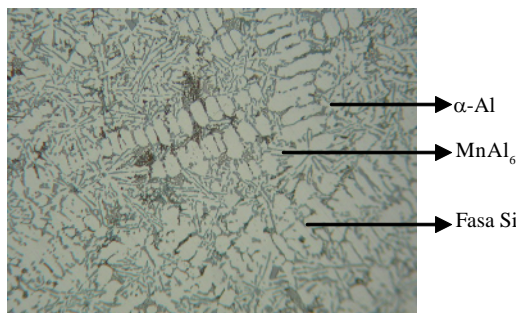


Gambar 2. Strukturmikro berupa matriks α -Al, kondisi *as cast* Piston A (a). pembesaran 50x dan (b). pembesaran 200x.

Setelah diberi perlakuan panas T6 terjadi perubahan morfologi dengan bentuk lonjong (Gambar 3 sampai dengan Gambar 5) yang menunjukkan bahwa semakin besar suhu pemanasan maka titik-titik putih akan semakin besar dan menyebar merata. Dengan adanya Mn yang membentuk senyawa MnAl₆ 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.

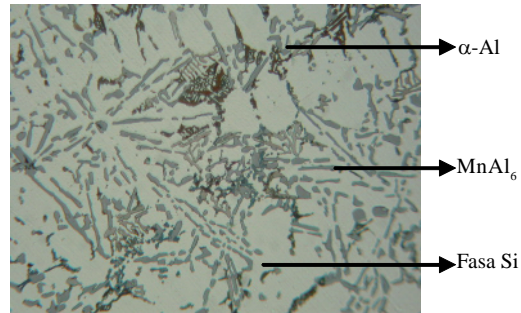


Gambar 3. Struktur mikro berupa matriks α -Al, perlakuan panas T6, Piston B, pembesaran 200x (a). suhu 30 °C, (b) suhu 180 °C dan (c) suhu 210 °C



Gambar 4. Struktur mikro berupa matriks α -Al, perlakuan panas T6, Piston B, suhu 150°C, dengan pembesaran 150x.

Nilai kekerasan, pada kondisi perlakuan panas T6 selalu lebih besar dari pada kondisi *as-cast*. Hal ini disebabkan karena jumlah senyawa $MnAl_6$ yang terlarut dalam paduan Al-Si-Mg akan semakin besar karena kemampuan untuk mengandung senyawa $MnAl_6$ meningkat setelah diberi perlakuan panas. Menurut peneliti terdahulu [5], mengatakan bila Mn terlalu tinggi (melebihi 1,2% w) maka keberadaan senyawa $MnAl_6$ justru akan memperlemah ikatan antar atom. Hal ini ditunjukkan dengan menurunnya kekuatan tarik dan kekerasan.



Gambar 5. Struktur mikro berupa matriks α -Al, perlakuan panas T6, Piston B, suhu 210 °C, dengan pembesaran 350x

Disamping itu kenaikan kekerasan juga disebabkan karena, dengan adanya perlakuan panas T6, 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.

KESIMPULAN

Dari hasil analisis dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Bahan paduan Al-Si-Mg setelah perlakuan panas T6 menunjukkan bahwa makin besar suhu perlakuan panas, maka kekerasan akan semakin naik, sedang kekuatan impak semakin turun.
2. Hasil pengamatan struktur mikro menunjukkan bahwa elemen paduan Mn tersebar merata dalam paduan Al-Si-Mg, baik pada matriks (α -Al) maupun pada batas butirnya.
3. Hasil pengujian identifikasi fasa menunjukkan bahwa sesudah perlakuan panas T6 pada paduan Al-Si-Mg terdiri dari fasa α -Al, fasa Si, dan fasa $MnAl_6$.

DAFTAR ACUAN

- [1]. SUHARIYANTO, Peningkatan Sifat Mekanik Paduan Aluminium A 356.0 dengan penambahan TiC dan Perlakuan Panas T6, *SAINTEK Jurnal Ilmiah Teknik dan Rekyasa*, **8**(2) (2004)
- [2]. JOHN E.HATCH, *Aluminium Properties and Physical Metallurgy*, American Society for Metals, Ohio, (1995)
- [3]. ELVIS S, *Pengaruh Perlakuan Panas terhadap Sifat Mekanik dan Struktur mikro pada Paduan Al-Si-Mg untuk Piston Motor*, PPS Materials UI, Jakarta, (1997)
- [4]. ZALENSAS D.L, *Aluminium Casting Technology*, 2nd Edition, American Foundrymen's, Inc., Illinois, (1998)
- [5]. SAMUEL F.H., Effect of Magnesium Content on the Ageing Behaviour of Waterchilled Al-Si-Mg Alloy Casting, *Journal of Mat. Sci.*, **30** (1996) 2531-2540

- [6]. FLINN RICHARD A., *Fundamentals Of Metal Castings*, Addison-Wesley Publishing Company Inc., (1993)
- [7]. DIETER G. E., *Metalurgi Mekanik*, Jilid I dan Jilid II, terjemahan Sriati Djaprie, Erlangga, Jakarta, (1992)
- [8]. FAN Z., *Semisolid Metal Processing*, *International Materials Review*, **47**(2) (2002)
- [9]. *JIS Handbook Non-Ferrous Metals and Metallurgy*, JSA (Ed.), JSA Publications, (1994)