

## RIETVELD ANALYSIS OF HRPD AFTER IMPROVEMENTS

Supandi Suminta, Andika Fajar, and Hery Mugi Rahardjo

Puslitbang Iptek Bahan – BATAN

Kawasan Puspipetek Serpong, Tangerang 15314, Banten

---

### ABSTRACT

**RIETVELD ANALYSIS OF HRPD AFTER IMPROVEMENTS.** Rietveld analysis of diffraction intensity data from three standard samples of Si, Ni and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> obtained by using High Resolution Powder Diffractometer (HRPD) BATAN after improvement has been done. The best result of these refinements shows that fitting quality is better than experimental results before improvement. The refinement results are (Rwp) 11.35%, and (S) 1.4465, 16.96% and 1.1574, and 17.58% and 1.1651 for Ni, Si and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> respectively. The high R value may be due to poor statistics. The best value we can expect is S = 1.1574 for Si phase and S = 1.1651 for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> phase, so the refinement seems to be reasonable.

**Keywords :** Refinement, Structure, Rietveld Method, HRPD

### ABSTRAK

**ANALISIS RIETVELD DATA DIFRAKSI HRPD PASCA PERBAIKAN.** Telah dilakukan analisis Rietveld data intensitas difraksi tiga cuplikan standar Ni, Si dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang diperoleh dari Difraktometer Neutron Resolusi Tinggi (HRPD) BATAN pasca perbaikan. Hasil penghalusan menunjukkan bahwa harga Rwp dan goodness of fitting, S menjadi lebih baik dibanding dengan hasil eksperimen sebelum perbaikan. Untuk fasa Ni diperoleh nilai Rwp = 11,35% dan S = 1,4465, fasa Si diperoleh Rwp = 16,96% dan S = 1,1574. Sedangkan untuk fasa Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> diperoleh Rwp = 17,58% dan S = 1,1651. Tingginya nilai R disebabkan oleh data statistik kurang baik. Nilai terbaik yang dapat dicapai adalah pada S = 1,1574 (fasa Si) dan S = 1,1651 (fasa Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), jadi penghalusan dapat diterima.

**Kata Kunci :** Penghalusan, Struktur, Metode Rietveld, HRPD

---

### PENDAHULUAN

**RIETAN (RIETveld ANalysis)** merupakan suatu paket perangkat lunak (*software*) komputer untuk analisis struktur kristal dari data difraksi neutron maupun difraksi sinar-X menggunakan metode Rietveld yang dikembangkan oleh F. Izumi [1]. Analisis struktur kristal dapat dilakukan melalui dua tahapan penghalusan parameter yakni : Pertama adalah parameter global yaitu penghalusan (*refinement*) parameter untuk mengoreksi titik nol pola difraksi yakni *zero-point shift* dan parameter latar belakang (*background*). Kedua adalah parameter fasa *dependent* yaitu parameter untuk penghalusan intensitas yang terintegrasi yaitu : faktor skala, *preferred-orientation*, parameter profil dan parameter struktur seperti faktor kisi (a,b dan c, sudut  $\alpha$ ,  $\beta$  dan  $\gamma$ ), posisi atom (x,y dan z), faktor okupansi dan vibrasi termal *isotropic* (B). *Output*/hasil penghalusan dari kedua tahapan tersebut adalah grafik profil pola difraksi (*Igor Pro*) dan rangkuman data refleksi Bragg yang terjadi dari hasil penghalusan. Informasi baru data struktur kristal ini menunjukkan hasil yang representatif dari fasa kristal. Data baru struktur kristal tersebut berisi informasi seperti nilai indeks reliabilitas (R), *goodness of fitting*, S, parameter kisi, posisi atom, volume sel satuan, densitas dalam sel satuan, indeks Miller (hkl), jarak antar bidang (d), intensitas perhitungan dan pengamatan, dan data FWHM.

Untuk mengetahui baik tidaknya hasil penghalusan ditunjukkan oleh tingkat nilai indeks reliabilitas (R) dan *goodness of fitting*, S atau Chi-Square ( $\chi^2$ ) pada program GSAS. Besarnya nilai ini mengukur tingkat ketidaksesuaian antara data hasil pengamatan dengan perhitungan. Semakin kecil harga R menunjukkan tingkat kesesuaian antara hasil pengamatan dengan perhitungan semakin baik. Artinya bahwa parameter profil dan parameter struktur kristal yang dimodelkan semakin mendekati harga yang sebenarnya. Atau dapat dikatakan bahwa tingkat harga R semakin kecil menunjukkan bahwa koinsidensi kedua jenis pola lebih baik.

Sejak terpasangnya peralatan HRPD untuk tujuan penelitian ilmu bahan, telah terpasang pula perangkat lunak (*software*) pada komputer Macintosh untuk analisis struktur kristal suatu bahan dengan metode analisis Rietveld. Data difraksi HRPD dianalisis dengan metode Rietveld menggunakan program RIETAN. Refleksi Bragg hasil penghalusan dengan metode Rietveld menghasilkan pola difraksi dan bentuk puncak-puncak yang menggambarkan struktur kristal dari cuplikan standar yang diukur, data FWHM dan posisi sudut puncak yang tepat dapat mengevaluasi dan memberi gambaran resolusi HRPD. Panjang gelombang lambda,  $\lambda$  dapat dihitung berdasarkan hukum Bragg, sehingga dapat digunakan untuk mengkalibrasi  $\lambda$  dari

monokromator menggunakan cuplikan standar Ni dan  $Al_2O_3$  [2].

Sejak tahun 1992 sampai dengan 1995 [3] telah dilaksanakan empat kali workshop dalam pemanfaatan reaktor riset bidang hamburan neutron yang disponsori dan dikoordinir oleh Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN), *Science and Technology Agency* (STA) dan Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI). Program tiga tahun itu dimulai dengan kalibrasi peralatan difraktometer neutron resolusi tinggi (HRPD) dan diperoleh hasil yang baik. HRPD termasuk salah satu perangkat yang potensial untuk mempelajari struktur materi dengan menggunakan berkas neutron, data intensitas difraksi neutron dianalisis dengan metode Rietveld menggunakan program RIETAN.

Namun sejak tahun 1997 peralatan HRPD [4] yang paling banyak diminati ini mulai menurun unjuk kerjanya, disebabkan oleh pengaruh turunya daya operasi reaktor menjadi 15 MW. Jika dibandingkan pola difraksi cuplikan standar  $TiO_2$  untuk *take off angle* monokromator  $89^\circ$ , pada daya reaktor 25 MW dengan 15 MW, *counting rate* masing-masing adalah dari 150 cps menjadi 90 cps. Turunnya *counting rate* karena turunya daya operasi reaktor. Waktu pengukuran yang dibutuhkan untuk *preset count* yang sama berturut-turut dari 34 menjadi 41 jam, sedangkan cacahan *background* yang diperoleh dari analisis Rietveld berturut-turut dari 99 cps menjadi 212 cps. *Background* yang lebih tinggi disebabkan oleh lamanya waktu percobaan.

Dalam beberapa tahun terakhir (tahun 2001) unjuk kerja dari HRPD-P3IB kurang memenuhi persyaratan. Pola difraksi menunjukkan adanya ketidak normalan dalam sistim instrumen, terutama pada sistem yang terkait dengan sistem pencacah. Hal ini terlihat dengan adanya cacahan yang berasal bukan dari cuplikan maupun dari cacahan latarbelakang. Tri Hardi P, dkk [5,6,7] telah mengembangkan rancangan perangkat lunak untuk meningkatkan kualitas data difraksi dengan cara menghilangkan pengaruh ketidaknormalan cacahan yang disebabkan oleh instrumen. Rancangan perangkat lunak yang menggunakan program Visual Basic ini diuji coba pada pola difraksi cuplikan standar Ni dan Si yang diperoleh dengan menggunakan Difraktometer Neutron Resolusi Tinggi (HRPD-P3IB), dan diperoleh hasil yang baik.

Tahun 2001 sistim kontrol dan pengolah data komputer IBM-PS/2 dengan sistim operasi AIX mengalami kerusakan total. Problem ini disebabkan umur komputer IBM-PS/2 yang sudah tua (13 tahun) dan perbaikannya mengalami hambatan karena komponen yang diperlukan sukar untuk diperoleh. Eddy Santoso dan Alan Maulana [8] telah mengembangkan sistim kontrol dan pengolah data berbasis komputer personal (PC) buatan sendiri dari komponen-komponen yang mudah didapat di pasaran. Rancangan perangkat lunak antar muka ini jauh lebih sederhana bila dibandingkan dengan sistem komputer lama (IBM-PS/2) yang telah rusak, baik dari segi fisik

maupun rangkaiannya. Dari hasil pengujian yang telah dilakukan, secara prinsip sistem antar muka ini dapat digunakan untuk mengendalikan Difraktometer Neutron Resolusi Tinggi (HRPD) dengan menambahkan sistem *encoder* supaya penunjukan sudut dapat lebih teliti. Rancangan perangkat lunak sistem antar muka ini menggunakan program Visual Basic dan telah selesai dibuat. Kalibrasi peralatan HRPD telah selesai dilakukan dan hasil-hasil penelitian ini telah dipublikasikan dalam prosiding dan jurnal nasional.

Pada makalah ini diuraikan analisis Rietveld data difraksi cuplikan standar Ni, Si dan  $Al_2O_3$  untuk mengetahui unjuk kerja HRPD pasca perbaikan dan data yang diperoleh dibandingkan dengan data terdahulu. Penghalusan cuplikan standar dilakukan menggunakan metode analisis Rietveld dengan program RIETAN.

## BAHAN DAN TATAKERJA

Cuplikan yang digunakan dalam penelitian ini adalah standar Ni, Si dan  $Al_2O_3$ . Cuplikan serbuk Ni, Si dan  $Al_2O_3$  dimasukkan ke dalam wadah vanadium, kemudian diletakkan pada *sample holder* dan diposisikan hingga berkas neutron tepat (terfokus) mengenai cuplikan.

Intensitas difraksi dari cuplikan serbuk standar Ni, Si dan  $Al_2O_3$ , diukur menggunakan *High Resolution Powder Diffractometer* (HRPD) yang dipasang pada Tabung Pemandu Neutron (NGT) dengan daya reaktor 15 MW, dan monokromator yang digunakan adalah Ge (311), dengan panjang gelombang,  $\lambda = 1,82158 \text{ \AA}$

Pengukuran dilakukan pada suhu ruang tanpa memutar sampel dalam rentang sudut  $2\theta$  antara  $2,5^\circ$ -  $162,5^\circ$  dengan selang tiap data (step)  $0,05^\circ$ . Kondisi pengukuran disajikan pada Tabel 1 berikut :

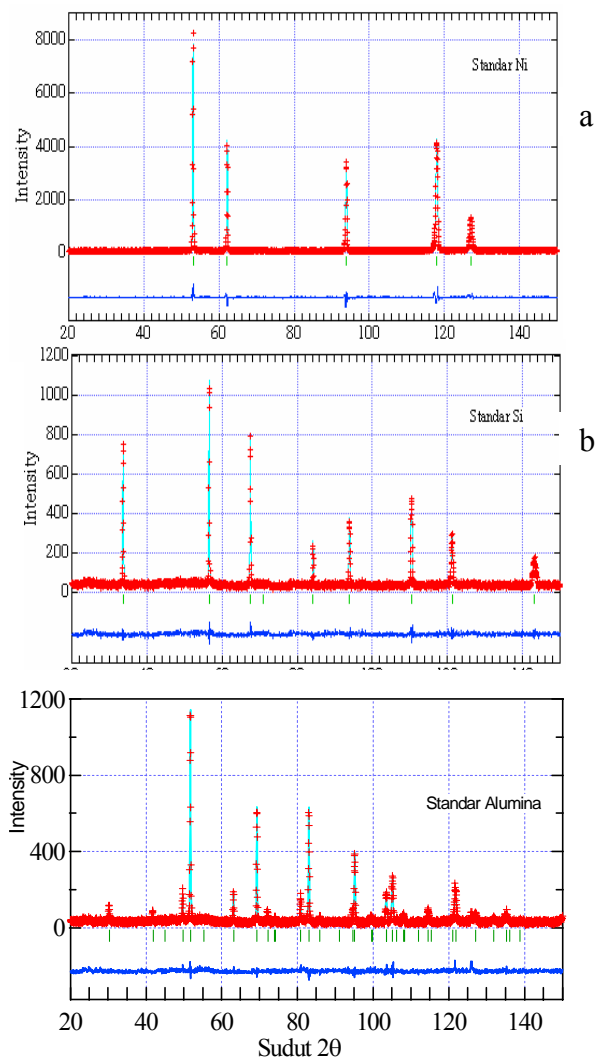
**Tabel 1.** Kondisi pengukuran cuplikan Si, Ni dan  $Al_2O_3$

Cuplikan	Tanggal dan lama pengukuran	Daya Reaktor (MW)	Step (derajat)
$Al_2O_3$ (Alumina)	28 - 12 - 2004 (35 jam)	15	0,05
Si (Silikon)	31 - 12 - 2004 (35 jam)	15	0,05
Ni (Nikel)	02 - 01 - 2005 (35 jam)	15	0,05

HRPD dikontrol oleh komputer personal (PC) dan pengolah data menggunakan software sistim operasi antar muka hasil penemuan Eddy Santoso dan A.Mulyana [8], jadi masing-masing step dan setiap operasi dapat dikendalikan oleh komputer. Setelah pengukuran selesai, data sudut dan cacahan yang diperoleh dikoreksi. Data terkoreksi dikonversi ke dalam komputer Macintosh dan selanjutnya dianalisis dengan metode Rietveld menggunakan program RIETAN.

Penghalusan dengan program RIETAN dilakukan dengan cara mengasumsikan bahwa standar Ni, bersistim kristal kisi *Bravais* kubik (FCC), grup ruang F m 3 m No.225. Standar Si bersistim kristal kisi *Bravais* kubik (FCC), grup ruang F d 3 m No. 227 dan standar Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bersistim kristal kisi *Bravais* Trigonal, grup ruang R -3 c No. 167 *Setting* 2. Data masukan parameter struktur dan kisi untuk standar Ni dan Si mengacu pada acuan [7]. Sedangkan untuk Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pada acuan [9].

## HASIL DAN PEMBAHASAN



**Gambar 1.** Pola difraksi Neutron HRPD-P31B 2004/2005 hasil penghalusan RIETAN dengan *goodness of fitting*, S, a) Standar cuplikan Ni, S = 1,4465; b) Standar cuplikan Si, S = 1,1574 dan c) Standar cuplikan Alumina, S = 1,1651

Gambar 1 adalah bentuk profil pola difraksi hasil penghalusan dengan metode Rietveld menggunakan program RIETAN yang menggambarkan kecocokan (*fitting*) intensitas difraktogram berkas neutron antara pengamatan dengan perhitungan. Tanda (+) adalah data hasil pengamatan, garis malar (—) adalah data

perhitungan, garis vertikal (|) di bawahnya adalah posisi puncak Ni, Si dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan garis mendatar (—) di bawah garis vertikal adalah gambaran selisih pengamatan dengan perhitungan. Hasil akhir penghalusan ketiga standar Ni, Si dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> memberikan data parameter struktur dan parameter kisi disajikan pada Tabel 2. Terlihat parameter kisi hasil penghalusan RIETAN pada ketiga cuplikan menunjukkan hasil yang memuaskan dengan ketelitian sampai dengan lima digit di belakang koma, yakni a = 3,52568(9) Å (Ni) dan tiga/empat digit di belakang koma masing-masing a = 5,431(2) Å (Si), sedangkan (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) a = b = 4,7582(7) Å dan c = 12,989(1) Å.

**Tabel 2:** Data parameter kisi dan struktur cuplikan standar Ni, Si dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hasil penghalusan RIETAN.

Ni (Nikel)						
Parameter kisi : a=b=c = 3,52568(9) Å, V= 43,825(2) Å <sup>3</sup> , grup ruang : F m 3 m (FCC)						
Atom	Posisi	Occ	x	y	z	B <sub>iso</sub>
Ni	4b	1	0,5	0,5	0,5	0,38(3)
Si (Silikon)						
Parameter kisi : a=b=c = 5,431(2), V= 160,19(1)Å <sup>3</sup> , grup ruang : F d 3 m (FCC)						
Atom	Posisi	Occ	x	y	z	B <sub>iso</sub>
Si	8a	1	0,0	0,0	0,0	0,64(6)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Alumina)						
Parameter kisi : a = b = 4,7583(7), c = 12,989(1) V= 254,69(6)Å <sup>3</sup> , grup ruang : R -3 c (Trigonal)						
Atom	Posisi	g	x	y	z	B <sub>iso</sub>
Al	12(c)	1	0,0	0,0	0,3522(3)	2(1)
O	18(e)	1	0,3052(4)	0,0	0,25	0,16(8)

Data kualitas *fitting* standar Ni, Si dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hasil penghalusan RIETAN sesudah faktor latar (*background*) dikoreksi, berupa harga bobot kualitas *fitting* atau disebut dengan Rwp (*Residual weight pattern*) dan S = *goodness of fitting* disajikan pada Tabel 3.

**Tabel 3.** Data perbandingan kualitas *fitting* tahun 2001 dengan 2005 cuplikan Ni, Si dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hasil penghalusan RIETAN.

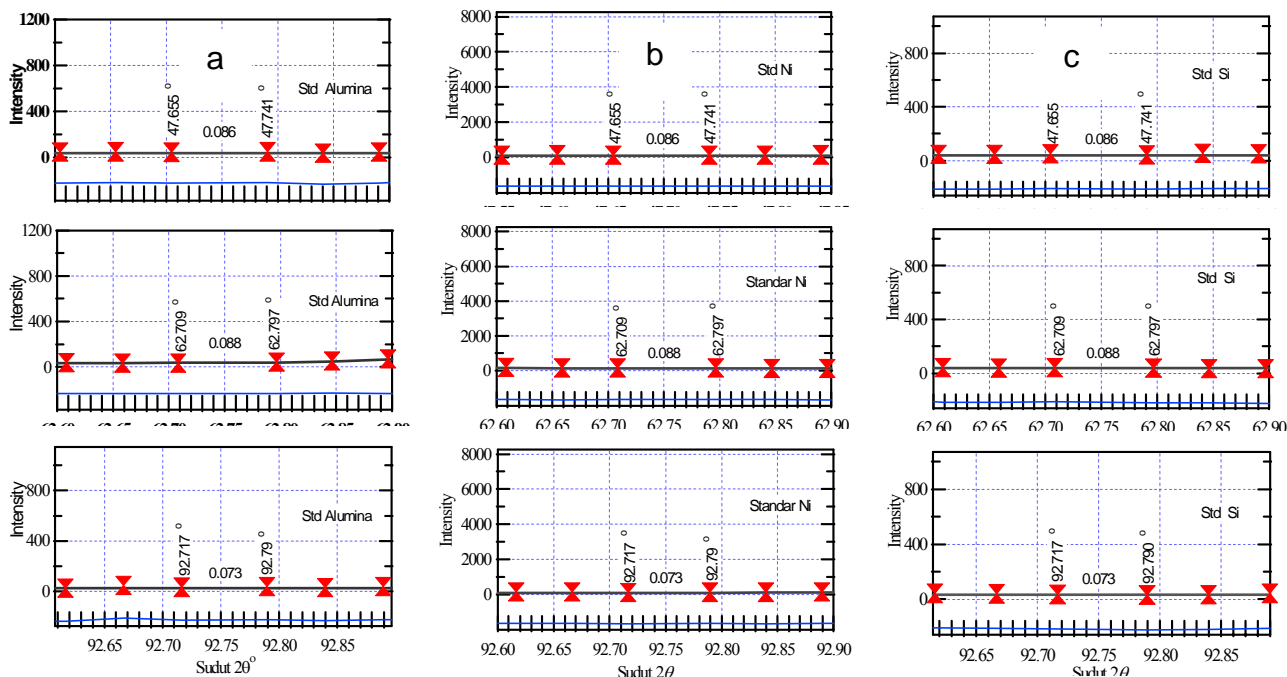
Cuplikan	Rwp %		Rp %		S	
	Th2001	Th2005	Th2001	Th2005	Th 2001	Th 2005
Ni	23,01	11,35	16,92	7,85	3,2230	1,4465
Si	27,40	16,96	20,49	14,66	2,4336	1,1574
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	17,58	-	13,20	-	1,1651

Profil pola difraksi neutron hasil penghalusan RIETAN untuk cuplikan standar Ni, Si dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> diambil pada rentang sudut 2θ = 20° – 150° (Gambar 1), masing-masing memberikan harga kualitas *fitting* (*goodness of fitting*), S = 1,4465 (Ni), 1,1574(Si) dan 1,1651 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Harga kualitas *fitting* ini terlihat bervariasi. Fasa Si dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> menunjukkan kategori memuaskan dan diterima, sedangkan fasa Ni mendekati daerah nilai kritis, namun masih dapat diterima dengan kategori tidak memuaskan. Menurut R.A.Young [10], daerah kritis berada pada S = 1,5, sedangkan kategori memuaskan dan diterima pada S

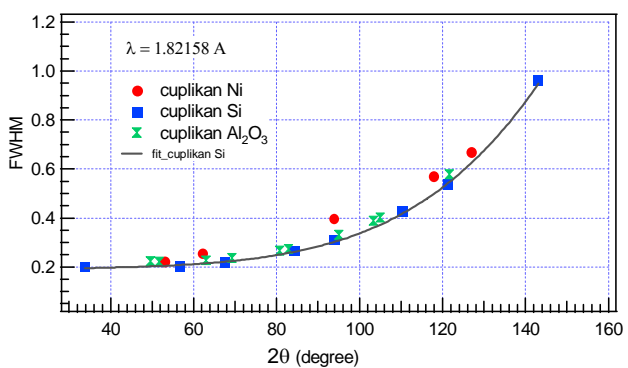
$\leq 1,35$ , sedangkan antara 1,35 dan 1,5 diterima dengan kategori tidak memuaskan.

Pada tabel di atas dicantumkan juga hasil penghalusan untuk cuplikan Ni dan Si dari data intensitas difraksi yang diperoleh sebelum perbaikan peralatan HRPD

(tahun 2001). Terlihat hasil penghalusan untuk data pasca perbaikan memberikan harga kualitas *fitting* yang lebih baik. Berikut ini akan dibahas beberapa kemungkinan perbedaan dengan eksperimen terdahulu yang kemungkinan menyebabkan hasil penghalusan lebih baik..



**Gambar 2.** Difraktogram neutron a) Standar Alumina masing-masing  $\Delta$  step width = 0,086, 0,088, dan 0,073, b) Standar Ni masing-masing  $\Delta$  step width = 0,086, 0,088, dan 0,073 dan c) Standar Si masing-masing  $\Delta$  step width 0,086, 0,088, dan 0,073



**Gambar 3.** Kurva resolusi HRPD pada  $\lambda = 1,82158 \text{ \AA}$

Pertama, pada data eksperimen yang lama, lebar langkah pengukuran dikoreksi menjadi tetap. Sedangkan pada data yang baru tidak demikian. Sebagaimana terlihat pada Gambar 2 di bawah, lebar langkah pengukuran adalah 0,05°, tetapi pada daerah perpindahan detektor lebar langkah menjadi tidak konstan. Misalnya pada perpindahan dari detektor 10 ke 11 di sekitar sudut 47°, dari detektor 13 ke 14, di sekitar sudut 62° dan dari detektor 19 ke 20, di sekitar sudut 92° lebar langkahnya masing-masing 0,086°, 0,088° dan 0,073°. Hal ini tidak dapat dihindarkan karena perbedaan efisiensi antara satu

detektor dengan detektor lainnya, sehingga dilakukan koreksi terhadap posisi 2-theta untuk setiap detektor.

Selanjutnya mengenai resolusi peralatan HRPD. Dari hasil analisis Rietan, diperoleh FWHM dari setiap puncak difraksi. Resolusi peralatan ditentukan dengan membuat kurva antar FWHM dengan sudut hamburan 2θ untuk ketiga cuplikan yang diukur, seperti dilihat pada Gambar 3. Sampai dengan sudut 120° nilai FWHM masih di bawah 0,6, setelah itu naik dengan cepat. Hasil yang diperoleh ini sama dengan resolusi peralatan sebelum perbaikan, sehingga dapat dikatakan tidak berkaitan dengan baiknya hasil penghalusan.

## KESIMPULAN

Dari pengamatan pola difraksi, data parameter kisi dan struktur serta refleksi Bragg yang terjadi pada standar Ni, Si dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, hasil penghalusan struktur kristal ketiga fasa Ni, Si dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dengan metode Rietveld dapat disimpulkan sebagai berikut :

Hasil terbaik dari penghalusan pola difraksi bahan standar Ni, Si dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, menunjukkan keberadaan tiga harga kualitas *fitting* (Rwp dan *goodness of fitting*, S) yang beragam :

- dari standar Ni diperoleh nilai  $R_{wp} = 11,35\%$  dan  $S = 1,4465$  yang masih dapat diterima namun kurang memuaskan.
- dari standar Si diperoleh  $R_{wp} = 16,96\%$  dan nilai  $S = 1,1574$  yang dapat diterima dan memuaskan
- dari standar  $Al_2O_3$  diperoleh  $R_{wp} 17,58\%$  dan nilai  $S = 1,1651$  yang dapat diterima dan memuaskan.
- hasil penghalusan model struktur kristal cuplikan standar Ni, Si dan  $Al_2O_3$  dari intensitas difraksi neutron pasca perbaikan memberikan kualitas *fitting* yang lebih baik dibanding data difraksi yang diperoleh sebelum perbaikan peralatan HRPD. Resolusi peralatan pun masih baik dan siap digunakan untuk penelitian ilmu bahan.

Tingginya nilai R mungkin disebabkan oleh data statistik (*background*) yang kurang baik, disebabkan lamanya waktu eksperimen (35 jam) dan fluks neutron yang rendah.

#### Saran

Hasil penelitian ini dapat diselesaikan sesuai kondisi instrumen pada saat ini, namun masih perlu peningkatan. Untuk kegiatan pengembangan disarankan sebelum dianalisis dengan metode Rietveld data intensitas difraksi neutron hasil pengukuran HRPD BATAN, dilakukan koreksi terhadap data intensitas seperti *background*, pengaruh hamburan dari *sample can*.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada Kepala Balai Spektrometri yang telah membantu dan memberikan dorongan hingga selesainya karya tulis ilmiah ini. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada kepala P3IB, staf dan teknisi Balai Spektrometri serta ketua beserta anggota KPTF dan semua pihak yang telah membantu dan memberikan dorongan hingga selesainya karya tulis ilmiah ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. F. IZUMI, A Rietveld Refinement Program Rietan-94 for Angle-Dispersive X-Ray and Neutron Powder

- Diffraction, National Institute for Research in Inorganic Materials, 1-I Namiki, Tsukuba, Ibaraki 305, (1996)
2. PRASUAD, GUNAWAN, RIDWAN, TRIHARDI DAN AGUNG W.K., Karakterisasi difraktometer Neutron Serbuk Resolusi Tinggi, (HRPD, DN3 PPSM-BATAN), Progress Report Hamburan Neutron, PPSM-BATAN, Volume 1, 1996.
3. MASONGKOHADI, RIDWAN, GUNAWAN dan PRASUAD, Improvement of The Hig-Resolution Powder Diffractometer (HRPD), Progress Report Hamburan Neutron, PPSM-BATAN, Volume 1, 1996.
4. ABARRUL IKRAM, Pemberdayaan Fasilitas Hamburan Neutron BATAN Serpong, Prosiding Seminar Nasional Hamburan Neutron dan Sinar-X, ISSN 1410-7686, Serpong, 13 Mei 1998.
5. TRI HARDI P, EVVY K, BHAROTO, SUPANDI DAN HERRY M, Perancangan Perangkat Lunak Data Difraksi Neutron pada bahan amorf, Prosiding Seminar Nasional Hamburan Neutron dan Sinar-X, ke 4 ISSN 1410-7686, Serpong, 06 Juni 2001.
6. TRIHARDI P DAN SUPANDI., Perancangan Perangkat Lunak Untuk Meningkatkan Kualitas Data Difraksi Neutron, Prosiding Seminar Nasional Hamburan Neutron dan Sinar-X, ke 4 ISSN 1410-7686, Serpong, 06 Juni 2001.
7. SUPANDI DAN TRIHARDI P., Analisis RIETAN Data Difraksi Terkoreksi Dari Cuplikan Standar Ni dan Si , Prosiding Seminar Nasional Hamburan Neutron dan Sinar-X, ke 4 ISSN 1410-7686, Serpong, 06 Juni 2001.
8. EDDY SANTOSO DAN ALAN MAULANA., Pembuatan Antarmuka Antara Difraktometer Neutron Resolusi Tinggi (HRPD) dan Komputer Pribadi, Prosiding Seminar Nasional Hamburan Neutron dan Sinar-X, ke 5 ISSN 1410-7686, Serpong, 02 Juli 2003.
9. ENKIR SUKIRMAN, GUNAWAN, SUTIARSO, EDY SANTOSO, Kalibrasi Difraktometer Neutron JICA, Progress Report Hamburan Neutron, Volume 1, PPSM-BATAN (1996).
10. R.A. YOUNG, The Rietveld Method, International Union of Crystallography Oxford University, 1996.

