

SINTESIS FASA γ -Co PADA PADUAN $\text{Co}_{26}\text{Cr}_6\text{Mo}_{0.18}\text{N}$ DENGAN KOMBINASI METODE HOMOGENISASI 1200 °C DAN *HOT ROLLING* SERTA TRANSFORMASI STRUKTUR KRISTALNYA

I Nyoman G. P. Astawa¹, Ibrahim Purawiardi^{2,*}, Fendy Rokhmanto³, Ika Kartika⁴

^{1,2,3,4}Pusat Penelitian Metalurgi dan Material, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI),
Kawasan PUSPIPTEK Gd. 470, Tangerang Selatan 15314, Propinsi Banten, Indonesia

*E-mail: ibrahimpurawiardi@gmail.com

Diterima: 06-08-2018

Direvisi: 03-10-2018

Disetujui: 01-12-2018

ABSTRAK

Paduan Co-Cr-Mo merupakan material yang banyak digunakan sebagai bioimplan di bidang medis karena ketahanan korosi dan sifat mekaniknya. Secara struktur, paduan Co-Cr-Mo yang direkomendasikan untuk aplikasi medis berupa fasa γ -Co yang berstruktur FCC. Dalam pembuatannya seringkali fasa metastabil Co_7Mo_6 muncul. Munculnya fasa Co_7Mo_6 ini akan menurunkan komposisi dari fasa γ -Co. Studi ini bertujuan untuk mensintesis fasa γ -Co tanpa diikuti munculnya fasa Co_7Mo_6 menggunakan kombinasi homogenisasi 1200 °C dan *hot rolling* yang dilanjutkan dengan pendinginan. Paduan yang digunakan adalah ingot $\text{Co}_{26}\text{Cr}_6\text{Mo}_{0.18}\text{N}$. Pendinginan dilakukan dengan tiga variasi yaitu menggunakan air dingin, air dan udara. Transformasi struktur kristal dari kubik primitif menjadi FCC terjadi saat pendinginan menggunakan air dan udara yang berarti fasa γ -Co berhasil terbentuk dengan pendinginan menggunakan air dan udara. Namun, pada hasil pendinginan dengan air, fasa Co_7Mo_6 masih terbentuk, sedangkan pada hasil pendinginan dengan udara tidak terbentuk lagi. Secara struktur, hasil pendinginan dengan udara menghasilkan fasa γ -Co yang paling stabil dibandingkan dengan pendinginan air dan air dingin. Kekurangan yang ada setelah pendinginan dengan udara adalah munculnya fasa ϵ -Co yang bersifat getas yang merupakan dislokasi parsial akibat proses *hot rolling*.

Kata kunci: Paduan Co-Cr-Mo, ingot $\text{Co}_{26}\text{Cr}_6\text{Mo}_{0.18}\text{N}$, γ -Co, homogenisasi, *hot rolling*.

ABSTRACT

Co-Cr-Mo alloy is a material that widely used for bioimplant in the medical field due to its corrosion resistance and mechanical properties. Structurally, recommended Co-Cr-Mo alloys for medical applications are γ -Co phase which has an FCC structure. But, Co_7Mo_6 metastable phase often occurs after its synthesis. The formation of Co_7Mo_6 phase will decrease the composition of γ -Co phase. This study aimed to synthesize γ -Co phase without following the appearance of Co_7Mo_6 phase using a combination of 1200 °C homogenization and hot rolling followed by cooling treatment. The alloy used was $\text{Co}_{26}\text{Cr}_6\text{Mo}_{0.18}\text{N}$ ingot. Cooling treatments were done using the variation of cold water, water and air. The transformation of the crystal structure from the primitive cubic to the FCC occurs during water and air cooling treatments which means that γ -Co phase is successfully formed by those cooling treatments. However, Co_7Mo_6 phase is still formed on the water cooling treatment while none of Co_7Mo_6 occurred on the air cooling treatment. Structurally, air cooling treatment produces most stable γ -Co phase than the others. However, brittle ϵ -Co phase as a partial dislocation is formed after air cooling treatment due to imperfection of hot rolling treatment.

Keywords: Co-Cr-Mo alloy, $\text{Co}_{26}\text{Cr}_6\text{Mo}_{0.18}\text{N}$ ingot, γ -Co, homogenization, hot rolling.

1. PENDAHULUAN

Paduan Co-Cr-Mo merupakan material yang banyak digunakan pada aplikasi bioimplan di bidang medis berdasarkan kompatibilitas sifat mekanik dan ketahanan korosinya [1,2,3]. Ketahanan korosi paduan Co-Cr-Mo akibat kontak dengan cairan dan tubuh manusia lebih baik dibandingkan dengan *stainless steel* AISI 316L [3]. Sifat mekanik yang diharapkan dari paduan Co-Cr-Mo untuk aplikasi bioimplan adalah yang bersifat ulet. Paduan Co-Cr-Mo pada dasarnya memiliki struktur kristal berbasis Co [4], dimana Cr dan Mo mensubstitusi sebagian okupansi atom Co. Struktur *face-centered cubic* (FCC) merupakan struktur yang direkomendasikan untuk aplikasi bioimplan karena bersifat ulet. Fasa γ -Co merupakan fasa Co yang memiliki struktur FCC yang direkomendasikan tersebut. Permasalahan yang timbul adalah sulit untuk mencapai fasa γ -Co. Salah satu cara yang ditempuh dalam mensintesis fasa γ -Co adalah dengan menambahkan unsur nitrogen (N) guna menghindari terbentuknya fasa σ -Co sehingga fasa γ -Co dapat terbentuk dengan stabil [5]. Selain dengan penambahan unsur N, teknik lain yang dapat dilakukan adalah dengan mengatur temperatur homogenisasinya. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa dengan temperatur homogenisasi 1025 - 1102 °C, fasa γ -Co dapat terbentuk namun diikuti pula dengan munculnya fasa metastabil Co_7Mo_6 [6]. Munculnya fasa metastabil Co_7Mo_6 dapat menyebabkan terganggunya pembentukan paduan berbasis Co-Mo sehingga akan menurunkan komposisi fasa γ -Co dalam paduan Co-Cr-Mo [6].

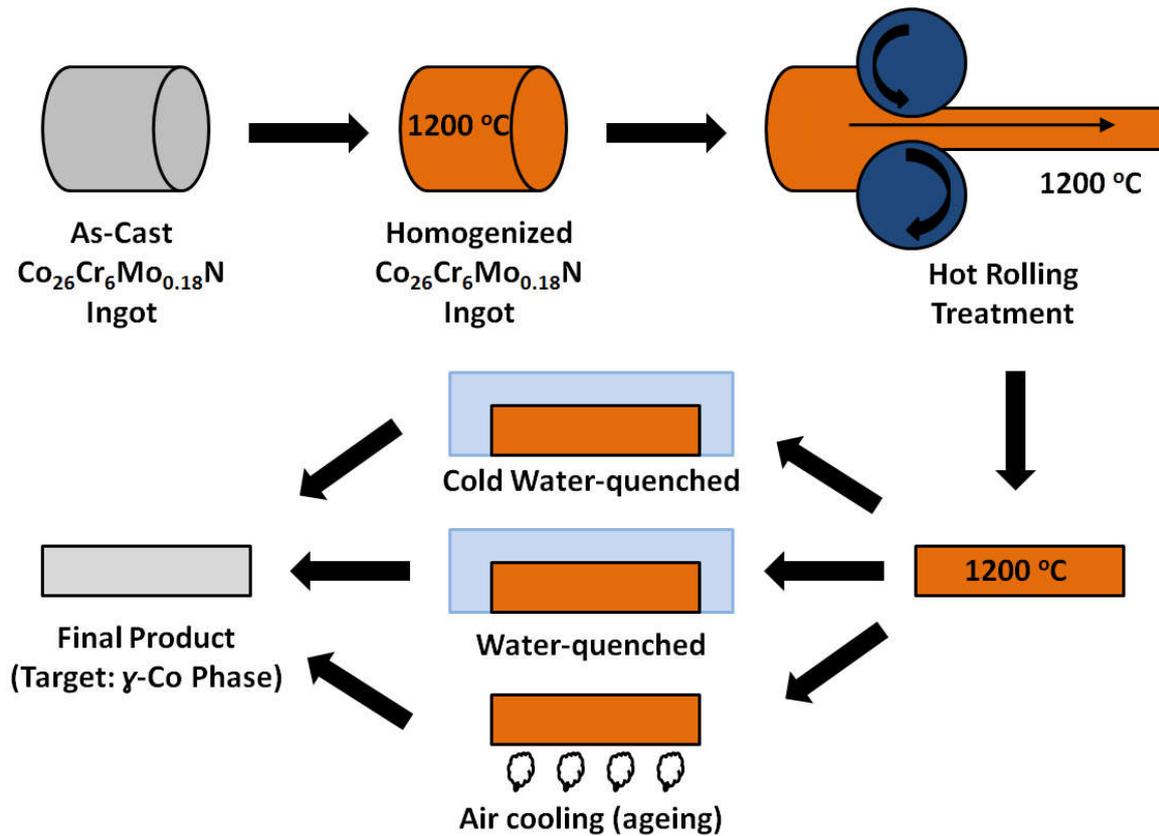
Salah satu penelitian menunjukkan bahwa penerapan temperatur homogenisasi 1200 °C pada paduan Ni-Co-Cr-Mo dapat menyebabkan proses rekristalisasi yang baik dan perbaikan butir [7]. Selain itu pula, kombinasi proses perlakuan panas yang dikombinasikan dengan perlakuan mekanik juga dapat menghasilkan paduan Co-Cr-Mo yang *fine-grained* [8]. Dengan berbasis pada dua hasil penelitian tersebut [7,8], penelitian ini mencoba untuk mengkombinasikan perlakuan panas dan mekanik sekaligus dengan harapan terbentuk paduan Co-Cr-Mo dengan fasa stabil γ -Co yang *fine-grained*. Perlakuan panas yang dipilih adalah homogenisasi 1200

°C dengan harapan terjadi proses rekristalisasi yang baik pada paduan Co-Cr-Mo seperti pada paduan Ni-Co-Cr-Mo [7]. Selain itu, pemilihan temperatur 1200°C ini adalah sebagai usaha menghasilkan fasa γ -Co tanpa diikuti dengan terbentuknya fasa metastabil Co_7Mo_6 dengan cara menaikkan temperatur homogenisasinya, dimana dari penelitian sebelumnya menunjukkan dengan temperatur homogenisasi di bawah 1200 °C akan terbentuk Co_7Mo_6 [6]. Perlakuan mekanik yang dicoba diterapkan dalam penelitian ini adalah *hot rolling*. Fokus penelitian kali ini adalah mengamati transformasi struktur kristal yang terjadi selama proses pembentukan paduan Co-Cr-Mo berfasa γ -Co mulai dari ingot hasil pengecoran (*as-cast*) yang digunakan, homogenisasi, *hot rolling* dan pendinginan. Proses pendinginan yang digunakan sendiri menggunakan tiga variasi yaitu dengan air dingin, air dan udara.

2. METODE PENELITIAN

Sampel yang digunakan adalah ingot $\text{Co}_{26}\text{Cr}_6\text{Mo}_{0.18}\text{N}$ yang dihasilkan dari proses pengecoran campuran Co, Cr, Mo dan N. Sampel $\text{Co}_{26}\text{Cr}_6\text{Mo}_{0.18}\text{N}$ ini kemudian dihomogenisasi dengan temperatur 1200 °C selama 12 jam di dalam tungku. Lalu, dengan dijaga tetap bersuhu 1200 °C, sampel diberi perlakuan *hot rolling* dan ditahan di dalam tungku selama 90 menit. Setelah itu sampel didinginkan dengan variasi pendinginan menggunakan air dingin, air dan udara. Ilustrasinya dapat dilihat pada **Gambar 1**.

Sampel-sampel berupa ingot hasil pengecoran, hasil homogenisasi dan hasil pendinginan kemudian dikarakterisasi menggunakan difraktometer sinar-x (XRD) merek *Rigaku* tipe *SmartLab 3 kW* dengan rentang sudut 2θ antara 10° - 80° untuk dianalisis struktur kristal dan fasa yang terbentuk. Selain itu, sampel-sampel tersebut juga dideteksi teksturnya menggunakan *electron backscatter diffraction* (EBSD) merek *Oxford Instruments* tipe *HKL Nordlys FSD Pre-AMP 6CH* yang diinstalasi pada *JEOL Multibeam System* tipe *JIB-4610F* dan dikarakterisasi teksturnya dalam bentuk *pole figure* menggunakan perangkat lunak *HKL Mambo*.



Gambar 1. Skema proses sintesis fasa γ -Co pada paduan Co-Cr-Mo dari mulai dari ingot $\text{Co}_{26}\text{Cr}_6\text{Mo}_{0.18}\text{N}$ hasil pengecoran (*as-cast*) hingga target produk akhir pada penelitian ini.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengecoran campuran Co, Cr dan Mo yang ditambahkan N bertujuan untuk menghasilkan ingot paduan $\text{Co}_{26}\text{Cr}_6\text{Mo}_{0.18}\text{N}$ dengan fasa yang diharapkan adalah γ -Co. Fasa γ -Co memiliki struktur kristal *face-centered cubic* (FCC). Meskipun terdapat unsur-unsur lain berupa Cr, Mo dan N, fasa yang diharapkan terbentuk tetaplah γ -Co dengan asumsi unsur-unsur Cr dan Mo mensubstitusi okupansi atom Co sehingga tercipta paduan Co-Cr-Mo yang berstruktur FCC menyerupai fasa γ -Co. Dari hasil analisis difraksi sinar-x pada sampel ingot Co-Cr-Mo hasil pengecoran (lihat **Tabel 1**) terlihat bahwa struktur kristal kubik sudah terbentuk, namun bidang-bidang yang terdeteksi adalah (211), (221)/(300) dan (310). Kombinasi indeks Miller bidang yang terbentuk masih merupakan campuran angka ganjil-genap sehingga indikator tersebut belum menunjukkan terbentuknya struktur FCC [9].

Struktur yang terbentuk pada ingot hasil pengecoran adalah kubik primitif dengan nilai parameter kisi presisi (a_0) sebesar 10.367891 \AA (lihat **Gambar 2.a**). Perhitungan parameter kisi presisi untuk seluruh sampel sendiri dilakukan dengan metode perhitungan Nelson-Riley [9,10]. Nilai parameter kisi a_0 sebesar 10.367891 sendiri masih terlalu besar untuk membentuk struktur FCC fasa γ -Co yang berkisar $3.5 - 3.6 \text{ \AA}$ (COD # 9012934, COD # 9012939). Oleh sebab itu, perlu dilakukan homogenisasi dengan cara dipanaskan pada temperatur $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ selama 12 jam untuk proses rekristalisasi guna menurunkan nilai parameter kisinya.

Ingot Co-Cr-Mo setelah dihomogenisasi juga menunjukkan struktur yang terbentuk adalah kubik primitif dengan bidang-bidang yang terdeteksi yaitu (210), (220) dan (221)/(300) (lihat **Tabel 2**). Bidang (220) merupakan juga salah satu bidang yang

Tabel 1. Data difraksi dan investigasi struktur kubik primitif pada sampel hasil pengecoran.

2θ (°)	d (Å)	$\text{Sin}^2\theta$	$\text{Sin}^2\theta / 6$	$\text{Sin}^2\theta / 9$	$\text{Sin}^2\theta / 10$	hkl	a (Å)
17.266949	5.135671	0.022534	0.003756	0.002504	0.002253	211	12.579775
21.864407	4.065077	0.035966	0.005994	0.003996	0.003597	221/300	12.195231
23.644068	3.762980	0.041973	0.006995	0.004664	0.004197	310	11.899587

Tabel 2. Data difraksi dan investigasi struktur kubik primitif pada sampel setelah homogenisasi.

2θ (°)	d (Å)	$\text{Sin}^2\theta$	$\text{Sin}^2\theta / 5$	$\text{Sin}^2\theta / 8$	$\text{Sin}^2\theta / 9$	hkl	a (Å)
38.474576	2.339833	0.108558	0.021712	0.013570	0.012062	210	5.232026
47.817797	1.902201	0.164255	0.032851	0.020532	0.018251	220	5.380238
50.932203	1.792959	0.184880	0.036976	0.023110	0.020542	221/300	5.378876

Tabel 3. Data difraksi dan investigasi struktur kubik primitif pada sampel setelah pendinginan dengan air dingin.

2θ (°)	d (Å)	$\text{Sin}^2\theta$	$\text{Sin}^2\theta / 6$	$\text{Sin}^2\theta / 9$	$\text{Sin}^2\theta / 10$	hkl	a (Å)
35.656780	2.518008	0.093738	0.015623	0.010415	0.009374	211	6.167834
43.665254	2.072972	0.138307	0.023051	0.015367	0.013831	221/300	6.218916
46.038136	1.971502	0.152910	0.025485	0.016990	0.015291	310	6.234436

Tabel 4. Data difraksi dan investigasi struktur FCC pada sampel setelah pendinginan dengan air.

2θ (°)	d (Å)	$\text{Sin}^2\theta$	$\text{Sin}^2\theta / 3$	$\text{Sin}^2\theta / 4$	$\text{Sin}^2\theta / 8$	hkl	a (Å)
43.264463	2.091241	0.135901	0.045300	0.033975	0.016988	111	3.622136
50.495868	1.807423	0.181933	0.060644	0.045483	0.022742	200	3.614845
74.504132	1.273587	0.366416	0.122139	0.091604	0.045802	220	3.602248

Tabel 5. Data difraksi dan investigasi struktur FCC pada sampel setelah pendinginan dengan udara.

2θ (°)	d (Å)	$\text{Sin}^2\theta$	$\text{Sin}^2\theta / 3$	$\text{Sin}^2\theta / 4$	$\text{Sin}^2\theta / 8$	hkl	a (Å)
43.961864	2.059672	0.140099	0.046700	0.035025	0.017512	111	3.567456
47.076271	1.930419	0.159488	0.053163	0.039872	0.019936	-	-
51.080508	1.788101	0.185886	0.061962	0.046472	0.023236	200	3.576202
74.957627	1.267003	0.370233	0.123411	0.092558	0.046279	220	3.583627

Tabel 6. Hasil identifikasi struktur rhombohedral pada sampel setelah pendinginan dengan air dingin.

2θ (°)	d (Å)	hkl	a (Å)	c (Å)
35.656780	2.518008	018	4.933472	24.934554
43.665254	2.072972	116	4.821299	24.367615
46.038136	1.971502	024	4.812924	24.325285

Tabel 7. Hasil identifikasi struktur rhombohedral pada sampel setelah pendinginan dengan air.

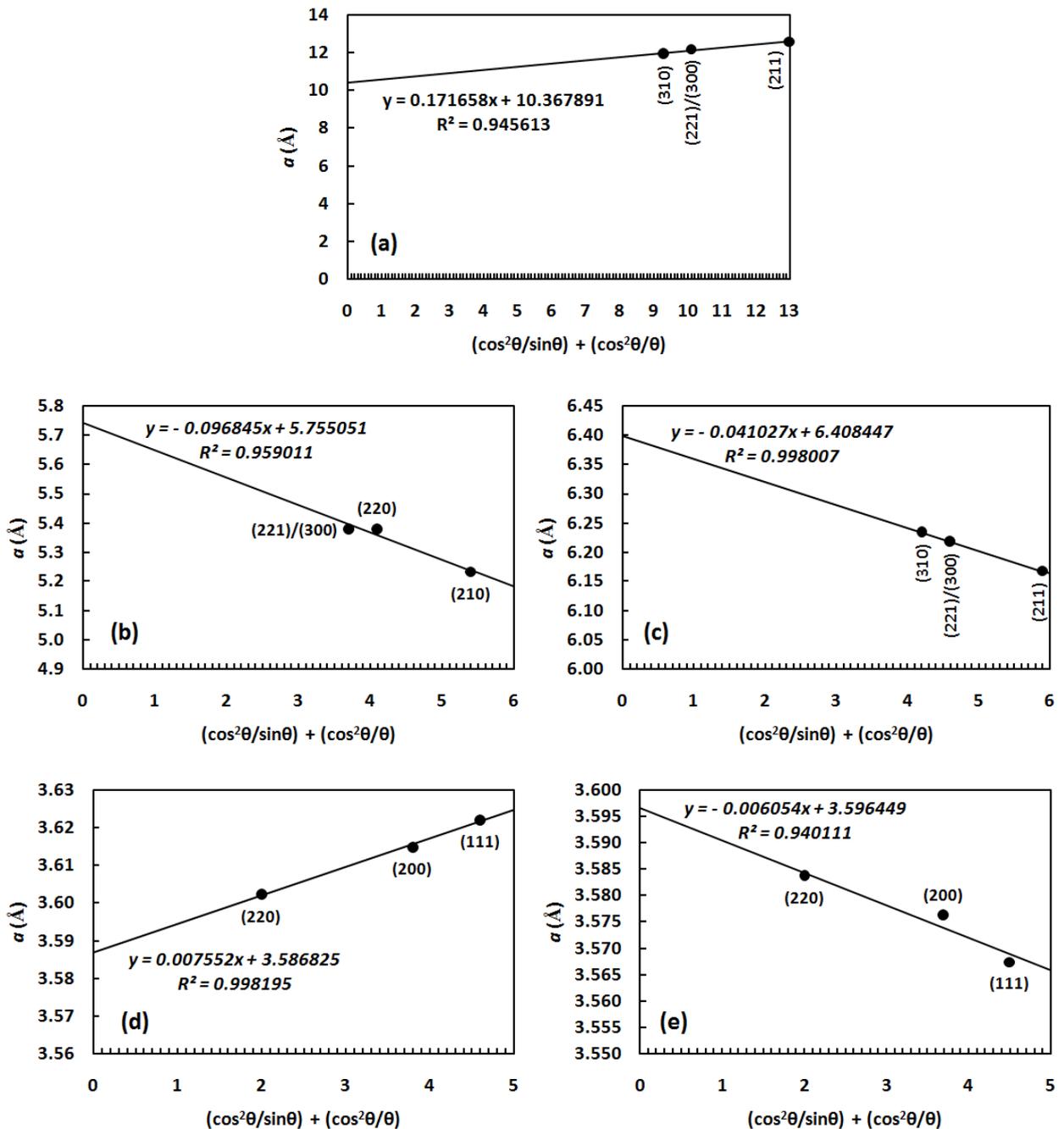
2θ (°)	d (Å)	hkl	a (Å)	c (Å)
43.264463	2.091241	116	4.814106	25.339804
50.495868	1.807423	027	4.816670	25.353302
74.504132	1.273587	1 0 19	4.826702	25.406109

terdapat pada fasa γ -Co, sehingga ingot yang telah dihomogenisasi ini sudah dapat digunakan sebagai inisiasi awal pembentukan fasa γ -Co yang berstruktur FCC. Bila kita perhatikan, nilai parameter kisi a_0 yang terkalkulasi adalah 5.755051 Å (lihat **Gambar 2.b**). Hal ini menunjukkan bahwa dengan homogenisasi 1200 °C, nilai parameter kisi struktur kubik primitif pada ingot Co-Cr-Mo dapat diturunkan sebanyak 44 % yang berarti bahwa jarak antar atom bergerak menjadi saling mendekat sebesar 44 % dari jarak sebelum dihomogenisasi. Dengan mendekatnya jarak antar atom berarti terjadi pemadatan unit sel struktur kubik primitif setelah homogenisasi. Selain terjadi pemadatan unit sel, homogenisasi menyebabkan terjadinya pula perbaikan tekstur kristal kubik primitif dari yang sebelumnya lebih acak orientasinya (lihat **Gambar 3.a**) menjadi lebih searah orientasinya (lihat **Gambar 3.b**). Ingot Co-Cr-Mo yang masih dalam keadaan panas pasca homogenisasi ini kemudian akan dikenai beban *hot rolling* dan langsung dilanjutkan dengan proses pendinginan. Proses pendinginan sendiri dilakukan dengan tiga variasi yaitu dengan air dingin, air dan udara. Pengamatan struktur kristal saat setelah *hot rolling* tidak memungkinkan dilakukan karena sampel masih dalam keadaan sangat panas, oleh sebab itu pengamatan struktur kristal yang terbentuk dilakukan setelah proses pendinginan selesai.

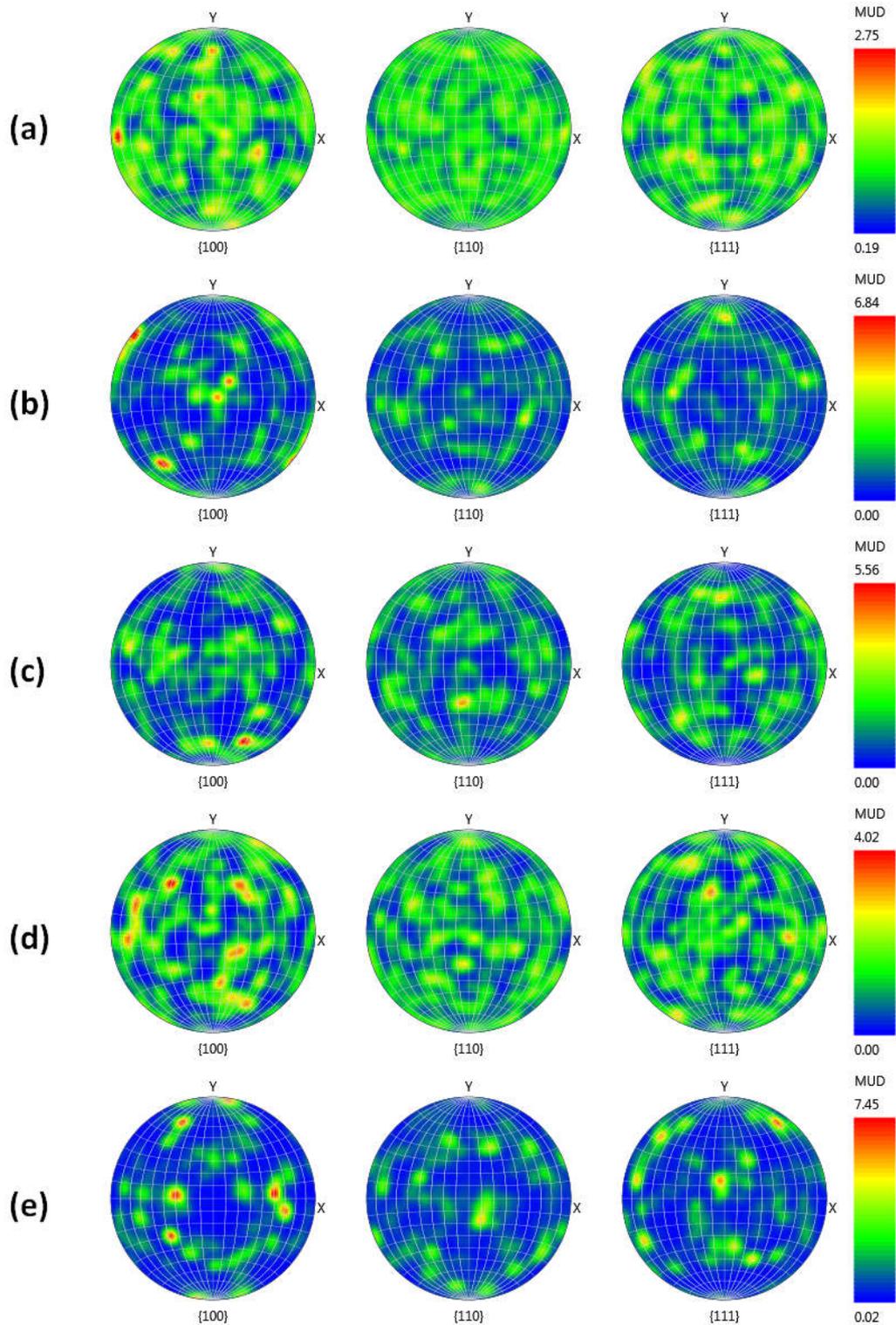
Sampel pasca pendinginan dengan air dingin belum menunjukkan adanya struktur FCC yang merupakan indikator terbentuknya fasa γ -Co. Struktur yang terbentuk tetaplah kubik primitif yang sama dengan ingot sebelum dan sesudah homogenisasi, namun hanya berbeda pada nilai parameter kisinya saja (lihat **Tabel 3**). Struktur kubik primitif yang terbentuk setelah pendinginan menggunakan air dingin memiliki nilai parameter kisi a_0 sebesar 6.408447 Å (lihat **Gambar 2.c**). Sementara tekstur struktur kubik primitif yang terbentuk sedikit lebih acak dibandingkan hasil homogenisasi namun tetap jauh lebih searah orientasinya dibandingkan dengan ingot hasil pengecoran (lihat **Gambar 3.c**). Bila kita perhatikan, nilai-nilai d pada **Tabel 3** adalah 2.51 Å, 2.07 Å dan 1.97 Å. Nilai-nilai d tersebut juga menunjukkan karakteristik dari bidang-bidang (018), (116)

dan (024) milik fasa Co_7Mo_6 (lihat **Tabel 6**) yang berstruktur rhombohedral dan memiliki grup ruang R-3m (COD # 2310288). Hal ini menunjukkan bahwa selain tetap membentuk struktur kubik primitif, terbentuk pula struktur metastabil rhombohedral menyerupai fasa Co_7Mo_6 setelah pendinginan mendadak menggunakan air dingin. Dengan menggunakan metode kalkulasi Lutts [11], struktur rhombohedral menyerupai fasa Co_7Mo_6 yang terbentuk ini memiliki nilai parameter kisi presisi a_0 sebesar 4.469208 Å (lihat **Gambar 4.a**) dan c_0 sebesar 22.588092 Å (lihat **Gambar 4.b**). Gambaran struktur metastabil rhombohedral ini dapat dilihat pada **Gambar 5.b**.

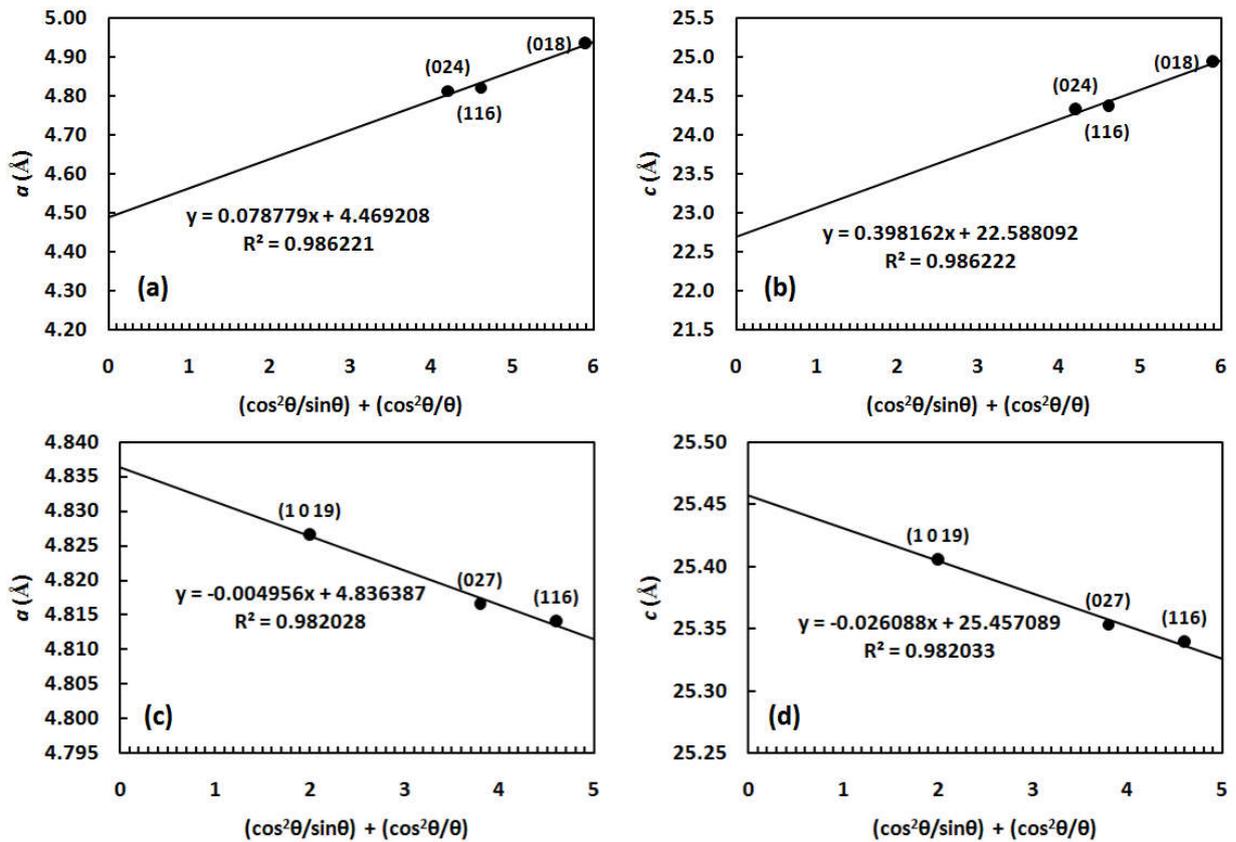
Pada sampel hasil pendinginan dengan air, struktur FCC sudah mulai terbentuk dengan bidang-bidang penyusunnya yaitu (111), (200) dan (220) (lihat **Tabel 4**). Struktur FCC ini memiliki nilai parameter kisi presisi a_0 sebesar 3.586825 Å (lihat **Gambar 2.d**). Nilai parameter kisi dengan kisaran 3.586 Å seperti ini sangat identik dengan fasa γ -Co (COD # 9012934). Dengan demikian, rangkaian proses homogenisasi yang dilanjutkan dengan pendinginan mendadak dengan air dapat membentuk fasa γ -Co yang berstruktur FCC. Akan tetapi, fasa γ -Co yang terbentuk belumlah sempurna. Jika kita perhatikan **Tabel 4**, nilai-nilai d yang terdeteksi adalah 2.09 Å, 1.80 Å dan 1.27 Å. Sementara itu, karakteristik ideal fasa γ -Co memiliki kisaran jarak antar bidang sebesar 2.04 - 2.05 Å untuk bidang (111), 1.77 - 1.78 Å untuk bidang (200) dan 1.25 - 1.26 Å untuk bidang (220). Hal ini menunjukkan fasa γ -Co yang terbentuk masih terdapat ketidaksempurnaan terutama pada jarak antar bidang (111) dan (200) yang menunjukkan masih renggang. Dengan demikian, kepadatan unit sel struktur FCC fasa γ -Co yang terbentuk masih belum maksimal. Selain itu, pada sampel hasil pendinginan dengan air ini juga terbentuk struktur metastabil rhombohedral dengan fasa Co_7Mo_6 dan grup ruang R-3m. Fenomena munculnya fasa metastabil Co_7Mo_6 ini sama halnya dengan yang terjadi pada sampel hasil pendinginan menggunakan air dingin dengan sedikit perbedaan pada nilai parameter kisinya. Sampel hasil pendinginan menggunakan air ini memiliki nilai parameter kisi presisi a_0 sebesar



Gambar 2. Kurva regresi linier analisis parameter kisi presisi struktur kubik pada sampel $\text{Co}_{26}\text{Cr}_6\text{Mo}_{0.18}\text{N}$. (a) Struktur kubik primitif hasil pengecoran. (b) Struktur kubik primitif setelah homogenisasi. (c) Struktur kubik primitif setelah pendinginan dengan air dingin. (d) Struktur FCC setelah pendinginan dengan air. (e) Struktur FCC setelah pendinginan dengan udara.



Gambar 3. Pole figure struktur kubik dari sampel $\text{Co}_{26}\text{Cr}_6\text{Mo}_{0.18}\text{N}$. (a) Struktur kubik primitif hasil pengecoran. (b) Struktur kubik primitif setelah homogenisasi. (c) Struktur kubik primitif setelah pendinginan dengan air dingin. (d) Struktur FCC setelah pendinginan dengan air. (e) Struktur FCC setelah pendinginan dengan udara.

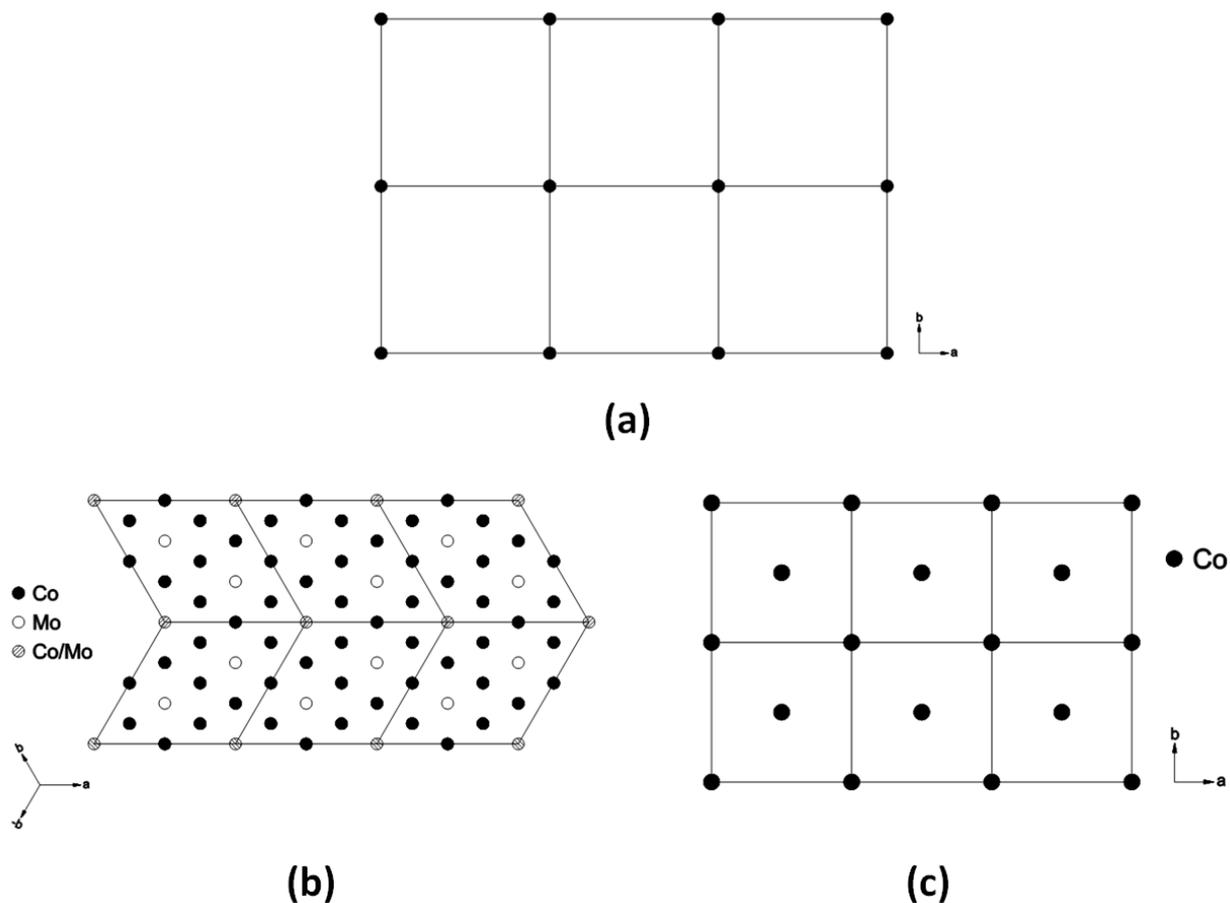


Gambar 4. Kurva regresi linier analisis parameter kisi presisi struktur rhombohedral pada sampel $\text{Co}_{26}\text{Cr}_6\text{Mo}_{0.18}\text{N}$. (a) Parameter kisi a setelah pendinginan dengan air dingin. (b) Parameter kisi c setelah pendinginan dengan air dingin. (c) Parameter kisi a setelah pendinginan dengan air. (d) Parameter kisi c setelah pendinginan dengan air.

4.836387 Å (lihat **Gambar 4.c**) dan c_o sebesar 25.457089 Å (lihat **Gambar 4.d**). Perbedaan nilai parameter kisi fasa metastabil Co_7Mo_6 antara sampel hasil pendinginan menggunakan air dingin dan air diakibatkan oleh perbedaan bidang-bidang penyusun yang terbentuk, dimana pendinginan menggunakan air dingin membentuk bidang (018), (116) dan (024) (lihat **Tabel 6**), sedangkan pendinginan dengan air menghasilkan bidang (116), (027) dan (1 0 19) (lihat **Tabel 7**). Perbedaan bidang yang terbentuk menimbulkan perbedaan jarak antar bidangnya sehingga parameter kisinya pun akan sedikit berbeda.

Berbeda dengan proses pendinginan mendadak dengan air dingin maupun air, sampel dengan pendinginan menggunakan udara tidak berlangsung secara mendadak. Proses pendinginan dilakukan setelah proses *hot rolling* menggunakan udara bebas hingga sampel menjadi dingin secara perlahan-lahan.

Proses pendinginan dengan udara ini memiliki kekurangan yaitu durasi pendinginan yang jauh lebih lama dibandingkan pendinginan mendadak menggunakan air atau pun air dingin. Akan tetapi, pendinginan dengan udara ini berhasil mencegah timbulnya fasa metastabil Co_7Mo_6 yang berstruktur rhombohedral. Fasa yang dihasilkan adalah fasa γ -Co yang berstruktur FCC dengan bidang-bidang penyusun (111), (200) dan (220) (lihat **Tabel 5**). Struktur FCC ini memiliki nilai parameter kisi presisi a_o sebesar 3.596449 Å (lihat **Gambar 2.e**). Kisaran nilai parameter kisi 3.596 Å ini sangat identik dengan karakteristik fasa γ -Co berstruktur FCC dengan grup ruang Fm-3m (COD # 9012938, COD # 9012939). Dari nilai d yang terdeteksi, terdapat nilai-nilai 2.05 Å, 1.93 Å, 1.78 Å dan 1.26 Å. Nilai-nilai d sebesar 2.05 Å, 1.78 Å dan 1.26 Å menunjukkan karakteristik Co berstruktur FCC, sedangkan nilai d sebesar 1.93 Å



Gambar 5. Struktur-struktur yang terbentuk pada sampel $\text{Co}_{26}\text{Cr}_6\text{Mo}_{0.18}\text{N}$. (a) Struktur kubik primitif yang ditemukan pada sampel hasil pengecoran, setelah homogenisasi dan setelah pendinginan dengan air dingin. (b) Struktur rhombohedral dengan grup ruang R-3m dan menyerupai fasa Co_7Mo_6 yang ditemukan pada sampel setelah pendinginan dengan air dingin dan air. (c) Struktur FCC dengan grup ruang Fm-3m dan menyerupai fasa γ -Co yang ditemukan pada sampel setelah pendinginan dengan air dan udara.

menunjukkan karakteristik Co berstruktur heksagonal [12]. Kedua struktur tersebut, FCC dan heksagonal, bersifat stabil untuk Co [12]. Struktur heksagonal ini merupakan fasa ϵ -Co yang akan meningkatkan sifat getas. Namun, struktur stabil heksagonal yang terdeteksi ini memiliki jejak intensitas yang rendah, sehingga hanya dianggap sebagai impuritas kecil saja [12]. Fasa ϵ -Co yang berstruktur heksagonal ini umumnya merupakan dislokasi parsial (*stacking faults*) pada matriks fasa γ -Co yang berstruktur FCC [13]. Hal ini dapat dikategorikan sebagai cacat akibat perlakuan mekanik pada saat proses *hot rolling*. Dengan nilai intensitas relatif puncak tertinggi fasa γ -Co, yaitu bidang (111), sebesar 100 dan intensitas relatif satu-satunya puncak fasa ϵ -Co sebesar 20.7, maka dengan metode analisis *reference intensity ratio* (RIR) [14] dapat

diprediksi bahwa komposisi fasa ϵ -Co yang terdapat pada sampel hasil pendinginan dengan udara adalah sebesar 24.14 wt.%. Dengan demikian, produk dari proses pendinginan alami menggunakan udara inilah yang dapat membentuk struktur FCC yang paling menyerupai fasa γ -Co paling stabil (sebesar 75.86 wt.%) dibandingkan dengan proses pendinginan menggunakan air maupun air dingin.

4. KESIMPULAN

Rangkaian proses pembuatan paduan $\text{Co}_{26}\text{Cr}_6\text{Mo}_{0.18}\text{N}$ mulai dari pembuatan ingot, homogenisasi 1200 °C, *hot rolling*, hingga pendinginan dapat menghasilkan fasa γ -Co yang berstruktur FCC dengan transformasi struktur kristal dari kubik primitif menjadi FCC.

Pendinginan pasca *hot rolling* dengan udara dan air menghasilkan fasa γ -Co berstruktur FCC, sementara pendinginan dengan air dingin menghasilkan struktur kubik primitif. Fasa metastabil Co_7Mo_6 berstruktur rhombohedral ditemukan pada hasil pendinginan dengan air dan air dingin. Pendinginan yang terbaik adalah dengan udara secara perlahan-lahan dimana fasa stabil γ -Co berstruktur FCC dapat terbentuk secara sempurna tanpa menghasilkan fasa metastabil Co_7Mo_6 berstruktur rhombohedral.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Z. Zhuang, 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 Materials Science*, Vol. 24, pp. 4324-4330, 1989.
- [2] J. B. Park. "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.
- [3] E. Krasicka-Cydzik, Z. Oksiuta, 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.
- [4] R. Liu, S. Q. Xi, S. Kapoor, X. J. Wu. "Investigation of Solidification Behavior and Associate Microstructures of Co-Cr-W and Co-Cr-Mo Alloy Systems Using DSC Technique", *J. Mater. Sci.*, Vol. 45, pp. 6225-6234, Jun. 2010.
- [5] S. Mineta, Alfirano, S. Namba, T. Yoneda, K. Ueda, 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.
- [6] R. K. Shaipov, E. Y. Kerimov, E. M. Slyusarenko. "Phase Equilibria in the Co-Cr-Mo Ternary System at 1375 K with a Cobalt Content Greater Than 50 at.%", *Moscow University Chemistry Bulletin*, Vol. 68 (6), pp. 290-292, 2013.
- [7] G. E. Kodzhaspirov, M. I. Terent'ev, S. A. Filippov. "Effect of Hot Deformation Parameters on Austenitic Ni-Co-Cr-Mo-Alloy Microstructure Evolution", *Metal Science and Heat Treatment*, Vol. 56 (5-6), pp. 239-244, Sep. 2014.
- [8] Y. R. Kolobov, S. A. Bozhko, O. A. Golosova, V. N. Sanin, D. M. Ikornikov, V. I. Yukhvid. "Fine-Grained Co-Cr-Mo Alloy by Combined Use of SHS and Thermomechanical Treatment", *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, Vol. 24 (4), 2015.
- [9] C. Suryanarayana, M. G. Norton. *X-ray Diffraction: a Practical Approach*. Plenum Press, New York, 1998.
- [10] J. B. Nelson, D. P. Riley. "An Experimental Investigation of Extrapolation Methods in the Derivation of Accurate Unit-cell Dimensions of Crystals", *Proc. Phys. Soc.*, Vol. 57 (160), pp. 160-177, Dec. 1944.
- [11] A. Lutts. "A New Method for the Determination of Precise Values for the Lattice Parameters from Powder Patterns of Trigonal and Tetragonal Crystals", *Zeitschrift für Kristallographie*, Vol. 159, pp. 191-202, 1982.
- [12] A. W. Hull. "X-ray Crystal Analysis of Thirteen Common Metals", *Physical Review*, Vol. 17, pp. 571-588, May 1921.
- [13] K. Rajan. "Nucleation of Recrystallization in a Co-Cr-Mo Alloy", *Metallurgical Transactions A*, Vol. 15A, pp. 1335-1338, Jul. 1984.
- [14] O. Johnson, R. S. Zhou. "Checking and Estimating RIR Values", *Advances in X-ray Analysis*, Vol. 42, pp. 287-296, 2000.