



## KARAKTERISTIK SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO TOTAL *KNEE JOINT* DARI PADUAN CO-26CR-6MO-0,18N HASIL Pengerjaan Panas

I Nyoman Gede Putrayasa A<sup>a\*</sup>, Ika Kartika<sup>a</sup>, Fendy Rokhmanto<sup>a</sup>, Ibrahim Purawiardi<sup>a</sup>, Jessica Natalia<sup>b</sup>, Ali Alhamidi<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Pusat Penelitian Metalurgi dan Material – LIPI

Gedung 470 Kawasan Puspiptek, Tangerang Selatan, Indonesia 15310

<sup>b</sup> Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Jl. Jenderal Sudirman Km 3, Cilegon, Banten, Indonesia 42435

E-mail: \*nyomanbabahan1971@gmail.com

Masuk Tanggal : 21-11-2017, revisi tanggal : 10-06-2019, diterima untuk diterbitkan tanggal : 28-06-2019

### Intisari

Material paduan yang digunakan untuk penggantian implan pada lutut memerlukan sifat mekanis yang baik seperti ketahanan aus, kekuatan dan ketangguhan yang tinggi. Hal ini dikarenakan lutut merupakan bagian yang vital dimana bagian ini sering mengalami beban dinamis, sehingga harus memiliki kekerasan dan kekuatan yang tinggi untuk menahan beban dari berat badan manusia. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui karakteristik struktur mikro yang terbentuk dan nilai kekerasan pada paduan Co-Cr-Mo yang mengandung presipitat untuk digunakan sebagai material paduan dari *total knee joint*. Paduan Co-26Cr-6Mo-0,18N dan Co-26Cr-6Mo dalam bentuk *as-cast* dihomogenisasi pada temperatur 1200 °C selama 12 jam, setelah itu dilakukan *hot rolling* pada temperatur 1200 °C dengan waktu tahan 90 menit dan persen reduksi sebesar 50%, diakhiri pendinginan dengan variasi media pendingin air es, air dan udara. Pengujian kekerasan, XRD (*x-ray diffraction*), pengamatan SEM-EDS (*scanning electron microscopy-energy dispersive spectroscopy*) dilakukan untuk mengetahui karakteristik struktur mikro dan kekerasan paduan setelah proses dilakukan. Hasil studi menunjukkan nilai kekerasan paling tinggi diperoleh dengan media pendingin air es yaitu 51 HRC dan 61,8 HRC, sementara nilai kekerasan terendah diperoleh pada proses pendinginan dengan udara sebesar 42,9 HRC dan 49,9 HRC. Presipitat  $M_{23}X_6$  yang terbentuk meningkatkan kekerasan paduan Co-26Cr-6Mo-0,18N. Presipitat  $M_{23}X_6$  yang terbentuk dapat ditekan dengan cara menambahkan unsur N.

**Kata kunci:** Paduan Co-26Cr-6Mo-0,18N, paduan Co-26Cr-6Mo, presipitat  $M_{23}X_6$

### Abstract

*Replacement of implant material on knee bones requires some mechanical properties that match with human bones such as wear resistance, high strength, and toughness. The knee joint is a vital part where this part often has a dynamic load, so it needs high hardness and strength to bear the burden of the human body weight. This research aim is to investigate the characteristic of the microstructure and the hardness of Co-Cr-Mo alloy, which consist of precipitates for total knee joint application. As-cast Co-26Cr-6Mo-0.18N and Co-26Cr-6Mo were homogenized at 1200°C for 12 hours, followed by hot rolling at 1200°C (90 minutes) and a 50 percent reduction, and then cooling with a variety of cooling media such as ice water, water, and air. After that, several tests were performed to find out the changes in the microstructure and the resulting hardness values through hardness testing, XRD, SEM-EDS observation, and optical microscopy. The results showed that the highest hardness (51 HRC and 61.8 HRC) is obtained when cold-water quenching applied. However, the lowest hardness (42.9 HRC and 49.9 HRC) is conducted using air cooling (aging). The appearance of  $M_{23}X_6$  precipitates increases the hardness of Co-26Cr-6Mo-0.18N alloy. Its precipitates can be decreased by adding N.*

**Keywords:** Co-26Cr-6Mo-0.18N alloy, Co-26Cr-6Mo alloy,  $M_{23}X_6$  precipitates

## 1. PENDAHULUAN

Paduan kobal memiliki sifat mekanik dan biokompatibilitas yang baik dibandingkan dengan material implan permanen logam lain, sehingga sering digunakan dalam aplikasi orthopedi [1]-[3]. Beberapa contoh aplikasi orthopedi paduan kobal (Co-Cr-Mo) adalah *knee joint* [4] dan *hip joint* [5].

Penggunaan paduan kobal dalam aplikasi implan pada *knee* dan *hip joints* memerlukan sifat mekanis yang baik antara lain sifat ketahanan aus, kekerasan dan ketangguhan [4]-[5]. Hal ini berkaitan dengan sendi yang merupakan bagian vital dimana bagian ini sering mengalami beban dinamis [5], sehingga harus memiliki kekuatan dan kekerasan yang cukup untuk menahan beban dari berat badan manusia tersebut [5].

Kekerasan yang tinggi akan meningkatkan ketahanan aus dari paduan. Sifat ketahanan aus juga diperlukan karena dalam beberapa aplikasi paduan Co-Cr-Mo dalam tubuh, beberapa bagian seperti tulang pinggul mengalami banyak gesekan dengan tulang lainnya dan dapat juga mengakibatkan reaksi alergi pada tubuh, osteoklinis dan penyakit lainnya yang berbahaya, bila material mengendap dalam tubuh [5]. Menurut Kenta, dkk. [6], semakin tinggi kekuatan maka kemampuan tahan leleh juga akan meningkat dan dapat meningkatkan sifat mekanis material dalam tekanan. Dengan paparan seperti ini, maka tentunya sifat mekanis menjadi hal yang perlu diperhatikan pada produk paduan Co-Cr-Mo.

Namun, beberapa penelitian terkini tentang paduan ini justru tidak membahas mengenai sifat mekanik paduan ini [2],[7]-[9]. Hal ini disebabkan karena fokus penelitian terkini lebih menitikberatkan pada bahasan presipitat yang muncul sebagai fasa minor di dalam matriks fasa  $\sigma$ , dimana presipitat-presipitat yang terbentuk ini masih harus diselidiki lebih lanjut fasa sebenarnya guna membuka gerbang riset lebih lanjut mengenai dampak negatif dari fasa presipitat terhadap tubuh saat pemasangan sebagai implan. Dugaan fasa-fasa presipitat yang muncul tersebut antara lain  $\pi$ ,  $\chi$  [7],  $M_2X$  [8],  $\eta$ ,  $M_{23}X_6$  [9] dan  $M_{23}C_6$  [2].

Tidak dijelaskannya secara lebih lanjut bagaimana pengaruh munculnya presipitat-presipitat tersebut terhadap sifat mekaniknya

[2],[7]-[9] penulis mengalami kesulitan dalam memperoleh referensi mengenai pengaruh presipitat tersebut pada sifat mekanik paduan Co-Cr-Mo. Oleh sebab itu, studi kali ini mencoba menjawab hal tersebut dengan mempelajari karakteristik sifat mekanik dari paduan Co-Cr-Mo dengan kandungan presipitat tertentu. Untuk studi ini, sifat mekanik yang akan diamati adalah kekerasannya (*hardness*).

## 2. PROSEDUR PERCOBAAN

Material awal yang digunakan dalam penelitian ini adalah ingot paduan Co-26Cr-6Mo-0,18N (%berat) dan Co-26Cr-6Mo (%berat). Material awal adalah hasil cor (*casting*) menggunakan *arc melting furnace*.

Sampel paduan kemudian dilakukan proses homogenisasi selama 12 jam pada temperatur 1200 °C dalam kondisi *inert*. Kemudian dilanjutkan dengan proses *hot rolling* pada temperatur 1200 °C dengan waktu tahan 90 menit dan persen reduksi sebesar 50%. Proses *hot rolling* diakhiri dengan proses pendinginan dengan variasi media pendingin air es, air dan udara.

Karakterisasi hasil proses penelitian menggunakan pengamatan SEM-EDS (*scanning electron microscopy-energy dispersive spectroscopy*) dan XRD (*x-ray diffraction*) untuk mengetahui struktur mikro, presipitat dan fasa yang terbentuk setelah proses pengerjaan panas. Pengamatan SEM-EDS didahului dengan proses pengampelasan untuk meratakan permukaan bidang yang diamati dan proses elektro etsa dengan metanol - 10% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Pengujian kekerasan dilakukan dengan metoda Rockwell untuk mengetahui kekerasan paduan setelah proses pengerjaan panas.

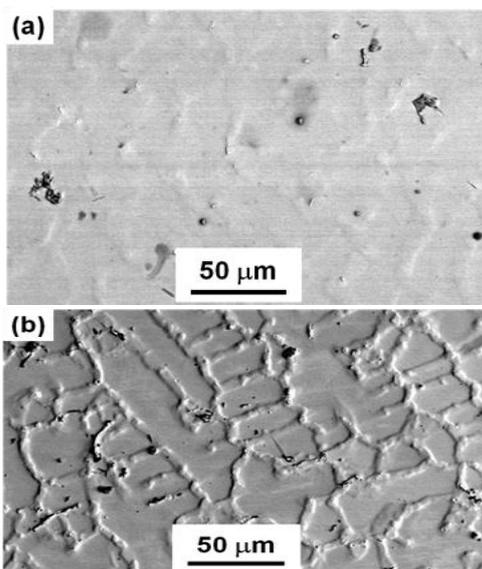
## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengamatan struktur mikro antara paduan Co-26Cr-6Mo dengan Co-26Cr-6Mo-0,18N material as-cast tampak pada Gambar 1 dan setelah homogenisasi tampak pada Gambar 2. Pada Gambar 1 terdapat cacat menyerupai *void* atau kavitas serta terdapat pula karbida, sementara pada Gambar 2, tidak terlihat adanya karbida, namun hanya cacat seperti *void* atau kavitas.

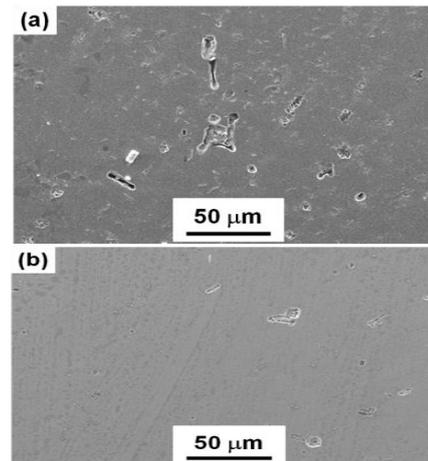
Cacat-cacat yang menyerupai kavitas atau pun *void* yang terlihat pada Gambar 1 dan

Gambar 2 dapat diduga terjadi akibat ketidaksempurnaan proses *casting*, dimana gelembung udara terjebak pada saat proses pendinginan cairan paduan dalam cetakan (*dies*). Hal ini terkonfirmasi pada hasil SEM-EDS (*scanning electron microscopy-energy dispersive spectroscopy*) pada Gambar 3. Hasil SEM-EDS menunjukkan adanya unsur O dan Cr dengan konsentrasi yang besar pada void tersebut, yang dimungkinkan membentuk senyawa krom oksida.

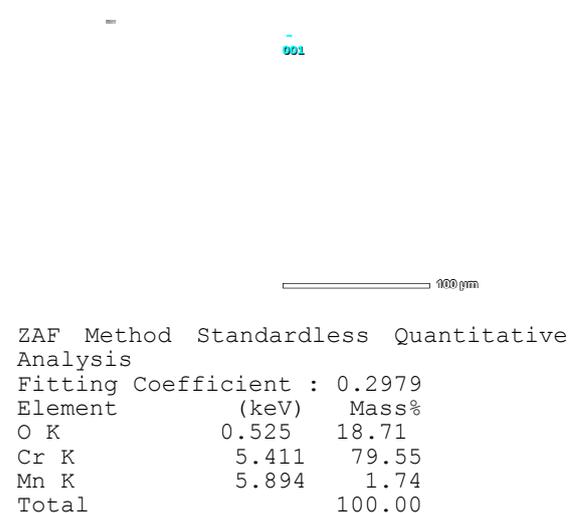
Secara kualitatif, pada Gambar 2 juga tidak terlihat indikasi adanya presipitat, hanya terlihat seperti void dengan ukuran yang lebih besar dibandingkan pada Gambar 1. Struktur butiran yang terbentuk pada *as-cast* adalah dendritik, sedangkan pada homogenisasi kurang terlihat dengan jelas. Berdasarkan hasil analisis XRD (*x-ray diffraction*), belum terbentuk fasa apa pun pada Co-26Cr-6Mo (*as-cast*) yang telah dihomogenisasi. Sementara pada Co-26Cr-6Mo-0,18N (*as-cast*) yang telah dihomogenisasi mulai terbentuk struktur FCC (*face centered cubic*) dengan bidang (111) dan (200) pada  $d = 2,06 \text{ \AA}$  dan  $d = 1,79 \text{ \AA}$  yang mengindikasikan fasa  $\alpha$ -Co, serta struktur heksagonal dengan bidang (101) pada  $d = 1,93 \text{ \AA}$  yang mengindikasikan fasa  $\epsilon$ -Co.



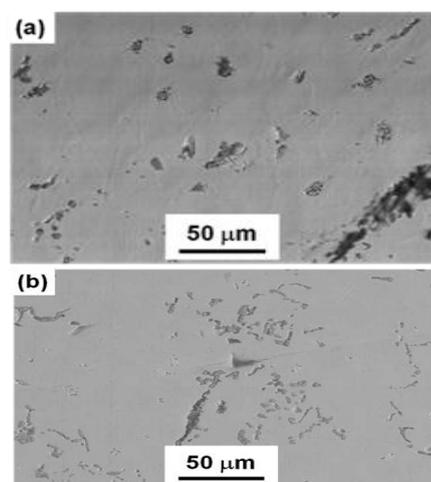
Gambar 1. (a) SEM (*secondary electron*) *as cast* paduan Co-26Cr-6Mo, (b) Paduan Co-26Cr-6Mo-0,18N. Elektro etsa metanol 10% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>



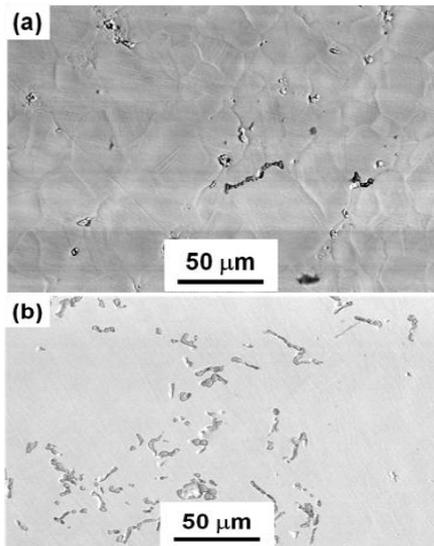
Gambar 2. Hasil SEM setelah proses homogenisasi pada; (a) Paduan Co-26Cr-6Mo, (b) Paduan Co-26Cr-6Mo-0,18N. Elektro etsa metanol 10% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>



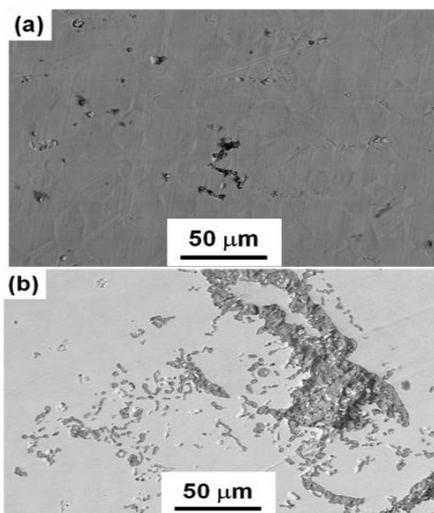
Gambar 3. Hasil EDS *void* pada paduan kondisi *as-cast*



Gambar 4. Hasil SEM setelah proses setelah *hot rolling dan quenching* air es dalam paduan; (a) Co-26Cr-6Mo, (b) Co-26Cr-6Mo-0,18N. Elektro etsa metanol 10% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>



Gambar 5. Hasil SEM setelah *hot rolling* pendinginan air; (a) Paduan Co-26Cr-6Mo, (b) Paduan Co-26Cr-6Mo-0,18N. Elektro etsa metanol 10% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>



Gambar 6. SEM (*secondary electron*) setelah *hot rolling* pendinginan udara; (a) Paduan Co-26Cr-6Mo, (b) Paduan Co-26Cr-6Mo-0,18N. Elektro etsa metanol 10% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Setelah *hot rolling* dan *quenching* dengan variasi media pendingin, air es, air dan udara didapatkan hasil struktur mikro pada Gambar 4 sampai dengan Gambar 6. Pada gambar tersebut tampak bahwa presipitat yang muncul lebih banyak pada paduan dengan N, hal ini sesuai dengan referensi yaitu nitrogen meningkatkan pembentukan presipitat [10]. Presipitat dapat terbentuk pada batas butir maupun di dalam butir [11]. Presipitat pada Gambar 4(a), Gambar 5(a) dan Gambar 6(a) berbentuk bulat *globular* sedangkan pada

Gambar 4(b), Gambar 5(b) dan Gambar 6(b) berbentuk *lamellar*.

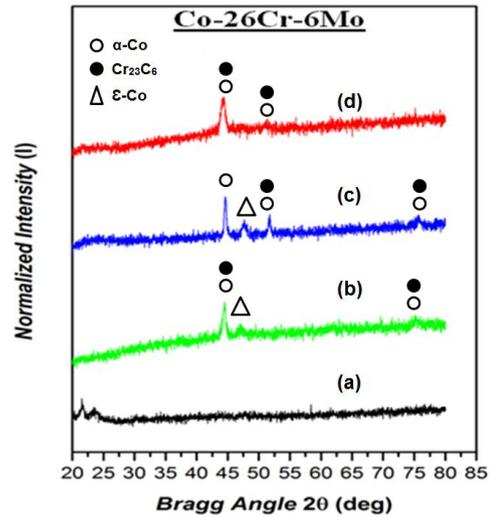
Secara kualitatif, pada Gambar 4, selain terdapat cacat menyerupai *void*, juga terlihat adanya bercak hitam yang cukup besar. Untuk menentukan fasa pada bercak hitam tersebut, kita harus tentukan terlebih dahulu fasa dominan pada paduan Co-26Cr-6Mo hasil pendinginan dengan air es. Berdasarkan hasil analisis XRD, struktur yang dominan adalah FCC dengan bidang (111) dan (220) pada  $d = 2,05 \text{ \AA}$  dan  $d = 1,26 \text{ \AA}$ . Karakteristik struktur ini menunjukkan fasa yang terbentuk adalah  $\alpha$ -Co. Pada karakteristik bercak hitam dalam matriks  $\alpha$ -Co sendiri, hanya ada dua kemungkinan fasa bercak hitam seperti ini, yaitu  $\sigma$  atau karbida M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> [12]. Berdasarkan analisis XRD sendiri, disamping fasa utama (matriks)  $\alpha$ -Co, nilai  $d = 2,05 \text{ \AA}$  dan  $d = 1,26 \text{ \AA}$  memiliki probabilitas fasa sekunder Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> dengan bidang (511) dan (822). Sehingga, berdasarkan analisis XRD ini, dapat kita duga bahwa bercak hitam yang terdapat pada matriks  $\alpha$ -Co ini adalah menyerupai karbida M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> (M = Cr). Namun, perlu diketahui unsur C tidak digunakan pada material ini. Bila mengacu kepada Narushima, dkk. [13], tipe bercak ini memiliki karakteristik fasa M<sub>23</sub>X<sub>6</sub>, dimana M berupa unsur logam dan X berupa unsur C atau N. Dengan demikian, berdasarkan penjelasan ini, dapat diduga kuat bahwa bercak hitam pada Gambar 4 ini adalah fasa M<sub>23</sub>X<sub>6</sub> dengan bentuk Cr<sub>23</sub>N<sub>6</sub>, dimana kekosongan yang seharusnya diisi oleh atom C digantikan oleh atom N [9].

Secara kualitatif, pada Gambar 5(a) masih terdapat cacat-cacat seperti *void* yang juga diikuti dengan adanya bercak-bercak hitam menyerupai karakteristik presipitat M<sub>23</sub>X<sub>6</sub> [9]. Demikian halnya pada Gambar 5(b) identik dengan pada Gambar 4(b) sehingga diduga merupakan presipitat M<sub>23</sub>X<sub>6</sub>, dengan M berkisar antara Co, Cr dan Mo serta X berupa N [9]. Pembentukan presipitat M<sub>23</sub>X<sub>6</sub> ini juga terdeteksi dari hasil XRD pada Gambar 7 dimana ditemukan nilai-nilai  $d$  sebesar  $1,77 \text{ \AA}$  dan  $1,25 \text{ \AA}$  pada posisi sudut  $2\theta = 51,58^\circ$  dan  $75,47^\circ$ . Dua karakteristik  $d$  ini menunjukkan bidang sekunder (600) dan (822) milik fasa M<sub>23</sub>X<sub>6</sub> (M = Cr, X = N) yang menyerupai karakteristik struktur ideal Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>.

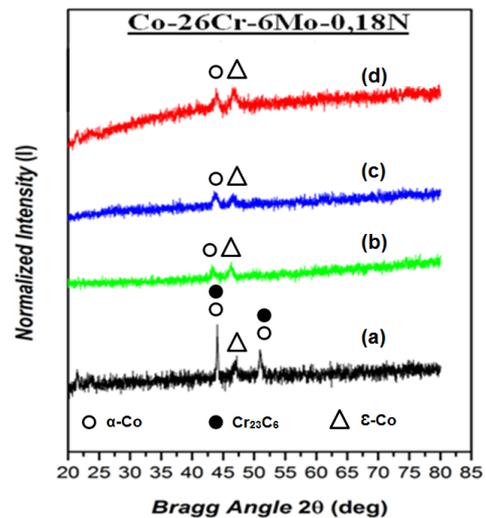
Secara kualitatif, ada kemiripan bercak pada Gambar 6(a) dengan Gambar 5(a). Sehingga dapat diduga bahwa pada Gambar

6(a) juga terdapat cacat-cacat seperti *void* yang juga diikuti dengan adanya bercak-bercak hitam menyerupai karakteristik presipitat  $M_{23}X_6$  [9]. Demikian halnya dengan bercak-bercak kecil pada Gambar 6(b) identik dengan pada Gambar 4(b) dan Gambar 5(b) yang juga merupakan presipitat  $M_{23}X_6$ , dengan M berkisar antara Co, Cr dan Mo serta X berupa N [9]. Pembentukan presipitat ini juga terkonfirmasi pada plot XRD pada Gambar 7 dan Gambar 8. Yaitu terdapat presipitat  $M_{23}C_6$  dan fasa  $\sigma$ . Selain itu, terdapat pula bercak berukuran besar pada Gambar 6(b) memiliki karakteristik yang menyerupai presipitat  $M_2X$  [10].

Pada Gambar 7 dapat dilihat pola difraksi XRD paduan Co-26Cr-6Mo dari *as-cast* dan setelah *hot rolling* dengan variasi media pendingin. Pada Gambar 7 terlihat bahwa kondisi *as-cast* paduan Co-26Cr-6Mo masih dalam kondisi disorder. Setelah dilakukan proses *hot rolling* dengan variasi media pendingin, muncul puncak-puncak difraksi baru pada selang sudut  $2\theta = 40^\circ - 55^\circ$  yang menunjukkan terbentuk fasa-fasa baru. Fasa  $\alpha$ -Co selalu muncul pada Gambar 7(b), 7(c) dan 7(d) yang merupakan matriks paduan. Pada Gambar 8 pola difraksi yang muncul cukup berbeda. Pada Gambar 8(a) yang merupakan kondisi *as-cast* sudah muncul puncak-puncak fasa  $\alpha$ -Co dan  $\epsilon$ -Co sebagai fasa utama dan presipitat  $M_{23}X_6$  ( $Cr_{23}N_6$ ) yang menyerupai struktur  $Cr_{23}C_6$  sebagai fasa sekunder. Namun, setelah dilakukan proses *hot rolling* dengan variasi media pendingin yang berbeda, karakteristik presipitat  $M_{23}X_6$  menghilang puncak difraksinya. Hal ini dikarenakan unsur nitrogen bertindak untuk menekan pembentukan fasa-fasa presipitat seperti  $\sigma$  dan  $M_{23}X_6$  [9]. Tinggi rendahnya komposisi presipitat seperti  $M_{23}X_6$  pada matriks Co akan menentukan tinggi rendahnya nilai kekerasan.



Gambar 7. Plot XRD paduan Co-26Cr-6Mo; (a) *As-cast* dan homogenisasi, (b) *Hot rolling* dan pendinginan dengan air es, (c) *Hot rolling* dan pendinginan dengan air, (d) *Hot rolling* dan pendinginan dengan udara

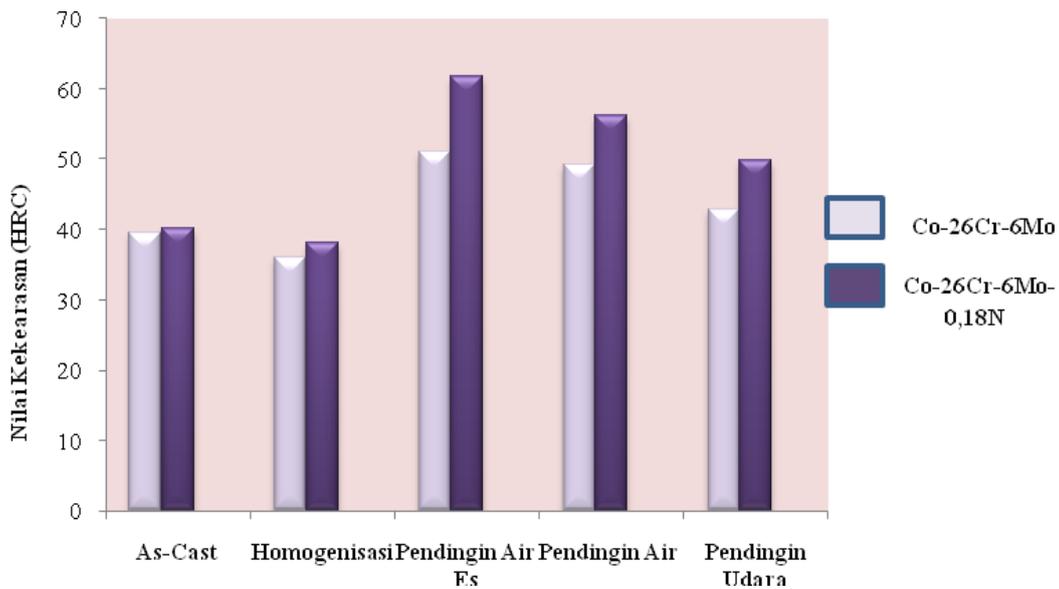


Gambar 8. Plot XRD paduan Co-26Cr-6Mo-0,18N; (a) *As-cast* dan homogenisasi, (b) *Hot rolling* dan pendinginan dengan air es, (c) *Hot rolling* dan pendinginan dengan air, (d) *Hot rolling* dan pendinginan dengan udara

Pada Gambar 9 dapat dilihat bahwa setelah adanya pengerjaan panas nilai kekerasan meningkat. Peningkatan nilai kekerasan sesuai media pendingin yang digunakan dan pada hasilnya media pendingin air es yang memiliki nilai kekerasan yang paling tinggi. Hal ini dikarenakan semakin cepat proses pendinginan maka nilai kekerasan akan semakin meningkat [13]. Pada data hasil pengamatan SEM terlihat adanya presipitat yang ditinjau akan mempengaruhi sifat mekanisnya. Kecepatan pendinginan paduan

yang menjadi penyebab utama dalam perubahan struktur mikro yang terjadi. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa paduan dengan media pendingin air es memiliki kekerasan yang paling tinggi yaitu 51 HRC dan 61,8 HRC sedangkan yang paling rendah adalah pendinginan dengan udara sebesar 42,9 HRC dan 49,9 HRC. Logam yang didinginkan secara cepat biasanya bertujuan untuk membentuk dan mengontrol jumlah martensit

pada struktur mikro [14]. Paduan kobal dengan N mempunyai nilai kekerasan yang lebih tinggi karena adanya presipitat [15], dalam hal ini adalah presipitat  $M_{23}X_6$ . Presipitat ini dapat menghambat pergerakan dislokasi sehingga memperkuat matriks, dan dengan demikian dapat meningkatkan kekerasan paduan [9].



Gambar 9. Grafik kekerasan paduan Co-26Cr-6Mo dan paduan Co-26Cr-6Mo-0,18N

#### 4. KESIMPULAN

Paduan Co-26Cr-6Mo-0,18N dalam bentuk as-cast yang digunakan memiliki fasa utama  $\alpha$ -Co (FCC) dan fasa minor  $\epsilon$ -Co (heksagonal). Di samping itu, ditemukan pula presipitat dengan tipe  $M_{23}X_6$  yang menyerupai fasa  $Cr_{23}C_6$ . Munculnya presipitat tipe  $M_{23}X_6$  akan menurunkan nilai kekerasan paduan Co-26Cr-6Mo-0,18N.

Untuk menurunkan pertumbuhan presipitat tipe  $M_{23}X_6$ , penambahan N dapat dilakukan pada paduan Co-26Cr-6Mo-0,18N. Selain penambahan N, perlakuan hot rolling yang dilanjutkan dengan pendinginan dapat diterapkan, dimana pendinginan dengan air es merupakan metode yang paling dapat meningkatkan nilai kekerasan paling tinggi.

#### UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia (Kemenristekdikti)

atas pendanaan melalui program Insinas tahun 2016 - 2017.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Z. Zhuang, dan E. W. Langer. "Effects of alloy additions on the microstructures and tensile properties of Cast Co-Cr-Mo alloy used for surgical implants," *Journal of Materilas Science*, vol. 24, pp. 4324-4330, 1989. Doi.org/10.1007/BF00544506.
- [2] J. B. Park, K. H. Jung, K. M. Kim, Y. Son, J. I. Lee, dan J. H. Ryu. "Microstructure of as-cast Co-Cr-Mo alloy prepared by investment casting," *Journal of the Korean Physical Society*, vol. 72 (8), pp. 947-951, Apr. 2018. Doi.org/10.3938/jkps.72.947.
- [3] E. K. Cydzik, Z. Oksiuta, dan J. R. Dabrowski, "Corrosion testing of sintered samples made of the Co-Cr-Mo alloy for surgical applications," *Journal*

- of Materials Science: Materials in Medicine*, vol. 16, pp. 197-202, 2005. Doi.org/10.1007/s10856-005-668 0-5.
- [4] S. Ichinose, T. Muneta, I. Sekiya, S. Itoh, H. Aoki, dan M. Tagami. "The study of metal ion release and cytotoxicity in Co-Cr-Mo and Ti-Al-VAlloy in total knee prosthesis: Scanning electron microscopic observation," *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, vol. 14, pp. 79-86, 2003. Doi.org/10.1023/A:1021557605458.
- [5] H. M. Tensi, H. Hooputra, W. Weinfurtner, dan H. Mayr. "Optimizing the corrosion fatigue properties of Co-Cr-Mo hip joints," *JOM*, vol. 47, pp. 25-27, Jan. 1995. Doi.org/10.1007/BF03221125.
- [6] K. Yamanaka, M. Mori, K. Kuramoto, dan A. Chiba. "Development of new Co-Cr-Mo-based biomedical alloys: Effects of microalloying and thermomechanical processing on microstructures and mechanical properties," *Materials and Design*, vol. 55, pp. 987-998, Mar. 2014. Doi.org/10.1016/j.matdes. 2013.10.052.
- [7] T. Narushima, S. Mineta, Alfirano, dan K. Ueda. " $\pi$ -phase and  $\chi$ -phase: New precipitates in biomedical Co-Cr-Mo alloys," *Interface Oral Health Science*, vol. 2011, pp. 72-80, Jan. 2012. Doi.org/10.1007/978-4-431-5407 0-0\_12.
- [8] Alfirano, S. Mineta, S. Namba, T. Yoneda, K. Ueda, dan T. Narushima. "Precipitates in biomedical Co-Cr-Mo-C-N-Si-Mn alloys," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 43A, pp. 2125-2132, Jun. 2012. Doi.org/10.1007/s11661-011-1009-0.
- [9] T. Narushima, S. Mineta, Y. Kurihara, dan K. Ueda. "Precipitates in biomedical Co-Cr alloys," *JOM*, vol. 65 (4), pp. 489-504, Feb. 2013. Doi.org/10.1007/s11837-013-0567-6.
- [10] S. Mineta, Alfirano, S. Namba, T. Yoneda, K. Ueda, dan T. Narushima. "Phase and formation/dissolution of precipitates in biomedical Co-Cr-Mo alloys with nitrogen addition," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 44A, pp. 494-503, Jan. 2013. Doi.org/10.1007/s1166 1-012-1399-7.
- [11] F. Rokhmanto, B. Soegijono, dan I. Kartika. "Pengaruh penambahan karbon dan nitrogen terhadap mikrostruktur, kekuatan tarik dan mampu bentuk paduan Co-28Cr-6Mo-0,8Si-0,8Mn-0,4Fe-0,2Ni," *Metalurgi*, vol. 31 (3), pp. 138 – 149, Dec. 2016. Doi.org/10.14203/metalurgi.v31i3.174.
- [12] R. Rosenthal, B. R. Cardoso, I. S. Bott, R. P. R. Paranhos, dan E. A. Carvalho. "Phase characterization in as-cast F-75 Co-Cr-Mo-C alloy," *J. Mater. Sci.*, vol. 45, pp. 4021-4028, 2010. Doi.org/10.1007/s10853-010-4480-x.
- [13] F. Rokhmanto, G. Senopati, C. Sutowo, I. N. G. P. Astawa, N. Darsono, dan I. Kartika. "Perlakuan termomekanikal ingot paduan Co-26Cr-6Mo-0,18N," *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi 2017*, pp. 1-6, Nov. 2017.
- [14] ASM. *ASM Handbook: Heat Treating*. ASM International, USA, 1991.
- [15] I N. G. P. Astawa, C. Sutowo, I. Kartika, N. Darsono, F. Rokhmanto, G. Senopati, S. G. Sukarso, I. Sumirat, dan H. P. Djoko, "Sintesis paduan Co26Cr6Mo dengan penambahan 0,18N sebagai bahan dasar pembuatan total knee replacement (TKR)," *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi 2016*, pp. 1-4, Nov. 2016.

