

# PENGUKURAN PENGARUH TEKANAN PERAH PADA TEGANGAN SISA PADUAN AISi *SQUEEZE CASTING* DENGAN TEKNIK DIFRAKSI SINAR-X

Parikin dan S.Suminta

Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir – BATAN  
Kawasan Puspiptek Serpong Tangerang Selatan BANTEN  
E-mail : farihin@batan.go.id

Masuk tanggal : 24-07-2012, revisi tanggal : 05-11-2012, diterima untuk diterbitkan tanggal : 19-11-2012

## Intisari

**PENGUKURAN PENGARUH TEKANAN PERAH PADA TEGANGAN SISA PADUAN AISi *SQUEEZE CASTING* DENGAN TEKNIK DIFRAKSI SINAR-X.** Telah dilakukan pengukuran tegangan sisa bahan paduan AISi hasil pengecoran cara perah (*squeeze*). Tegangan sisa yang diukur dalam daerah intergranular disekitar batas butiran dengan metode difraksi sinar-X. *Tailoring* teknik difraksi-metode Rietveld mampu mendapatkan parameter regangan kisi rata-rata dan *full width half maximum* (FWHM) setiap fasa dalam paduan. Grafik memperlihatkan bahwa fasa aluminium mengalami tegangan *compressive-tensile* sedang fasa silikon mengalami total tegangan *compressive*. Dominasi komposisi unsur aluminium mengakibatkan pola distribusi tegangan sisa dalam paduan AISi mengikuti pola tegangan sisa dalam fasa aluminium, meskipun peregangan kisi didominasi fasa silikon yang mengalami regangan negatif. Hasil penelitian memperlihatkan, kurva tegangan sisa dalam bahan paduan AISi berfluktuasi antara -800 GPa hingga 400 GPa.

*Kata kunci : Paduan AISi, Difraksi sinar-X, Tekanan perah, Tegangan sisa*

## Abstract

**MEASUREMENT OF PRESSURE DIE EFFECT ON THE RESIDUAL STRESS OF *SQUEEZE CASTING* AISi ALLOY USING X-RAY DIFFRACTION TECHNIQUE.** The measurement of residual stresses on squeeze casting AISi alloys has been carried out. The residual stresses were measured in the inter-granular areas around the grain boundaries of the phases by using X-ray diffraction techniques. The tailoring of diffraction method and Rietveld analysis could be applied to calculate the average lattice strains of the phases and the profile parameters (FWHM) in the specimens. The graph shows that the aluminum phase was in compressive-tensile stresses while the silicon phase was in totally compressive stresses. The domination of aluminum composition in the specimens tends to affect the residual stress behaviour of the squeeze casting AISi alloys. The stress distribution of the alloys follows the profile of stress curve of aluminum phase, even-though the strains were dominated by silicon phase in negative strains. The result shows that the hydrostatic residual stresses curve of squeeze casting AISi alloys fluctuates between approximately -800GPa and 400 GPa.

*Keywords : AISi alloys, X-ray diffraction, Pressure die, Residual stresses*

## PENDAHULUAN

Salah satu paduan aluminium yang dimanfaatkan sebagai bahan komponen produk piston adalah paduan aluminium silikon (AISi)<sup>[1]</sup>. Paduan ini termasuk kategori *non-heat treatable alloy*, yaitu paduan yang tidak dapat dikeraskan dengan perlakuan panas. Tetapi dengan kehadiran unsur seperti Cu dan Mg yang membentuk presipitat CuAl<sub>2</sub> dan MgSi, menyebabkan

paduan ini dapat dikeraskan dengan perlakuan panas<sup>[2]</sup>. Perlakuan ini dimaksudkan agar presipitat tersebar merata untuk meningkatkan kekerasan bahan.

Perekayasaan dengan teknik perah (*squeeze*) pada produk coran berbasis paduan aluminium mampu menambah keunggulan dengan biaya murah. Teknik ini dapat meningkatkan densitas atau menurunkan porositas dan menghasilkan

kehomogenan strukturmikro<sup>[3]</sup>. Dengan data parameter proses tertentu<sup>[4]</sup>, penerapan teknik ini diharapkan mampu memperoleh produk coran dengan sifat-sifat yang diinginkan, dan bisa dikembangkan lebih lanjut dengan kualitas yang lebih baik. *Squeeze / pressure die casting*<sup>[5]</sup> adalah salah satu metode pengecoran melalui wadah cetakan sambil diberikan tekanan (metode cor perah). Keuntungan utama metode ini adalah mampu menghasilkan produk coran yang sangat kompleks, dengan tingkat capaian kehalusan permukaan yang sangat baik. Peralatan yang digunakan relatif sederhana, biaya produksi murah dan waktu yang relatif singkat. Pengecoran cara perah merupakan penempaan logam cair (*liquid metal forging*) yang menempati wadah cetakan sambil dipanaskan dan ditekan dengan tekanan tinggi<sup>[6]</sup>. Pemanasan wadah cetakan dimaksudkan agar logam cair tidak langsung membeku, sehingga atom-atom mempunyai kesempatan untuk menyusun dan mengatur diri dan membentuk butiran yang teratur dan homogen. Penggunaan teknik tekanan tinggi pada proses solidifikasi dapat mengurangi gas yang terjebak selama proses pembekuan. Keberadaan gas tersebut adalah sebagai akibat dari terlarutnya sejumlah gas hidrogen dalam logam cair ketika mengisi wadah cetakan. Pemanasan wadah cetakan disertai tekanan pada proses pengecoran dapat mengurangi pori yang terbentuk<sup>[7]</sup>, sehingga paduan AlSi bahan piston yang dihasilkan dapat dipakai dengan usia lebih lama dibandingkan dengan bahan piston produk teknik cor gravitasi yang masih mengandung sejumlah pori.

Makalah ini merupakan pembahasan tentang fenomena peregangan kisi kristal akibat pengaruh tekanan perah yang dapat mengubah distribusi tegangan sisa bahan, dan mampu mengakibatkan kegagalan suatu produk. Secara makro kegagalan biasanya bermula dari sambungan antar komponen selama fabrikasi dan boleh jadi distribusi tegangan sisa dalam bahan dapat berubah, khususnya dekat permukaan.

Tegangan internal ini disebut tegangan sisa, yang didefinisikan sebagai tegangan elastis yang bisa muncul dalam benda padat saat semua beban eksternal dihilangkan<sup>[8]</sup>. Tegangan sisa merupakan gaya elastis yang mengubah jarak interplanar bidang kristal tanpa adanya beban luar. Perubahan kecil hanya dapat diamati dengan teknik difraksi. Hamburan sinar-X, dengan panjang gelombang seorde dengan jarak antar bidang kristal mampu mengukur perubahan tersebut.

## DASAR TEORI

Pengamatan tegangan internal dalam bahan dapat ditelusuri dari fenomena tegangan internal kisi dalam suatu kristal. Tegangan ini berbanding langsung dengan regangan elastik kisi yang terjadi di dalam kristal yang menyusun bahan. Besaran regangan dapat diturunkan dari hukum difraksi Bragg,

$$2 d_{hkl} \sin \theta_{hkl} = \lambda \quad \dots\dots\dots(1)$$

dimana  $d_{hkl}$  adalah jarak bidang kisi kristal yang berkaitan dengan bidang refleksi Bragg ( $hkl$ ) yang teramati pada suatu sudut hambur  $2\theta_{hkl}$ ,  $\lambda$  adalah panjang gelombang sinar-X dan ( $hkl$ ) adalah indeks Miller bidang difraksi. Menurut konstruksi Ewald<sup>[9]</sup> untuk hamburan elastik, dapat didefinisikan vektor  $\mathbf{Q} = \mathbf{k}_i - \mathbf{k}_f$  dengan  $\mathbf{k}_i$  ( $\mathbf{k}_f$ ) adalah vektor gelombang sinar datang (terhambur) yang besarnya  $2\pi/\lambda$ . Syarat terjadinya difraksi adalah vektor  $\mathbf{Q}$  harus tegak lurus terhadap bidang difraksi dan besarnya  $2\pi/d$ . Jika persamaan (1) diturunkan terhadap  $\lambda$  dan  $\theta$  dan dengan memperhatikan persyaratan difraksi maka dapat diturunkan persamaan;

$$(\Delta d/d)^2 = (\Delta\lambda/\lambda)^2 + (-\cot \theta \Delta\theta)^2 \dots\dots\dots(2)$$

Persamaan ini juga dapat dikaitkan pada daya pisah (*resolusi*) alat<sup>[10]</sup>. Persamaan ini memiliki dua suku untuk kondisi pengukuran yang berbeda. Pada alat yang menggunakan metode pengukurannya menggunakan panjang gelombang tetap, seperti difraktometer sinar-X, dan neutron,

maka pada kondisi ini digunakan suku kedua dari persamaan (2),

$$\varepsilon = \Delta d/d = -\cot \theta \Delta \theta \dots\dots\dots(3)$$

Persamaan ini mengilustrasikan regangan kisi,  $\varepsilon = (d-d_0)/d_0 = \Delta d/d_0$  yang kecil dalam kristal bahan yang dapat diidentifikasi dari sedikit pergeseran puncak difraksi. Dari pengukuran perubahan sudut hamburan  $\Delta 2\theta = -2 \varepsilon \tan \theta$ , regangan  $\varepsilon$  dapat diprediksi. Pada spesimen yang berukuran besar, regangan  $\varepsilon$  merupakan harga rata-rata dari regangan yang terjadi di dalam bahan untuk bidang (*hkl*) tertentu. Pada kasus ini  $\varepsilon$  akan diukur untuk arah sumbu kristalografi *a*. Arah pengukuran regangan dalam spesimen merupakan arah hamburan vektor *Q*. Dalam bahan ada sejumlah kristal dengan bidang hampur (*hkl*) tegak lurus terhadap arah pengukuran regangan yang diamati dari sudut puncak difraksi. Jarak antar bidang kristal bahan yang tidak mengalami regangan harus ditentukan dengan cermat agar regangan mutlak (*absolute strain*) dapat ditentukan dengan pasti. Oleh karena perubahan yang bervariasi terhadap nilai  $d_0$  akibat perubahan komposisi fasa dalam bahan, sangat mempengaruhi terjadinya regangan, bila fluktuasi selisih  $d_0$  yang dibandingkan dengan  $d_0$  mengakibatkan perubahan tegangan pada besaran skalar dan volume (*spatial*).

Regangan yang didiskusikan di atas merupakan harga rata-rata untuk seluruh volume yang diiradiasi, karena tegangan sisa dalam kebanyakan bahan padat tidak homogen. Ketidak-homogenan medan regangan dapat menghasilkan pelebaran (*broadening*) pada pola difraksi. Pelebaran dari suatu puncak difraksi ini dapat diberikan sebagai<sup>[11]</sup>,

$$B^2 = B_0^2 + 32 (\ln 2) (\varepsilon_{hkl})^2 \tan^2 \theta \\ = U \tan^2 \theta + V \tan \theta + W \dots\dots\dots(4)$$

dimana *B* adalah FWHM (*full wave half maximum*) dari pelebaran puncak, *U, V, W* adalah konstanta-konstanta penghalusan (*refinement*) puncak dari analisis Rietveld,  $\varepsilon_{hkl}$  adalah harga rata-rata regangan *rms*

bahan anisotropis dan  $B_0$  adalah resolusi alat, yang bervariasi terhadap  $\theta$ , menurut persamaan Cagliotti<sup>[12]</sup>,

$$B_0^2 = U_0 \tan^2 \theta + V_0 \tan \theta + W_0 \dots\dots(5)$$

Dari persamaan (4) dan (5) dapat diturunkan persamaan;

$$U = U_0 + 32 (\ln 2) (\varepsilon_{hkl})^2 \dots\dots\dots(6)$$

Dalam perhitungan parameter *U* diperoleh dari analisis data spesimen paduan AlSi dan parameter  $U_0$  diperoleh dari analisis data spesimen AlSi tanpa pemberian tekanan perah.

Selanjutnya setelah regangan rata-rata dapat dikarakterisasi, tegangan sisa dalam setiap bahan dapat ditentukan secara deduksi. Eksperimen terhadap spesimen paduan AlSi dilakukan pada tekanan dan suhu ruang, sehingga diharapkan setiap fasa berada dalam keadaan hidrostatik. Tegangan hidrostatik,  $\sigma$ <sup>[13]</sup> sebanding dengan regangan hidrostatik,  $\varepsilon$  dapat dirumuskan sebagai :

$$\sigma = [E/(1 - 2\nu)] \varepsilon_{av} \dots\dots\dots(7)$$

dimana *E* adalah modulus Young dan  $\nu$  adalah pembanding Poisson yang ditentukan dari pengukuran tersendiri untuk setiap fasa. Harga konstanta modulus young dan pembanding Poisson untuk bahan aluminium silikon yang didapat berturut-turut adalah 62,696 GPa dan 0,363<sup>[14]</sup>. Untuk tegangan keadaan hidrostatik,  $\varepsilon_{av}$  dapat dihitung pada seluruh arah spesimen,  $\varepsilon_{av} = (1/4\pi) \int_{\Omega} \varepsilon_{hkl} d\Omega$  dimana  $\varepsilon_{hkl}$  adalah regangan dalam butiran (*grain*) yang bidang [*hkl*]-nya terletak pada arah yang diamati. Integrasi dilakukan untuk seluruh arah random butiran di dalam bahan. Untuk kasus dua fasa dimana di dalam paduan AlSi terdapat fasa aluminium (fcc) dan fasa silikon (*diamond*), maka dapat diturunkan;

$$\varepsilon_{av} = (1/3) [ 2 \varepsilon_{Al} + \varepsilon_{Si} ] \dots\dots\dots(8)$$

Tegangan sisa dalam bahan yang mengandung dua fasa tidak berdiri bebas, akan tetapi merupakan persamaan hubungan kesetimbangan<sup>[15]</sup> dari setiap

butiran partikel yang menyusun bahan. Persamaan kesetimbangan dapat dituliskan sebagai :

$$f_{Al} \sigma_{Al} + f_{Si} \sigma_{Si} = 0 \dots \dots \dots (9)$$

dimana  $f_{Al}$  dan  $f_{Si}$  adalah berturut-turut fraksi volume fasa aluminium dan fasa silikon. Persamaan ini dapat digunakan untuk memeriksa apakah persamaan asumsi hidrostatik di atas valid.

**PROSEDUR PERCOBAAN**

Bahan yang digunakan adalah piston bekas pakai kendaraan roda dua merek Honda yang didistribusikan PT. Astra Internasional Tbk. seperti ditampilkan dalam Gambar 1. Bahan paduan ini berkomposisi unsur aluminium sekitar 93%wt dan unsur silikon sekitar 7%wt<sup>[16]</sup>.

Bahan piston dipotong-potong berbentuk keping kecil (*bulk*) kemudian dihaluskan menjadi serbuk kasar seperti Gambar 2. Sebelum peletisasi serbuk piston dilelehkan dalam tungku *ashing furnace type-6000 (thermolyne sybron)* pada temperatur 750 °C. Proses pengecoran perah pada berbagai tekanan  $p$  (Pa ) dilakukan pada kondisi temperatur cetakan (*dies*) 400 °C dan waktu tekan selama 15 menit. Skema peralatan *manual press* pembuatan produk piston diperlihatkan pada Gambar 3.

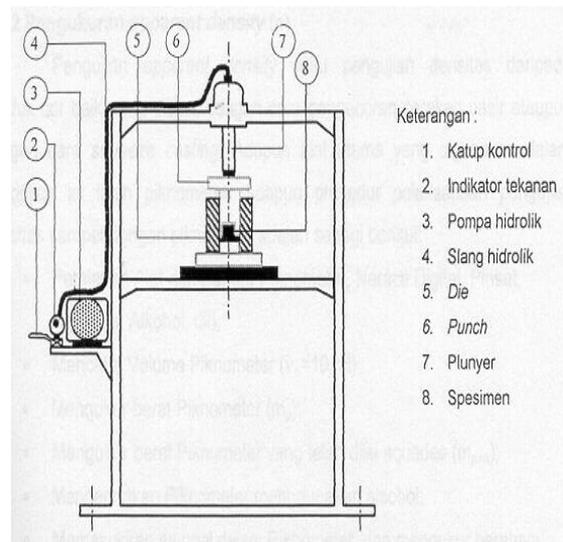
Hasil pengecoran berupa pelet dengan diameter 20 mm tebal ±7,5 mm, seperti terlihat pada Gambar 4. Produk cor perah diberi perlakuan panas pelarutan (*solid solution heat-treatment*) pada temperatur 400 °C selama 2 jam yang dilanjutkan dengan proses pendinginan di udara pada temperatur ruang 25 °C.



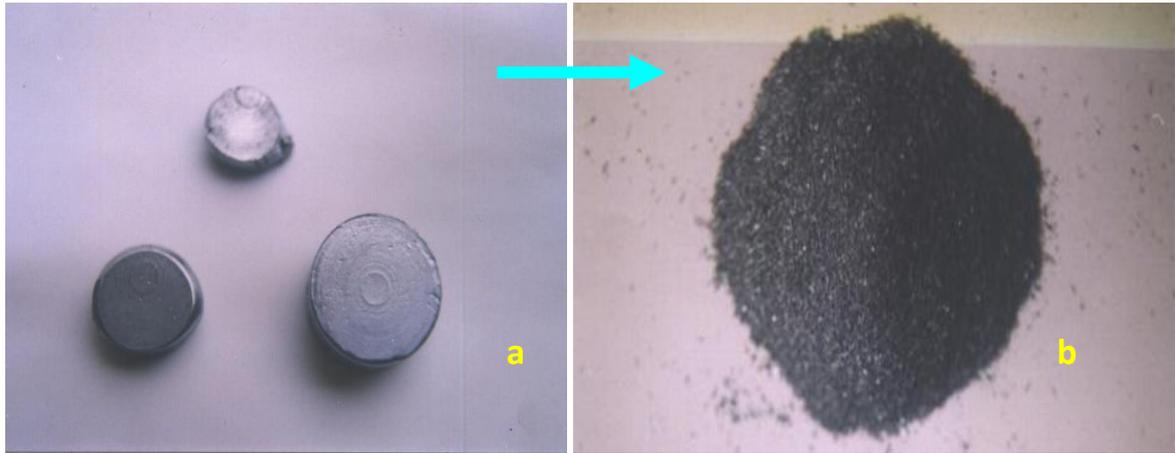
**Gambar 1.** Piston motor Honda PT. Astra Internasional Tbk



**Gambar 2.** Serpihan dan serbuk piston sebelum cor perah



**Gambar 3.** Skema *manual press*<sup>[4]</sup> pembuatan produk piston



**Gambar 4.** Bahan piston hasil cor perah berbagai tekanan, siap untuk dikarakterisasi; (a) Spesimen cor perah (b) Serbuk

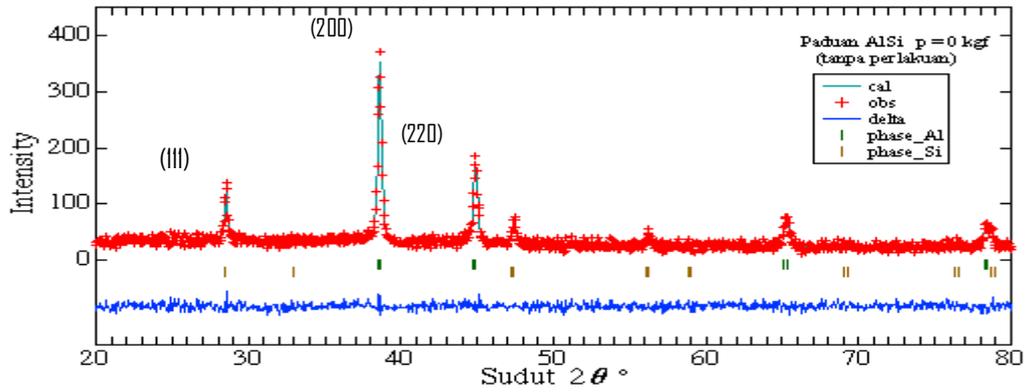
Spesimen bahan piston berbentuk serbuk hasil cor perah pada berbagai tekanan dalam eksperimen ini ada 6 (enam) buah; yang terdiri dari satu spesimen sebelum cor perah (sebagai sampel acuan) dan lima spesimen hasil cor perah pada tekanan  $p = 150, 200, 300$  dan  $400$  Pa. Seluruh spesimen tersebut ditandai dengan: P000, P150, P200, P300 dan P400, kemudian didifraksi menggunakan difraktometer Sinar-X *Shimadzu XD-610* di PTBIN-BATAN pada temperatur ruang untuk mendapatkan pola difraksi. Selanjutnya data intensitas difraksi terhadap sudut  $2\theta$  dianalisis dengan metode Rietveld menggunakan program RIETAN<sup>[17]</sup>. Perolehan data penghalusan digunakan dalam perhitungan dengan formulasi tegangan hidrostatis untuk mengetahui distribusi tegangan sisa bahan

paduan AlSi *squeeze casting* berbagai tekanan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Penghalusan Rietveld

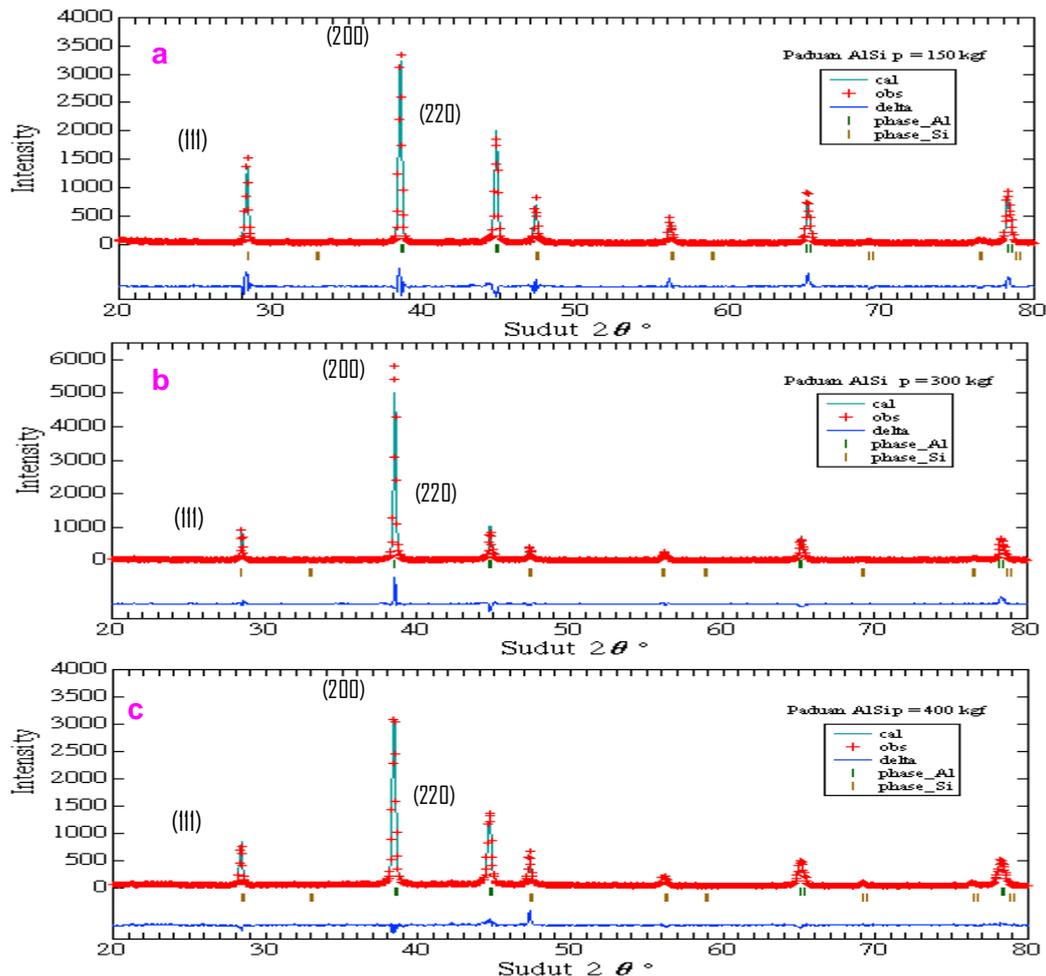
Struktur kristal bahan piston merupakan paduan unsur aluminium (Al) dan silikon (Si). Unsur Al berjejari atom  $1,43 \text{ \AA}$ , memiliki sistem kristal<sup>[18]</sup> *face centered cubic* (FCC) dengan grup ruang F m 3 m (I-225) dan parameter kisi  $a = 4,0496 \text{ \AA}$ . Sedang jejari atom Si adalah  $1,17 \text{ \AA}$ , berstruktur kubik diamond, grup ruang F d 3 m (I-227) dan parameter kisi  $a = 5,4282 \text{ \AA}$ . Proses penghalusan pola difraksi diasumsikan dalam bahan paduan ini mengandung campuran dua fasa yaitu: fasa Al sebagai fasa mayor dan fasa Si diamond sebagai fasa minor, yang dilakukan secara simultan.



Gambar 5. Pola penghalusan Rietveld bahan piston tanpa perlakuan

Tabel 1. Pergeseran dan pelebaran puncak tiga bidang Bragg fasa aluminium

Spesimen	Pergeseran Puncak, $2\theta$ (deg.)			Pelebaran Puncak, FWHM (deg.)		
	(111)	(200)	(220)	(111)	(200)	(220)
P000 (reference)	38,471	44,720	65,095	0,2252	0,2379	0,3029
P150	38,475	44,735	65,119	0,1573	0,1642	0,1981
P200	38,473	44,728	65,108	0,1630	0,1767	0,2230
P300	38,465	44,710	65,079	0,1448	0,1634	0,2225
P400	38,472	44,714	65,086	0,2105	0,2416	0,3530



Gambar 6. Pola penghalusan Rietveld produk cor dengan tekanan perah  $p$  ; (a)150Pa (b) 300 Pa dan (c) 400 Pa

**Tabel 2.** Parameter struktur paduan AlSi hasil penghalusan RIETAN

Fasa	Tekanan (Pa)	Kisi, $a$ (Å)	Volume (Å) <sup>3</sup>	B isotropik
Aluminium	0	4,0496(8)	66,41(2)	1,6(1)
	150	4,0483(2)	66,345(5)	1,0(2)
	200	4,0489(4)	66,37(1)	0,8(2)
	300	4,0505(3)	66,454(8)	1,1(3)
	400	4,0501(5)	66,43(1)	1,1(2)
	Silikon	0	5,436(2)	160,61(8)
150		5,4280(3)	159,93(2)	2,1(2)
200		5,4284(5)	159,96(3)	0,039(0)
300		5,4305(5)	160,15(2)	0,039(0)
400		5,4270(8)	159,84(4)	0,039(0)

Gambar 5 memperlihatkan pola hasil penghalusan Rietveld bahan piston tanpa perlakuan (sampel acuan). Bentuk profil pola difraksi ini menggambarkan kecocokan (*fitting*) antara intensitas pengamatan dan perhitungan. Terlihat pada Gambar 5; tanda (+ merah) adalah data pengamatan, garis malar (— abu-abu) adalah hasil perhitungan, garis vertikal (| hijau dan coklat) adalah posisi puncak fasa Al dan fasa Si dan garis mendatar (— biru) di bawah adalah plot selisih data pengamatan dan data perhitungan RIETAN. Profil pola difraksi hasil penghalusan RIETAN menunjukkan bahwa pada sudut  $2\theta = 20^\circ$ - $80^\circ$  terdapat 7 (tujuh) puncak Bragg dengan intensitas rendah milik fasa Al dan Si dengan cacah latar yang tinggi. Tiga puncak Bragg milik fasa Si adalah bidang (111), (220) dan (311) masing-masing pada sudut  $2\theta = 28,60^\circ$ ;  $47,45^\circ$  dan  $56,19^\circ$ , dan empat puncak Bragg milik fasa Al adalah bidang (111), (200), (220), dan (311) masing-masing pada sudut  $2\theta = 38,60^\circ$ ;  $44,85^\circ$ ;  $65,29^\circ$  dan  $78,40^\circ$ . Hasil penghalusan fasa campuran Al dan Si bahan piston hasil cor

perah dengan perlakuan berbagai tekanan ( $p = 150, 200, 300$  dan  $400$  Pa), ditunjukkan pada Gambar 6. Profil pola difraksi serupa dengan hasil penghalusan RIETAN pada bahan piston tanpa perlakuan, terdapat 7 (tujuh) puncak Bragg dengan intensitas cukup kuat dan cacah latar yang rendah. Tetapi sedikit terjadi pelebaran dan pergeseran puncak Bragg pada setiap fasa untuk tekanan perah tertentu, seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Fenomena ini merupakan identifikasi awal terjadinya peregangan kisi kristal, yang diestimasi dari pergeseran puncak bidang pada pola difraksi. Sedang kekuatan peregangan bidang kristal atau medan regangan dapat ditunjukkan dari pelebaran puncak difraksi yang terjadi.

Pemberian perlakuan tekanan perah ( $p$ ) dimaksudkan untuk memperoleh produk cor perah yang baik pada tekanan tertentu. Pada penelitian sebelumnya diperoleh parameter proses cor perah terbaik pada tekanan 100 MPa dan temperatur *dies*  $210^\circ\text{C}$ <sup>[2]</sup>. Pada penelitian ini masih diperoleh produk cor perah terbaik adalah pada tekanan 300 Pa pada temperatur cetakan (*dies*)  $400^\circ\text{C}$  dengan waktu tekan

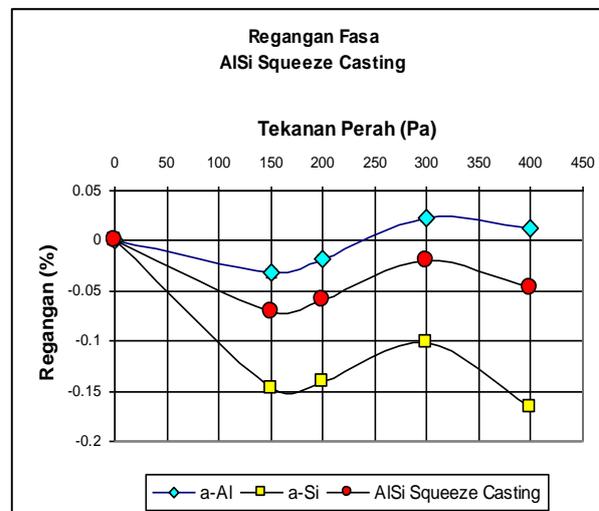
selama 15 menit. Pada Gambar 6 terlihat puncak Bragg tertinggi (intensitas cacahan  $\pm 6000$ ) terjadi pada tekanan  $p = 300$  Pa, terletak pada sudut  $2\theta = 38,46^\circ$  yang merupakan fasa Al bidang (111).

Data parameter kisi, volume sel satuan dan B isotropik setiap fasa pada berbagai tekanan disusun pada Tabel 2. Perolehan nilai B isotropik yang positif memberi gambaran kesesuaian parameter dalam proses penghalusan dan statistik data yang bagus. Meskipun nilai  $R_{wp}$  (rasio kesesuaian antara data intensitas pengamatan dan perhitungan) yang diperoleh pada proses penghalusan berturut-turut untuk P000, P150, P200, P300 dan P400 adalah: 17,34, 19,77, 17,05, 21,62 dan 14,78, tetapi *reliable factor* ( $S$ ; *goodness of fit*) memberikan angka yang cukup baik yakni: 1,0013; 1,5481; 1,2893; 1,5763 dan 1,2504. Terlihat bahwa tanpa tekanan dan diberi tekanan cor, ada perubahan parameter kisi  $a$ , dengan kesalahan 4 digit di belakang koma (statistik baik). Misal pada tekanan  $p = 300$  Pa parameter kisi  $a$  fasa Al naik dari  $4,0496(8) \text{ \AA}$  menjadi  $4,0505(3) \text{ \AA}$ , sedangkan fasa Si menurun dari  $5,436(2) \text{ \AA}$ , menjadi  $5,4305(5) \text{ \AA}$ . Perubahan parameter kisi diikuti pula dengan perubahan volume unit sel pada setiap perubahan tekanan.

### Regangan (Strain)

Dalam eksperimen ini, *fitting* terhadap data difraksi cukup memadai ( $wRp = 17-21\%$  dan  $f = 1-1,5$ ), diperoleh untuk setiap spesimen paduan AlSi. Hasil ini cukup mengimplikasikan kepresisian data eksperimen. Seluruh regangan kisi rata-rata sepanjang variasi  $[hkl]$  sesuai dengan simetri kristal. Pada kasus ini tensor regangan disesuaikan dengan simetri kristal. Jumlah komponen bebas dapat direduksi menjadi satu atau dua komponen bebas. Dalam struktur kristal uniaksial (struktur kubik), seperti struktur Al dan Si, hanya satu komponen bebas diperlukan untuk menyatakan sifat-sifat tensor secara

lengkap. Sepanjang arah lain, regangan dapat dihitung menggunakan aljabar tensor. Penentuan komponen regangan sepanjang arah sumbu prinsip sangat dianjurkan, adalah sumbu- $a$  untuk kedua fasa dalam aturan struktur konvensional. Hasil ini disusun dalam Tabel 3.



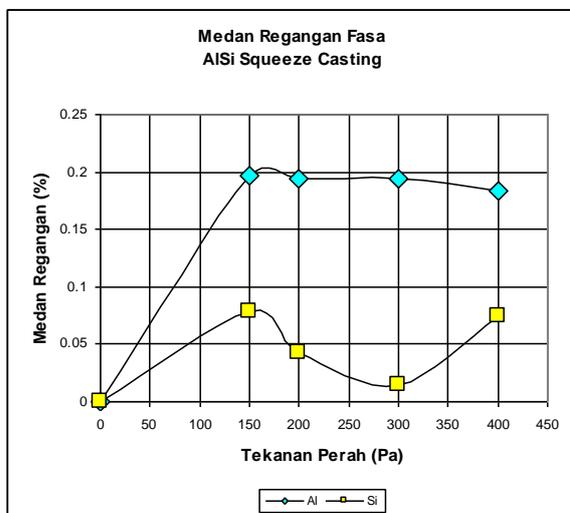
**Gambar 7.** Distribusi regangan fasa Al dan Si dalam paduan AlSi *squeeze casting*

**Tabel 3.** Regangan kisi rata-rata sepanjang arah utama kristal

Spesimen	Regangan Kisi rata-rata (%)		
	Al <i>a</i> //	Si <i>a</i> //	AlSi <i>a</i> //
P000	0	0	0
P150	-0,0321	-0,14717	-0,07046
P200	-0,01729	-0,13981	-0,05813
P300	0,022228	-0,10132	-0,01895
P400	0,012345	-0,16559	-0,04697

Pada Tabel 3 dapat dilihat, regangan searah kisi  $a$  untuk fasa aluminium mula-mula tertekan, tapi saat tekanan perah ditambah hingga 300 Pa regangan fasa tertarik, sedang dalam fasa silikon memperlihatkan kecenderungan tertekan yang sama, seperti terlihat pada Gambar 7. Regangan yang terukur dalam setiap fasa sangat anisotropis, dan berpengaruh pada regangan kisi total bahan paduan. Efek tekanan perah pada pembentukan bahan

cor memberikan pola regangan polinomial (kuadratik). Jika diperhatikan pola peregangan kisi dalam fasa aluminium berfluktuasi antara angka 0,05 dan -0,05 sedang fasa silikon berfluktuasi antara angka 0 dan -0,2. Dominasi fasa silikon yang mengalami regangan tekan mengakibatkan bahan paduan AlSi ini mengalami regangan negatif yang berfluktuasi antara angka 0 dan -0,1. Fenomena regangan negatif ini akan sangat menguntungkan bahan paduan bila dikonversikan ke dalam nilai tegangan sisa yang negatif, dimana akan dapat menambah kekuatan dan umur pakai bahan paduan. Logika sederhana mengatakan bila bahan memiliki kekuatan tarik 100 Pa maka dengan adanya tegangan sisa -5 Pa, kekuatan tarik bahan menjadi 105 Pa.

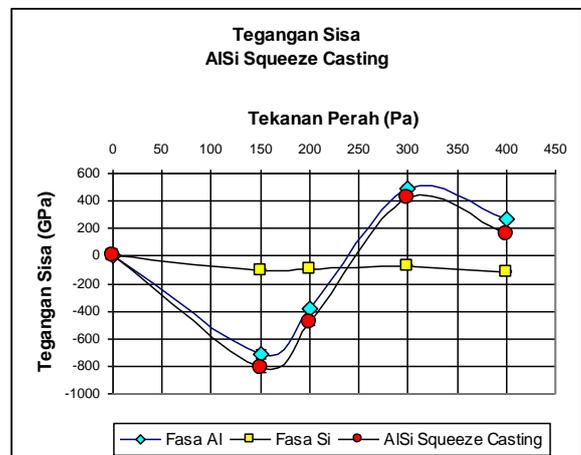


**Gambar 8.** Distribusi medan regangan fasa Al dan Si dalam paduan AlSi *squeeze casting*

### Medan Regangan (*Strain Field*)

Nilai regangan rata-rata untuk seluruh volume yang diiradiasi telah didiskusikan di atas. Tetapi tegangan sisa pada kebanyakan agregat padat, sangat jauh dari kehomogenan. Telah disebutkan terdahulu, keberadaan medan regangan inhomogen menghasilkan suatu pelebaran pada profil difraksi. Semua spesimen paduan AlSi yang diamati pada eksperimen ini memperlihatkan beberapa derajat

pelebaran puncak. Diindikasikan dalam Gambar 8 dimana titik-titik dalam penghalusan dihitung berdasarkan persamaan (4) dengan FWHM model Gaussian yang disusun dalam Tabel 1, medan regangan bervariasi terhadap tekanan perah/cor. Harga aktual medan regangan tidak negatif. Dalam regresi antara 150 Pa hingga 400 Pa, garis medan regangan fasa aluminium cenderung menurun landai secara konstan. Diperkirakan fasa aluminium tidak terlalu dipengaruhi besaran tekanan perah pada saat pembentukan bahan paduan. Sementara fasa silikon, memiliki garis medan regangan berbentuk lembah gaussian, yang mengindikasikan kekuatan peregangan bidang fasa silikon dalam spesimen menuju ke titik awal saat tekanan perah ditambah hingga 400 Pa.



**Gambar 9.** Distribusi tegangan sisa dalam paduan AlSi *squeeze casting*

### Tegangan Sisa (*Residual Stress*)

Jarak  $d$  ( $d$ -spacing) berbanding langsung dengan parameter kisi kristal. Sejalan dengan persamaan (3), maka persamaan (8) dapat digunakan untuk menghitung regangan kisi rata-rata sepanjang arah kristalografi tertentu, dimana  $d$  dan  $d_0$  berturut-turut diganti dengan  $a$  dan  $a_0$ ,  $b$  dan  $b_0$  atau  $c$  dan  $c_0$ . Kisi  $a$ ,  $b$  dan  $c$  merupakan jarak kisi bahan tertegang, dan kisi  $a_0$ ,  $b_0$  dan  $c_0$  adalah

jarak kisi bebas tegangan (referensi). Pada kasus ini tensor regangan disesuaikan dengan simetri kristal. Jumlah komponen bebas dapat direduksi menjadi satu atau dua komponen bebas. Dalam struktur kristal uniaksial, seperti struktur Al atau Si, hanya satu komponen bebas diperlukan untuk menyatakan sifat-sifat tensor secara lengkap<sup>[15]</sup>. Sepanjang arah lain, regangan dapat dihitung menggunakan aljabar tensor. Penentuan komponen regangan sepanjang arah sumbu prinsip sangat dianjurkan, adalah sumbu-*a* untuk fasa Al dan fasa Si dalam aturan struktur konvensional.

Distribusi tegangan sisa dalam setiap fasa dapat diperoleh dari peregangan kisi fasa yang telah dihitung. Selama eksperimen difraksi dilakukan, tak ada tekanan terpakai, sehingga tegangan sisa dalam setiap fasa dianggap hidrostatis. Regangan kisi rata-rata yang didiskusikan di atas, diperoleh dari penghalusan pola difraksi untuk seluruh jangkauan angular  $2\theta$ . Regangan tersebut mewakili harga rata-rata pada beberapa arah dalam bidang difraksi. Pengukuran tegangan ini lebih tepat dengan tegangan hidrostatis daripada tegangan sepanjang arah spesimen tertentu. Tegangan hidrostatis  $\sigma$ , dihitung menggunakan persamaan (7). Pada kondisi ini, regangan  $\varepsilon$  rata-rata diestimasi sepanjang arah dengan acuan orientasi spesimen yang dihitung berdasarkan persamaan (8). Parameter  $E$  dan  $\nu$  yang digunakan dalam perhitungan  $\sigma$  diperoleh dari pengukuran mekanik terpisah yang dilaporkan dalam literatur<sup>[14]</sup>. Untuk bahan zirkaloi pada temperatur kamar, parameter mekanik ini berturut-turut adalah 62,696 GPa dan 0,363. Gambar 9 memperlihatkan tegangan hidrostatis yang dihitung sebagai fungsi tekanan perah. Seperti kelakuan regangan kisi, tegangan hidrostatis terhitung dalam fasa Si adalah tegangan tekan, sementara matriks aluminium campuran antara tegangan tekan dan tarik. Dalam spesimen yang mendapat tekanan perah sekitar 150 dan 200 Pa, tegangan tekan yang terjadi pada fasa Al berturut-

turut adalah sekitar -712,5 GPa dan -383,7 GPa dan tegangan tarik dalam spesimen yang mendapat tekanan perah sekitar 300 dan 400 Pa berturut-turut adalah sekitar 493,4 GPa dan 274,0 GPa. Sedang untuk fasa Si selalu berada pada tegangan tekan (negatif), untuk tekanan perah di atas nilai tegangan sisa tekan berturutan adalah: -101,0; -95,9; -69,6 dan -113,7 GPa. Total dalam spesimen AlSi *squeeze* pada tekanan perah tersebut adalah berturutan, terkandung tegangan sisa sebesar -813,5; -479,6; 423,8 dan 160,3 GPa.

## KESIMPULAN

Dari hasil penelitian di atas dapat disimpulkan bahwa:

1. Kelakuan tegangan sisa hidrostatis bahan paduan AlSi *squeeze casting* dapat ditentukan *via* fenomena peregangan kisi kristal.
2. Pergeseran dan pelebaran puncak pada pola difraksi dapat mengindikasikan terjadinya fenomena tegangan sisa pada bahan.
3. Pada bahan paduan AlSi peregangan kisi didominasi oleh fasa silikon.
4. Tegangan sisa ( $\sigma$ ) hidrostatis dalam bahan paduan AlSi dengan komposisi 97% wt Al dan 3% wt Si berfluktuasi antara -800 GPa dan 400 GPa.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis berterima kasih pada Bapak Dr. Sudaryanto, M.Eng. dan Drs. Gunawan, M.Sc. atas saran/diskusinya, Dr. Mardiyanto, M.Eng., Dr. Azis Khan Jahja, Drs. Sulistiyoso, M.T., Drs. Bambang Sugeng, M.T. dan Imam Wahyono, S.ST. yang telah ikut andil dalam pengambilan data penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Specialty Handbook, 1994, *Aluminium and Aluminium Alloys*.
- [2] Mudjijana dan Hadrizal. 1997. „Analisis Kualitas Produk Gokart

- dari Paduan Aluminium". *Prosiding Pertemuan Ilmiah 1997*, Hal. 146-15. PPSM-BATAN, Jakarta.
- [3] Duskiardi. 2001. „Pengaruh Parameter Proses Terhadap sifat Mekanik dan Strukturmikro Produk Squeeze Casting". Tesis Proram Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik UI, Jakarta.
- [4] Firdaus. 2001. „Perancangan Proses Squeeze Casting untuk Pengembangan Flens Motor Sungai". Tesis Proram Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik UI, Jakarta.
- [5] E. S. Siradj. 2000. *Squeeze Casting*, Kekhususan Teknik Manufaktur Program Pascasarjana Bidang Ilmu Teknik Universitas Indonesia.
- [6] T. Surdia dan Shinroku. 2000. *Pengetahuan Bahan Teknik*, PT. Pradnya Paramita Jakarta, Cetakan kelima.
- [7] D. Antarini. 2004. „Pengaruh Tekanan Proses Cor Perah Terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro Paduan AlSi Hasil Daur Ulang Bahan Piston". Skripsi Gelar Sarjana Pendidikan, Jurusan Fisika Fakultas Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Jakarta.
- [8] Almen, J.O. and Black, P.H. 1963. *Residual Stresses and Fatigue in Metals*, Mc. Graw-Hill, New York.
- [9] Bacon, G.E. 1962. "*Neutron Diffraction*", Oxford University Press.
- [10] Allen A.J, Hutchings M.T., Windsor C.G. 1985. „Neutron diffraction methodes for residual stress fields". *Advances in Physics.* : 34,No.4, page : 445-473.
- [11] KLUG,H.P. and ALEXANDER,L.E., Klug H.P., Alexander L.E. 1974. *X-ray Diffraction Procedures*, 2nd ed., page : 618-708, Wiley, New York.
- [12] Cagliotti G., Paoletti A., Ricci F.P.1958. „*Choice of Collimation for a Crystal Spectrometer for Neutron Diffraction*". *Nuc. Instrum.* :3, page : 223-228.
- [13] Wang Xun Li, Hubbard C.R., Alexander K.B., Becher P.F., Derfandez, J.A. Spooner. 1994. *J.Am. Ceram. Soc.*: 77, page : 1569-1575.
- [14] Parikin dkk. 2000. „Pengukuran Tegangan Sisa Paduan AlSi Dengan Teknik Difraksi Neutron dan Analisis Rietveld". unpublished paper.
- [15] Noyan I.C., Cohen J.B. 1987. „*Residual Stress Measurement by Diffraction and Interpretation*". Springer-Verlag, New York.
- [16] Suminta S. 2011. „Analisis Struktur Kristal Paduan AlSi Hasil Proses Cor Perah dengan metode Rietveld". unpublsh paper.
- [17] Izumi F. 1997. „*A Rietveld-Refinement Program RIETAN-97 for Angle-Dispersive X-Ray and Neutron Powder Diffraction*". NIRIM, Japan.
- [18] Villars P., Calvert L.D. 1991. *Pearson's Handbook of Crystallographic Data for Intermetallic Phases*, 2<sup>nd</sup> edition, Vol.3 & 4, pp. 3824-6 and pp. 4471-2, ASM International, USA.

## RIWAYAT PENULIS

**Parikin**, lahir di Cirebon tanggal 12 November 1966. Menamatkan Strata-1 (S-1) di Universitas Indonesia, FMIPA Jurusan Fisika pada tahun 1992 kemudian menyelesaikan Strata-2 (S-2) pada program STAID-LINK: *Queensland University of Technology (QUT)* di Australia dalam bidang keilmuan Teknologi Material dan Metalurgi tahun 1999. Saat ini bekerja sebagai Peneliti Madya pada Bidang Bahan Industri Nuklir, Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir BATAN, Puspipstek Serpong BANTEN.

