

PEMBENTUKAN NANOPARTIKEL PADUAN CoCrMo DENGAN METODA PEMADUAN MEKANIK

Sulistioso Giat Sukaryo dan Wisnu Ari Adi

Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir – BATAN

Kawasan Puspipstek Serpong, Gedung 41, Tangerang 15314

E-mail : sulistioso@gmail.com

Masuk tanggal : 06-02-2012, revisi tanggal : 12-03-2012, diterima untuk diterbitkan tanggal : 21-03-2012

Intisari

PEMBENTUKAN NANOPARTIKEL PADUAN CoCrMo DENGAN METODA PEMADUAN MEKANIK. Metoda pemaduan mekanik adalah reaksi padatan dari beberapa logam dengan memanfaatkan proses deformasi untuk membentuk suatu paduan. Pada penelitian ini dibuat paduan Co-Cr-Mo dengan proses milling basah dengan variasi waktu milling selama 3, 5, 10, 20, dan 30 jam. Proses milling basah sangat efektif untuk mencegah terjadinya oksidasi dan juga memicu pembentukan paduan Co-Cr-Mo dengan baik. Hasil XRD menunjukkan bahwa telah terjadi pertumbuhan fasa γ pada durasi milling 3, 5, 10, 20, dan 30 jam, berturut-turut sebesar 42,80 %; 67,61 %; 82,94 %; 84,63 % dan 88,92 %. Ukuran kristalit fasa γ sebesar 25,9 nm ; 12,5 nm ; 5,1 nm dan 4,9 nm seiring dengan meningkatnya waktu milling. Disimpulkan bahwa telah berhasil dilakukan pembuatan paduan nanokristalin Co-Cr-Mo dengan metode pemaduan mekanik lebih dari 85 % dengan waktu milling minimum selama 30 jam.

Kata kunci : Paduan Co-Cr-Mo, Pemaduan mekanik, Nano-kristalin

Abstract

MANUFACTURING OF Co-Cr-Mo ALLOY NANO-PARTICLE BY USING MECHANICAL ALLOYING. Synthesis of Co-Cr-Mo nano-crystalline by mechanical alloying has been carried out. Mechanical alloying is a solid state reaction of some metals by utilizing the deformation process to form an alloy. In this research, parameter milling time used for making Co-Cr-Mo alloy by wet milling process is 3, 5, 10, 20 and 30 h. Wet milling process is very effective to prevent oxidation and triggers the formation of fine Co-Cr-Mo alloys. Results of XRD pattern refinement shows that Co-Cr-Mo alloys was growth by percentage approximately around 42.80%, 67.61%, 82.94%, 84.63% and 88.92% for milling time 3, 5, 10, 20, and 30 h, respectively. Otherwise, crystalline size measurement after milling time 5, 10, 20, and 30 h obtained around 25.9 nm, 12.5 nm, 5.1 nm and 4.9 nm, respectively. This research concluded that the optimum milling time could obtained synthesizes nano-crystalline of Co-Cr-Mo alloy more than 85% is 30 h.

Keywords : Co-Cr-Mo alloy, Mechanical alloying, Nano-crystalline

PENDAHULUAN

Kerusakan pada tulang karena retak atau patah sering terjadi pada manusia. *Bone plate* merupakan komponen yang digunakan sebagai media pada proses pemulihan tulang retak atau patah. Penggunaan paduan logam sebagai substrat implan tulang terus berkembang sesuai dengan meningkatnya kebutuhan tulang buatan pada manusia. Logam yang umum digunakan sebagai material implan

diantaranya adalah baja tahan karat (*stainless steel*), paduan Co-Cr dan paduan titanium^[1-2]. Material implan dari bahan baja tahan karat memiliki ketahanan korosi yang kurang baik, dan apabila menggunakan bahan paduan logam berbasis titanium harganya relatif mahal. Sedangkan paduan logam berbasis kobalt memiliki ketahanan korosi dan biokompatibilitas untuk endoprostetik masih dibawah kualitas paduan titanium, namun lebih baik dari baja tahan karat.

Harga bahan dasar paduan berbasis kobalt ini lebih murah dibandingkan harga titanium dan sifat mekaniknya lebih baik dari paduan titanium.

Pada penelitian ini akan dilakukan sintesis paduan logam berbasis kobalt, yaitu paduan Co-Cr-Mo dengan menggunakan teknik pemaduan mekanik (*mechanical alloying*). Teknik pemaduan mekanik ini dilakukan karena ketiga unsur tersebut memiliki perbedaan temperatur cair yang sangat besar^[3-4]. Namun hal yang sangat menarik untuk dipahami adalah mekanisme pembentukan paduan Co-Cr-Mo dengan teknik pemaduan mekanik. Metoda ini adalah sebuah teknik pencampuran melalui reaksi padatan (*solid state reaction*) dari beberapa logam dengan memanfaatkan proses deformasi untuk membentuk suatu paduan^[5-7].

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui mekanisme dan pengaruh waktu milling terhadap pembentukan paduan nano-kristalin Co-Cr-Mo sehingga diperoleh paduan Co-Cr-Mo dengan proses pembuatan yang mudah dan memiliki sifat mekanik yang unggul.

PROSEDUR PERCOBAAN

Peralatan yang digunakan untuk metode pemaduan mekanik adalah *high energy milling* (HEM) PW700i *mixer/mill* yang terdapat di laboratorium Bidang Bahan Industri Nuklir (BBIN), Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir (PTBIN), Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) dengan spesifikasi *normal speed 1300 rpm, run time 90 menit, of time 30 menit, dan on-off cycle 1 kali*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. HEM ini terdiri dari sebuah wadah (*vial*) yang di dalamnya terdapat bola-bola (*ball mill*) yang berputar dan berfungsi untuk menghancurkan bahan tersebut. *Vial* ini terbuat dari bahan baja tahan karat berbentuk silinder dengan panjang 76 mm dan diameter 51 mm. Sedangkan bola-bola pengaduk juga terbuat dari bahan baja tahan karat dengan diameter bola 12 mm. Paduan Co-Cr-Mo

dibuat sebanyak 15 gram yang terdiri dari campuran antara kobalt (Co), krom (Cr), molibdenum (Mo), mangan (Mn), dan silikon (Si). Unsur-unsur tersebut di atas berasal dari produk Merck yang memiliki tingkat kemurnian lebih dari 99,8%, dengan perbandingan persentase berat sama dengan Co : Cr : Mo : Mn : Si = 54,8 : 36 : 6 : 2 : 1,2. Berdasarkan teorema *mesh ratio* sama dengan 5, untuk massa sampel sebanyak 15 gram diperlukan massa bola-bola sejumlah 75 gram. Unsur – unsur tersebut dicampur di dalam *vial* dan ditambahkan toluen untuk menghindari terjadinya oksidasi, penambahan toluen lazim disebut dengan proses milling basah (*wet milling*).

Pada penelitian ini, sampel Co-Cr-Mo dimiling dengan variasi waktu milling selama 1 jam, 3 jam, 5 jam, 10 jam, 20 jam, dan 30 jam di suhu ruang. Pengamatan struktur mikro sampel dilakukan dengan menggunakan SEM (*scanning electron microscope*) JEOL. Sedangkan pengamatan kualitas dan kuantitas fasa-fasa yang ada di dalam sampel menggunakan peralatan *x-ray diffractometer (XRD)* merek Philip, tipe PW1710. Pengukuran pola difraksi sampel dilakukan dengan berkas sinar-x dari *tube anode Cu* dengan panjang gelombang, $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$, *mode: continuous-scan, step size : 0,02°*, dan *time per step : 0,5 detik*. Analisis profil difraktometer sinar-x yang diperoleh dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak program RIETAN (*rietveld analysis*). Program RIETAN ini dibuat oleh Fuji Izumi pada tahun 1994^[8]. Karakterisasi SEM dan XRD ini dilakukan di Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir-BATAN.

HASIL DAN PEMBAHASAN

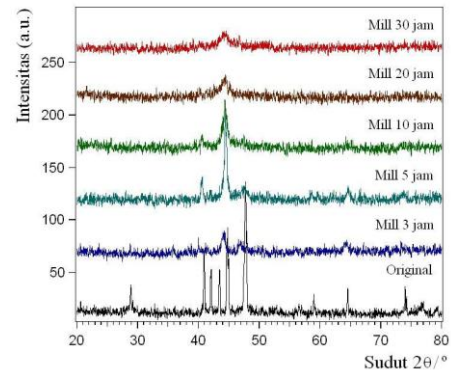
Proses pemaduan mekanik ini sangat berbeda dengan teknik konvensional, seperti proses *sintering* maupun peleburan (*melting*) dan reaksi kimia. Derajat deformasi yang dicapai pada teknik

konvensional ini jauh lebih rendah dibandingkan dengan teknik pemaduan mekanik^[9-10].

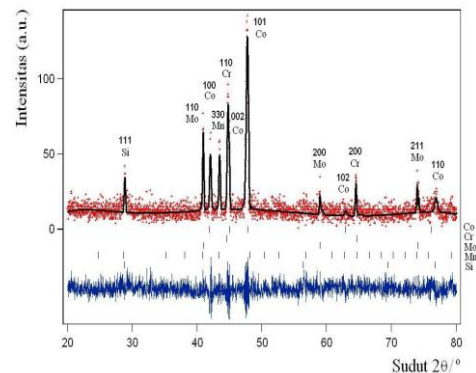
Gambar 1 menunjukkan pola difraksi sinar-x sampel sebelum milling (*original*) dan setelah milling selama 3, 5, 10, 20, dan 30 jam. Pada Gambar 1 tampak bahwa sampel setelah milling selama 3 jam, intensitas dari puncak-puncak yang dimiliki oleh Co, Cr, Mo, Mn, dan Si sangat rendah dibandingkan waktu milling yang lain. Penurunan intensitas dari Co, Cr, Mo, Mn, dan Si ini diduga karena sampel telah berubah menjadi amorf dan fasa lain. Hal ini terlihat dari munculnya puncak baru dengan intensitas yang relatif cukup tinggi yang berada pada sudut disekitar $2\theta = 44^\circ$. Kemudian setelah milling selama 5 jam, intensitas dari puncak baru ini mulai meningkat. Hal ini menunjukkan terjadinya kristalisasi fasa baru tersebut. Pada proses milling selanjutnya, intensitas dari puncak baru ini mulai menurun lagi dan melebar. Hal ini diduga telah terjadi pengecilan ukuran partikel dan kristalinitasnya. Berdasarkan hasil pengukuran difraksi sinar-x tersebut, perlu dilakukan analisis dan identifikasi fasa untuk masing-masing kondisi. Selama proses pemaduan mekanik serbuk-serbuk Co, Cr, Mo, Mn, dan Si secara periodik terjebak diantara bola-bola yang saling bertumbukan dan akan terdeformasi. Bola-bola yang saling bertumbukan menyebabkan deformasi plastis yang besar pada serbuk-serbuk tersebut dan terjadi penyatuan dingin (*cold welding*) sesaat setelah terdeformasi dan terjadi dalam waktu yang singkat secara elementer^[11]. Seiring dengan kenaikan waktu milling akan menyebabkan fraksi volum unsur - unsur padu semakin mengecil, dan terbentuk fasa baru. Pada penelitian ini, unsur-unsur padu Co, Cr, Mo, semakin mengecil dan tumbuh fasa baru yaitu fasa γ ^[12].

Penghalusan (*refinement*) pola difraksi sinar-x pada campuran Co, Cr, Mo, Mn, dan Si sebelum milling ditunjukkan pada Gambar 2. Sedangkan parameter *criteria*

(factor R) dan *goodness of fit* (S) untuk penghalusan pola difraksi sinar-x hasil proses milling basah pada campuran di atas ditunjukkan pada Tabel 1. Pada awalnya campuran hanya terdiri dari serbuk-serbuk Co, Cr, Mo, Mn, dan Si berturut-turut sebesar 54,8 % ; 36 % ; 6 % ; 2 % ; dan 1,2 % berat.



Gambar 1. Pola difraksi sinar-x, sesuai dengan perubahan waktu milling

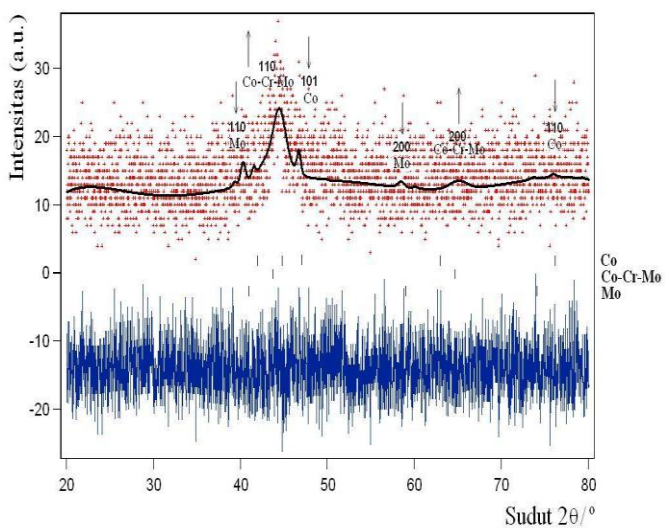


Gambar 2. Hasil penghalusan pola difraksi sinar-x pada campuran Co, Cr, Mo, Mn dan Si sebelum proses milling

Sedangkan penghalusan pola difraksi sinar-x pada campuran Co, Cr, Mo, Mn, dan Si setelah milling selama 3 jam ditunjukkan seperti pada Gambar 3. Pada Gambar 3 tampak bahwa paduan Co, Cr, Mo, Mn, dan Si setelah proses milling selama 3 jam, intensitas dari puncak-puncak yang dimiliki oleh Co, Cr, Mo, Mn, dan Si hampir hilang sedangkan intensitas puncak-puncak dari Cr masih terlihat. Hilangnya intensitas dari Co, Cr, Mo, Mn, dan Si ini diduga menjadi *amorphous* dan bereaksi membentuk fasa lain.

Tabel 1. Parameter kriteria (faktor R) dan pencocokkan pola difraksi (S) untuk penghalusan hasil pengujian XRD pada campuran Co, Cr, Mo, Mn dan Si

Fasa Co ^[9]		Fasa Cr ^[10]		Fasa Mn ^[11]	
Grup ruang : P6 ₃ /mmc (194) Sistem kristal : heksagonal Parameter kisi : a = b = 2,478(2) Å, dan c = 4,060(1) Å		Grup ruang : Im3m (229) Sistem kristal : kubik Parameter kisi : a = b = 2,861(3) Å, dan c = 2,861(3) Å		Grup ruang : Im3m (229) Sistem kristal : kubik Parameter kisi : a = b = 3,112(3) Å, dan c = 3,112(3) (3) Å	
Faktor R		R _{wp} = 27,79	R _p = 28,80	S = 1,44	
R _I = 15,57	R _F = 16,46	R _I = 15,43	R _F = 13,67	R _I = 19,00	R _F = 15,75



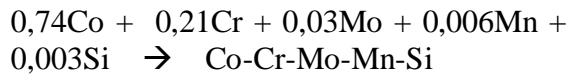
Gambar 3. Hasil penghalusan pola difraksi sinar-x pada campuran Co, Cr, Mo, Mn, dan Si setelah milling selama 3 jam

Gambar 3 diperlihatkan hasil penghalusan pola difraksi sinar-x sampel yang dimiling selama 3 jam. Tampak bahwa puncak-puncak Co, Cr, Mo, Mn, dan Si, terutama puncak tertinggi Co bidang (101) dan Mo bidang (110) mulai menurun yang ditandai dengan simbol panah ke bawah (↓). Dan tampak mulai terjadi pertumbuhan puncak disekitar sudut 2θ = 44° dan 65° yang ditandai dengan simbol panah ke atas (↑). Pembentukan fasa stabil pada hasil pemaduan mekanik ini adalah larutan padat kobalt, molibdenum, mangan, dan silikon yang larut padat ke dalam sel satuan khromium membentuk fasa γ. Identifikasi fasa γ memiliki struktur kristal kubik (FCC), dengan parameter kisi a = b = c = 3,153^[13].

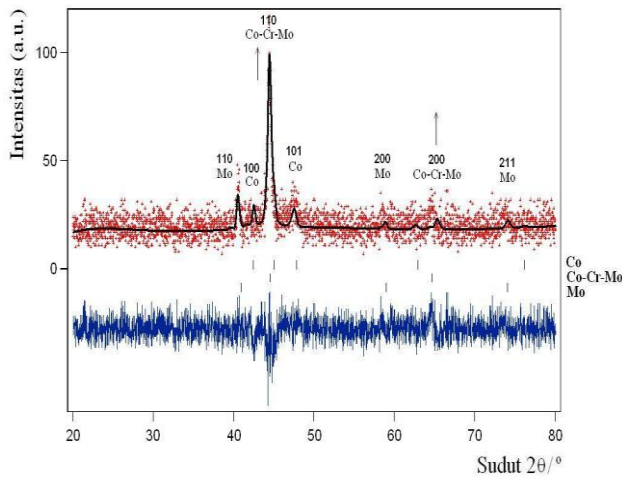
Sehingga berdasarkan hasil penghalusan pola difraksi sinar-x menunjukkan bahwa sampel terdiri dari 3 fasa, yaitu Co, fasa γ dan Mo. Fraksi massa dari fasa Co, fasa γ dan Mo berturut-turut sebesar 52,49 %; 42,80 % dan 4,71 %, sehingga puncak-puncak yang tumbuh merupakan puncak fasa γ bidang (111) dan bidang (200).

Hasil penghalusan dari pola difraksi sinar-x pada proses milling selama 5 jam ditunjukkan pada Gambar 4. Berdasarkan hasil penghalusan terlihat bahwa sebagian intensitas puncak-puncak Co dan Mo menurun secara signifikan, kecuali puncak dari Co bidang (101) dan Mo bidang (110). Pertumbuhan fasa γ meningkat menjadi sebesar 67,61 % dan fasa Co dan Mo menurun berturut-turut menjadi 29,19 % dan 3,20 %. Dari gambar pola difraksi sinar-x tersebut tampak puncak-puncak fasa Co masih banyak terlihat walaupun intensitasnya mulai menurun secara signifikan (Gambar 4). Hal ini berarti sebagian besar serbuk Co dan Mo telah bereaksi membentuk fasa γ.

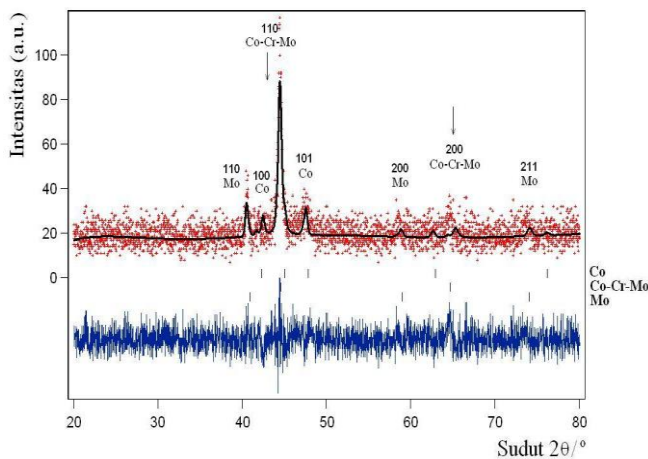
Reaksi kimia ideal dari proses pemaduan mekanik ini diharapkan adalah :



Walaupun pada kenyataannya reaksi tersebut tidak sempurna dan masih menyisakan sejumlah Co dan Mo.



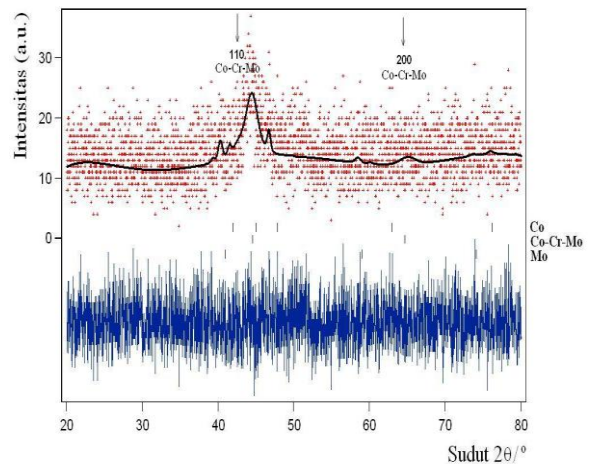
Gambar 4. Penghalusan pola difraksi sinar-x sampel setelah milling selama 5 jam dengan faktor R (*criteria of fit*), $R_{wp} = 23,57$ dan $R_p = 18,61$ sedangkan faktor S yang merupakan *goodness of fit*, $S = 1,08$



Gambar 5. Penghalusan pola difraksi sinar-x setelah milling selama 10 jam dengan faktor R (*criteria of fit*), $R_{wp} = 23,34$ dan $R_p = 18,50$, sedangkan faktor S yang merupakan *goodness of fit*, $S = 1,07$

Hasil penghalusan dari pola difraksi sinar-x sampel setelah milling 10 jam ditunjukkan pada Gambar 5. Tampak pada Gambar 5 bahwa intensitas puncak Co dan Mo menurun secara signifikan dan masih terlihat intensitas tertinggi dari Co pada bidang (101) dan Mo pada bidang (110). Namun intensitas puncak fasa Co-Cr-Mo juga menurun dan melebar. Hal ini menunjukkan bahwa telah terjadi pengecilan ukuran kristalit dari fasa Co-Cr-Mo. Hasil penghalusan dari pola difraksi sinar-x tersebut menunjukkan bahwa fraksi massa dari Co, Mo, dan Co-

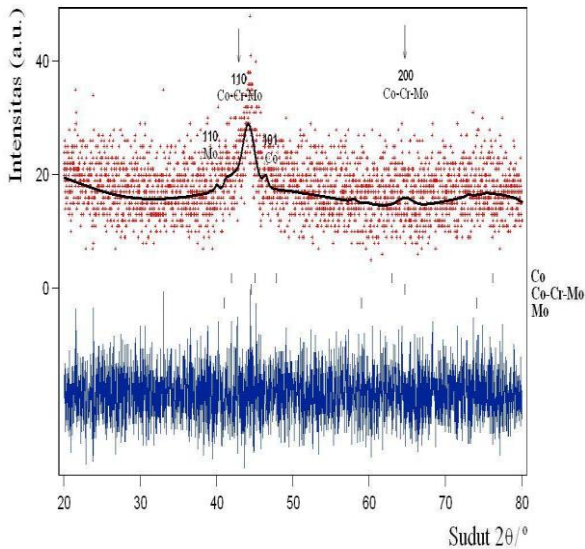
Cr-Mo berturut-turut sebesar 14,17 %; 82,94 % dan 2,89 %.



Gambar 6. Penghalusan pola difraksi sinar-x sampel setelah milling selama 20 jam dengan faktor R (*criteria of fit*), $R_{wp} = 27,66$ dan $R_p = 21,81$ sedangkan faktor S yang merupakan *goodness of fit*, $S = 1,06$

Hasil penghalusan dari pola difraksi sinar-x sampel setelah milling 20 jam ditunjukkan pada Gambar 6. Hasil penghalusan dari pola difraksi sinar-x pada sampel yang telah dimiling selama 20 jam menunjukkan bahwa fraksi massa dari Co, Mo, dan Co-Cr-Mo berturut-turut sebesar 12,81 % ; 2,56 % dan 84,63 %.

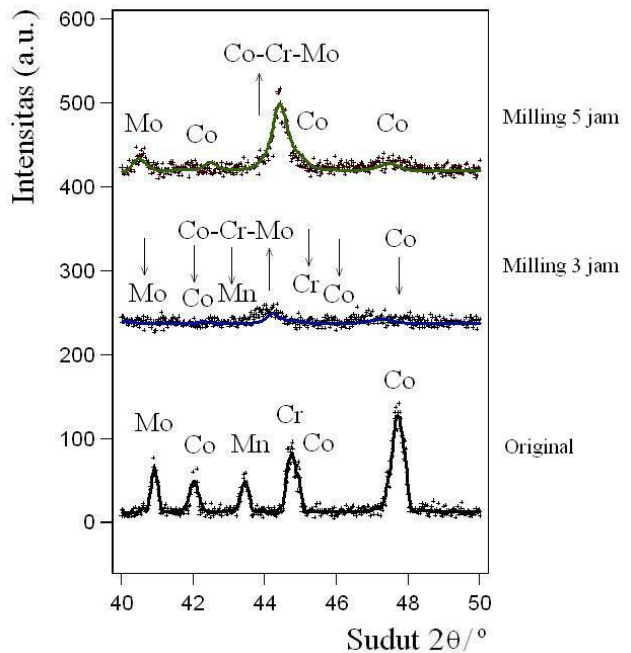
Gambar 7 menunjukkan hasil penghalusan dari pola difraksi sinar-x sampel setelah milling 30 jam. Pada Gambar 7 terlihat bahwa fraksi massa dari Co, Mo, dan Co-Cr-Mo berturut-turut sebesar 9,71 % ; 1,37 % dan 88,92 %. Berdasarkan hasil penghalusan pola difraksi sinar-x pada sampel tersebut menunjukkan bahwa perubahan jumlah fraksi massa masing-masing fasa relatif tidak signifikan bila dibandingkan dengan sampel setelah dimiling selama 10 jam. Prosentase unsur Co dan Mo menurun secara signifikan menjadi kurang lebih 10 %. Penurunan ini disebabkan kedua unsur tersebut telah bereaksi membentuk fasa γ . Hal ini terlihat dengan semakin meningkatnya fraksi volume fasa γ menjadi 88,92 % berdasarkan hasil perhitungan Rietveld.



Gambar 7. Penghalusan pola difraksi sinar-x sampel setelah milling selama 30 jam dengan faktor R (*criteria of fit*), $R_{wp} = 24,78$ dan $R_p = 19,69$ sedangkan faktor S yang merupakan *goodness of fit*, $S = 1,05$

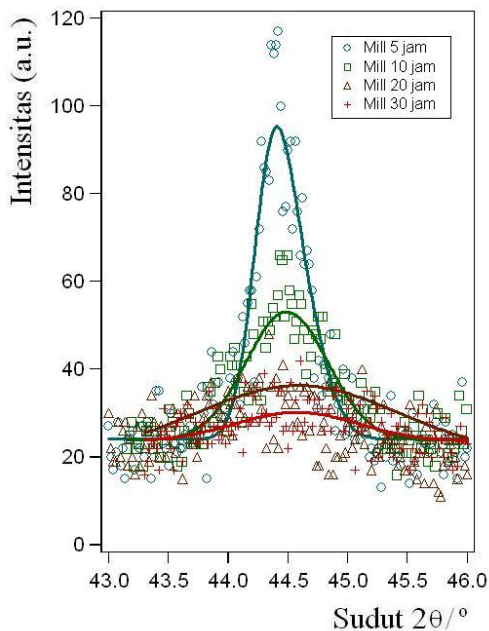
Ilustrasi pertumbuhan fasa γ diperlihatkan pada Gambar 8. Pada gambar tersebut tampak bahwa sebelum proses milling, puncak-puncak pola difraksi Co, Cr, Mo dan Mn terlihat sangat tajam. Kemudian setelah milling selama 3 jam baik puncak Co, Cr, Mo, maupun Mn mulai menurun dan melebar. Penurunan secara signifikan dari puncak-puncak fasa Co, Cr, Mo dan Mn ini bukan berarti bahwa kandungan fraksi volume masing-masing di dalam campuran berkurang, namun struktur kristal Co, Cr, Mo dan Mn telah rusak dan berubah menjadi amorf, dan juga ada yang bereaksi membentuk fasa Co-Cr-Mo. Akan tetapi sampai akhir dari proses milling (30 jam), sejumlah kecil puncak Co dan Mo yang berkisar 10 %, kemungkinan besar belum bereaksi dan membentuk fasa Co-Cr-Mo. Dengan demikian proses pemaduan mekanik sangat efektif untuk membuat paduan Co-Cr-Mo dengan waktu minimum milling selama 5 jam. Dan semakin lama proses milling semakin banyak fasa γ yang terbentuk. Komposisi terakhir fasa Co-Cr-Mo yang terbentuk setelah milling selama 30 jam sebesar 88,92 %, sisanya terdiri dari fasa

Co dan Mo, yang masing-masing besarnya kurang dari 10 %.



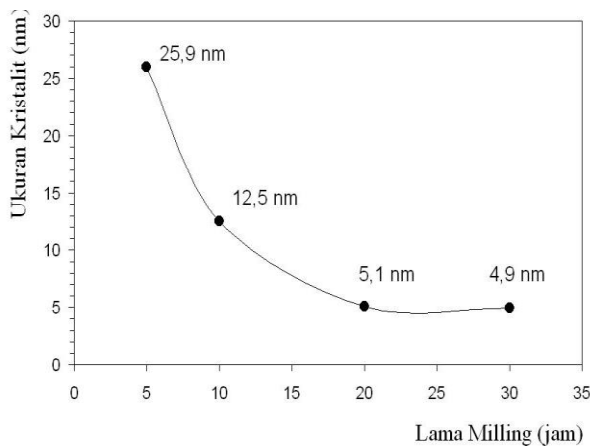
Gambar 8. Ilustrasi pertumbuhan fasa γ (Co-Cr-Mo) dengan pemaduan mekanik

Namun disisi lain setelah milling 10 jam, intensitas puncak secara keseluruhan menurun dan terjadi pelebaran puncak seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8. Menurut formula Scherrer bahwa menurunnya intensitas dan melebarnya puncak difraksi sinar-x ini memberikan arti bahwa telah terjadi pengecilan ukuran kristalit^[14]. Gambar 9 menunjukkan kurva hasil perhitungan ukuran diameter kristalit berdasarkan formula Scherrer untuk fasa Co-Cr-Mo terhadap variasi waktu milling. Pada Gambar 10 ditunjukkan bahwa semakin lama waktu milling ukuran diameter kristalit fasa Co-Cr-Mo semakin kecil. Hal ini berarti bahwa proses pembentukan fasa baru Co-Cr-Mo terjadi pada proses milling melebihi waktu 5 jam.



Gambar 9. Ukuran diameter kristalit fasa Co-Cr-Mo terhadap waktu milling

Ukuran kristalit Co-Cr-Mo setelah proses milling selama 5 jam sebesar 25,9 nm. Selanjutnya setelah proses milling selama 10 jam, 20 jam dan 30 jam ukuran kristalit berubah berturut-turut menjadi 12,5 nm, 5,1 nm dan 4,9 nm (Gambar 10).



Gambar 10. Ukuran diameter kristalit fasa Co-Cr-Mo terhadap waktu milling

KESIMPULAN

Dalam penelitian ini telah dilakukan sintesis nanokristalin paduan Co-Cr-Mo dengan menggunakan teknik pemaduan mekanik (*mechanical alloying*). Dari hasil penelitian tersebut dapat ditarik

kesimpulan bahwa hasil penghalusan dari pola difraksi sinar-x menunjukkan bahwa sampel terdiri dari 3 fasa, yaitu : Co, Mo dan fasa γ . Fasa-fasa tersebut telah tumbuh dengan waktu milling dan besar prosentase pertumbuhan fasa berturut-turut sebesar 42,80 % ; 67,61 % ; 82,94 % ; 84,63 % dan 88,92 % selama 3, 5, 10, 20, dan 30 jam. Dan hasil perhitungan ukuran kristalit seiring dengan bertambahnya waktu milling adalah fasa γ memiliki ukuran kristalit sebesar 25,9 nm ; 12,5 nm ; 5,1 nm dan 4,9 nm. Waktu milling minimum untuk memperoleh fasa nanokristalin γ lebih dari 85 % adalah selama 30 jam.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Fatur. 2008. „Angka Kecelakaan tahun 2008 Meningkatkan Tajam”. (<http://trijayafmplg.wordpress.com/2008/12/16/angka-kecelakaan-tahun2008-meningkat-tajam/> diakses Januari 2009)
- [2] Sánchez-De Jesús F, Bolarín-Miró A, et.al. 2010. „Mechanical alloying of biocompatible Co-28Cr-6Mo alloy”. *Journal Maters Sci Maters in Medicine.* : 21(7), 2021-2026.
- [3] S. K. Vajpai, R. K. Dube et al. 2010. „Studies on the mechanism of the structural evolution in Cu–Al–Ni elemental powder mixture during high energy ball milling”. *Chemistry and Materials Science Journal of Materials Science.* : 44, 16, 4334-4341.
- [4] Xiao-Wu Nie, Chun-Lin Niu, et.al. 2009. „High Temperature Oxidation of Cr-25Nb Alloy Synthesized by Mechanical Alloying and Hot Pressing”. *The Open Corrosion Journal.*: 2, 125-129.
- [5] Hadi Suwarno, Wisnu A. A. et al .2007. „The X ray Diffraction analyses on the mechanical alloying of the Mg₂Ni Formation”. *International Conference Solid State Ionic Proceeding*, PTBIN-BATAN.

- [6] Wisnu Ari A , Hadi suwarno. 2009. „Preparasi Ultra Fine Grain Paduan Hibrida Logam system Mg-Fe menggunakan teknik mechanical milling untuk Hidrogen storage “. *Jurnal Teknik Bahan Nuklir*.: 5, 1.
- [7] Harris, J.R. 2002. „Matemathical Modelling of Mechanical Alloying”, Thesis, The University of Nottingham for the degree of Doctor of Physlosophy.
- [8] Izumi F. 1994. *Rietan Manual*, (private communication).
- [9] Casa Study 2006. „Mechanical Alloying”. (<http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/pubs/pt2.html#mechanical>, diakses Januari 2010)
- [10] Kevin M. Fox. 2009. „Mechanical alloying and thermal treatment for production of zirconium-iron hydrogen isotope getters”. *Journal of Ceramic Processing Research*. : 10, 6, 705~709 .
- [11] Anna Antolak, Marek Krasnowski. Et.al. 2004. „Phase Transformation During Mechanical Alloying of Nickel Aluminides and Subsequent Heating of Milling Product”. *Rev.Adv.Mater.Sci*. : 8. 111 – 115.
- [12] M. Abe , T. Kokaji.2005. „Hydrogen Absorption Characteristics of a FeTi Alloy Nano-Structured by Mechanical Alloying and Its Application to a Hydrogen Storage System”. *Proceedings International Hydrogen Energy Congress and Exhibition IHEC*, Istanbul, Turkey.
- [13] W. Pilarczyk , R. Nowosielski, et.al 2009. „The structural study of Ti-Si-C alloys produced by mechanical alloying method”. *Archives of Materials Science and Engineering*. : 38, 78-84.
- [14] Hakan GAŞAN, Osman Nuri ÇELİK. 2008. „An Investigation Of morphization in Fe-Al alloys during mechanical alloying”. *Eng&Arch.Fac. Eskişehir smangazi University*. : XXI, 1.

RIWAYAT PENULIS

Sulistioso Giat Sukaryo, Lulus Sarjana Fisika ITB tahun 1987, Master Teknik Material ITB tahun 1995. Bekerja sebagai peneliti di Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir – BATAN.