

ANALISIS DEFORMASI PANAS PADUAN Co-Cr-Mo SEBAGAI MATERIAL *IMPLANT*

Alfirano*

Abstraksi

Pada penelitian ini, dilakukan proses deformasi panas pada fasa γ_{fcc} , hasil transformasi dari fasa ϵ_{hcp} dan σ_{tcp} untuk paduan Co-Cr-Mo yang mengandung Si dan Mn sebagai pengganti Ni. Dalam percobaan dilakukan uji tempa terhadap tiga jenis paduan yaitu Co-Cr-Mo, Co-Cr-Mo-Si dan Co-Cr-Mo-Mn untuk daerah pemanasan awal 1050 °C – 1200 °C selama 30 menit. Sampel hasil tempa dikarakterisasi melalui uji XRD, uji EDAX dan uji kekerasan mikro.

Dari hasil percobaan ditunjukkan bahwa pembuatan komponen implan ini bisa dilakukan melalui pengerjaan tempa, dengan syarat paduan mempunyai fasa tunggal dengan struktur kisi kristal kubik (fasa γ_{fcc}). Fasa tunggal γ_{fcc} diperoleh melalui pemanasan awal sebelum pengerjaan tempa, semua fasa ϵ_{hcp} dan σ_{tcp} bertransformasi menjadi fasa γ_{fcc} .

Hasil analisa XRD telah memperlihatkan hal ini. Sampel mengalami kegagalan tempa akibat retak untuk sampel tanpa penambahan unsur pepadu dan sampel yang mengandung Si. Hasil analisa EDAX menunjukkan bahwa terjadinya retakan diduga akibat terbentuknya fasa σ_{tcp} dan fasa intermetalik $MoSi_2$. Sedangkan sampel dengan unsur pepadu Mn tidak mengalami retak. Nilai kekerasan turun dengan kenaikan temperatur untuk sampel yang mengandung Mn. Namun Nilai kekerasan meningkat kembali pada 1200 °C untuk sampel tanpa unsur pepadu dan dengan penambahan Si.

Kata Kunci : Paduan Co-Cr-Mo, Tempa, Fasa σ , γ dan Intermetalik

PENDAHULUAN

Paduan Co-Cr-Mo merupakan paduan yang mempunyai sifat *bio compatible*, artinya bila logam paduan ini sengaja ditanamkan ke dalam tubuh manusia, keberadaannya tidak ditolak di dalam tubuh atau tidak mengakibatkan alergi bagi tubuh itu sendiri. Bahkan jaringan tulang bisa tumbuh di permukaan logam paduan tersebut. Sifat paduan ini mempunyai ketahanan terhadap korosi dan sifat mekanik, seperti kekerasan, kekuatan, dan ketahanan aus yang baik. Dengan keunggulan tersebut, paduan ini telah memenuhi persyaratan untuk digunakan sebagai bahan implan untuk keperluan medis. Bentuk komponen paduan Co-Cr-Mo untuk keperluan implan ini bervariasi dan rumit. Bentuk serta dimensinya ditentukan dari hasil desain tim medis, seperti misalnya bentuk *hip joint* dan *knee*. Karena adanya persyaratan sifat mekanik tersebut, maka pembuatan bentuk komponen tersebut tidak mungkin dihasilkan langsung dari hasil coran. Dalam pembuatan komponen dengan bentuk kompleks dan bervariasi harus melalui prosedur pengerjaan panas (*hot working*), seperti tempa (*forging*). Jadi pembuatan komponen implan dengan logam paduan ini dibuat dari hasil coran yang dilanjutkan dengan proses pengerjaan tempa.

Ada beberapa jenis paduan Co-Cr-Mo seperti *steallite 21*, dengan komposisi mendekati paduan logam *biocompatible*, yaitu 62,7%Co, 0,25%C, 27,3%Cr, 5,5%Mo, 2,5%Ni, 0,25%W, 0,5%Si, 1,0%Fe. Logam paduan ini dikenal karena sifat-sifatnya, seperti sifat ketahanan korosi terhadap larutan yang mengandung Cl⁻, kekuatan dan kekerasan tinggi

* Dosen Jurusan Teknik Metalurgi - Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
alfi_rano@yahoo.com

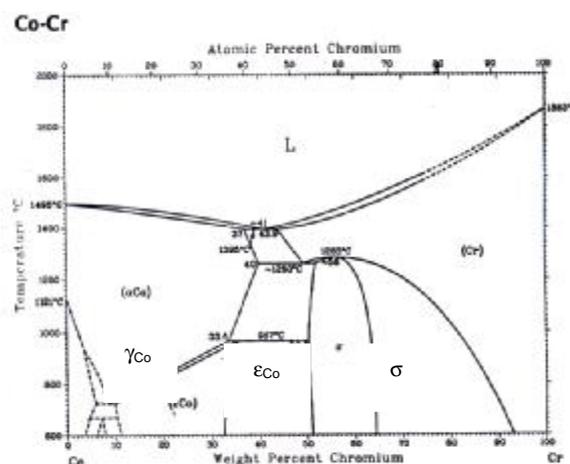
serta memiliki ketahanan aus yang baik. Sifat mampu bentuk paduan *steallite* 21 secara efektif dapat ditingkatkan dengan penambahan kandungan Ni. Namun informasi baru-baru ini menyebutkan bahwa kandungan Ni maksimum 0,01% dalam paduan Co-Cr-Mo sebagai bahan implan dapat mengakibatkan alergi terhadap tubuh (Lee, 2005). Padahal kandungan Ni di dalam paduan Co-Cr-Mo berfungsi untuk meningkatkan mampu bentuk pengerjaan panas. Hal yang sama berlaku juga jika mengacu kepada standar ASTM F-562. Di dalam standar ASTM disebutkan bahwa paduan Co-Cr-Mo sebagai material implan mengandung Ni yang tinggi, yaitu sekitar 35%Ni.

Berdasarkan hal tersebut perlu dilakukan penelitian terhadap sifat mampu tempa paduan Co-Cr-Mo tanpa kandungan Ni melalui kontrol suhu pemanasan awal, dengan melakukan penambahan unsur Mn dan Si sebagai pengganti unsur Ni.

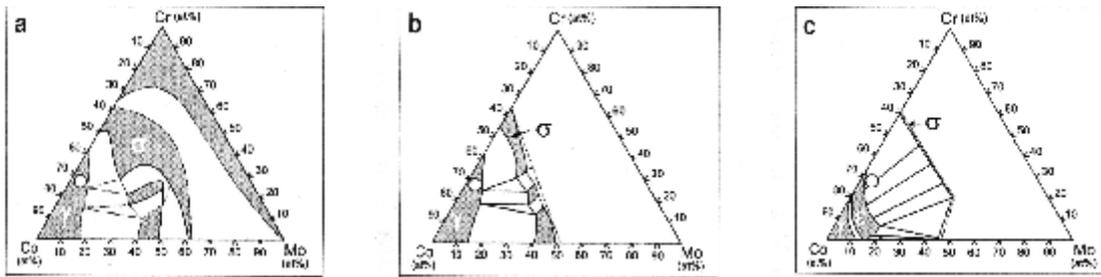
KAJIAN PUSTAKA

Paduan Co-Cr-Mo

Kisi kristal paduan Co-Cr-Mo adalah heksagonal pada suhu kamar. Namun logam ini mempunyai sifat *allothropic*, artinya struktur kisi kristalnya dapat berubah dan tidak hanya terdiri dari satu jenis kristal saja. Seperti yang ditunjukkan pada diagram fasa biner Co-Cr (Gambar 1). Pada posisi komposisi 30%Cr, fasa ϵ (kisi kristal heksagonal) bertransformasi menjadi fasa γ (kisi kristal kubik) pada suhu sekitar 970°C. Selanjutnya pada diagram fasa terner (Gambar 2) tranformasi fasa ϵ ke fasa γ berlangsung pada suhu 1200°C. Berdasarkan diagram fasa ini, bila paduan Co-Cr-Mo dilakukan pengerjaan tempa, maka benda kerja harus dilakukan pemanasan awal sedemikian hingga seluruh kisi kristalnya berubah bentuk menjadi kubik (fasa γ). Walaupun demikian masih terdapat kemungkinan terbentuk fasa σ di dalam matriknya. Karena fasa σ ini mempunyai kisi kristal tetragonal, maka keberadaan fasa σ ini bisa menimbulkan cacat retak setelah tempa.



Gambar 1. Diagram Fasa Biner Co-Cr



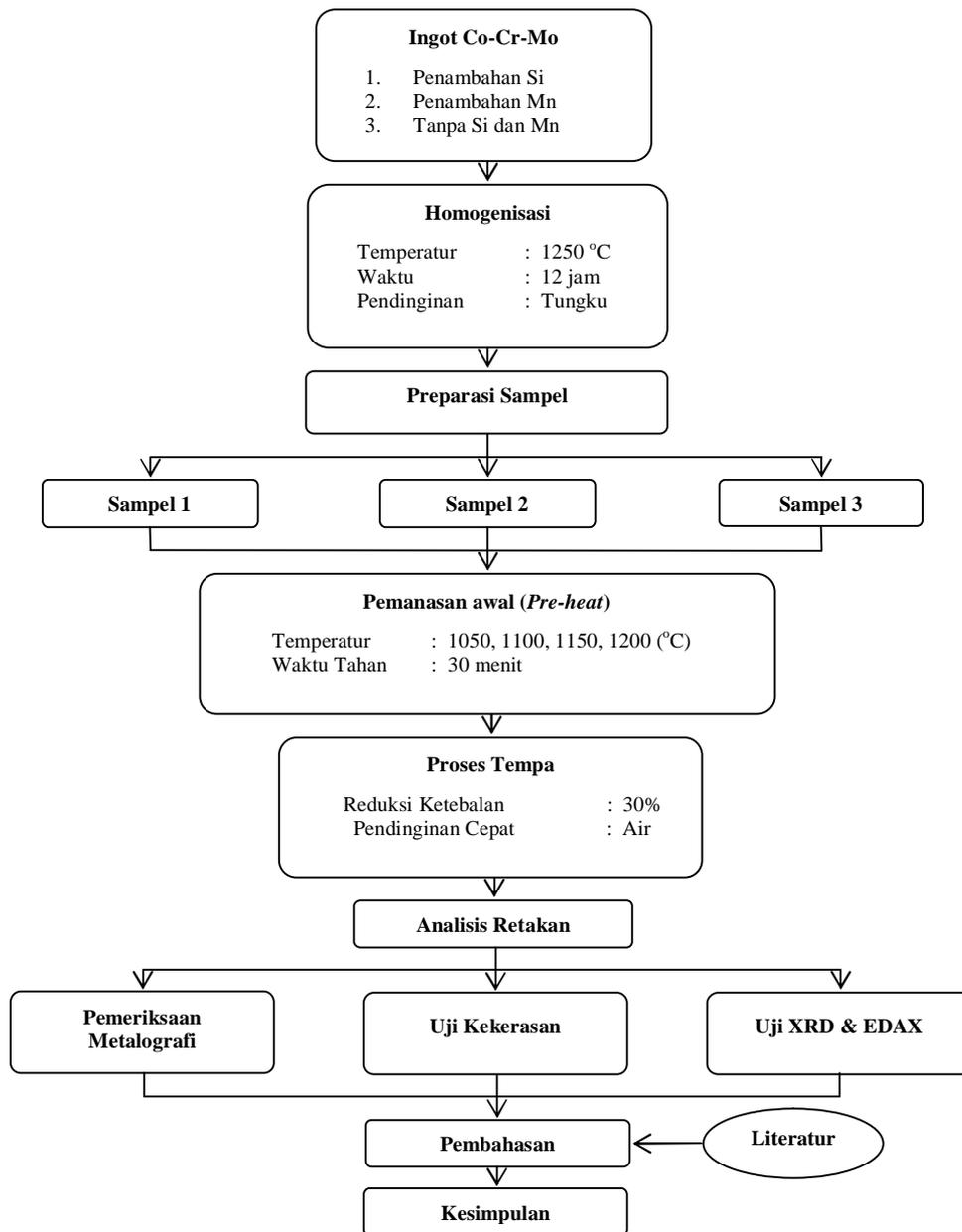
**Gambar 2. Diagram Fasa Terner Co-Cr-Mo, a. 1300 °C, b. 1200 °C, c. 970 °C⁽⁹⁾
Pengerjaan Panas Tempa Paduan Co-Cr-Mo**

Keberhasilan proses pengerjaan tempa tidak hanya tergantung pada temperatur pemanasan awal, timbulnya cacat retak selama tempa dapat disebabkan oleh hadirnya fasa lain yang bukan berstruktur kristal kubik (fasa σ) Untuk mengatasi masalah ini diperlukan perubahan dengan memvariasikan komposisi unsur paduan, tentunya dengan memperhatikan apakah unsur yang dipadu tersebut tidak menyebabkan alergi. Dalam percobaan ini, dilakukan pengerjaan tempa paduan Co-Cr-Mo (Avner, 1974), dengan penambahan sejumlah Mn dan Si, dengan tujuan sebagai berikut :

1. Untuk mengeliminasi munculnya fasa σ (kisi kristal tetragonal) yang di dalam matriks fasa γ selama benda kerja dilakukan pengerjaan tempa
2. Untuk membuat rentang suhu pemanasan awal menjadi lebih lebar. Oleh karena itu dilakukan pemanasan awal di atas suhu 970°C pada rentang suhu 1050°C sampai dengan 1200°C.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan percobaan skala laboratorium dan sampel uji dibuat dengan memvariasikan unsur pepadu Si dan Mn ke dalam paduan Co-Cr-Mo (uji komposisi kimia sampel ditampilkan pada Tabel I). Tiga macam sampel uji yaitu paduan dengan Si (sampel 1), Mn (sampel 2) serta sampel tanpa Si dan Mn (sampel 2), dihomogenisasi dalam *tube furnace* pada 1250 °C selama 12 jam. Selanjutnya, ketiga sampel tersebut dipanaskan pada 1050 °C hingga 1200 °C selama masing-masing 30 menit. Tahap selanjutnya adalah proses tempa dengan reduksi 30% dilanjutkan dengan pendinginan dalam air. Analisa retakan dilakukan secara makro dan mikro terhadap sampel hasil tempa. Selanjutnya dilakukan pengujian XRD, EDAX dan kekerasan mikro untuk menganalisis hasil dari proses tempa. Uji XRD dilakukan untuk mengetahui struktur kristal dari sampel paduan. Uji EDAX bertujuan untuk melihat komposisi kimia unsur dari matriks dan fasa kedua yang terbentuk. Uji kekerasan Mikro digunakan untuk mengetahui pengaruh kandungan unsur-unsur logam yang ditambahkan terhadap peningkatan kekerasan sampel. Secara skematis, alur percobaan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

Tabel I. Analisis Komposisi Kimia Paduan Co-Cr-Mo Percobaan (Persen Berat)

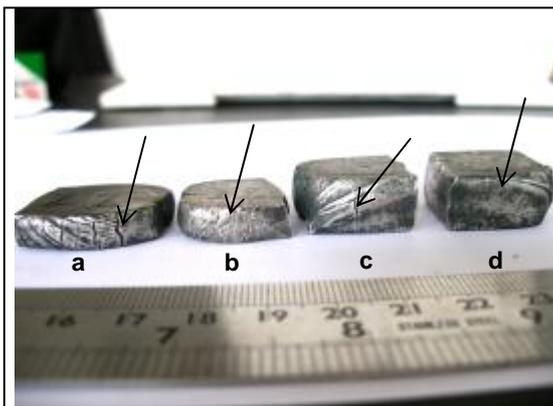
Sampel	Cr	Mo	Si	Mn	Co
1	26,75	4,00	0,56	-	Bal
2	30,78	6,60	-	1,27	Bal
3	26,3	4,49	-	-	Bal

DATA DAN PEMBAHASAN

Dari pengamatan yang dilakukan terhadap sampel paduan hasil tempa menunjukkan bahwa semua paduan Co yang mengandung Si (sampel uji 1) mengalami retak pada pemanasan awal 1050 °C sampai 1200 °C (Gambar 4). Hal yang sama terjadi pada paduan

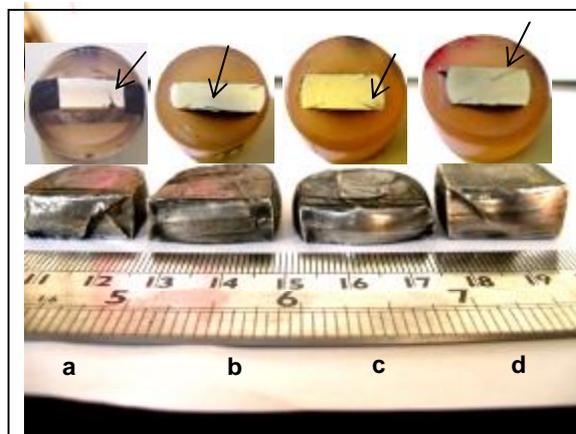
Co tanpa kandungan Si dan Mn (sampel uji 3), semua sampel mengalami retak halus (Gambar 6). Retakan tersebut terjadi pada rentang temperatur pemanasan awal 1050 °C sampai 1200 °C.

Kegagalan retak ini bisa dihindari dengan adanya kandungan Mn (sampel uji 2). Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5, semua sampel tidak mengalami retak pada rentang temperatur pemanasan awal yang lebih lebar, dari 1050 °C sampai 1200 °C. Jadi dapat dikatakan bahwa dengan sejumlah kandungan Mn, resiko kegagalan tempa akibat retak dapat dihindari.



Gambar 4. Hasil Tempa Paduan Dengan Si Untuk Variasi Temperatur : a. 1050°C, b. 1100°C, c. 1150°C, d. 1200°C selama 30 menit. Tanda Panah Menunjukkan Terjadinya Retakan

Gambar 5. Hasil Tempa Paduan Dengan Mn Untuk Variasi Temperatur: a. 1050°C, b. 1100°C, c. 1150°C, d. 1200°C selama 30 menit.

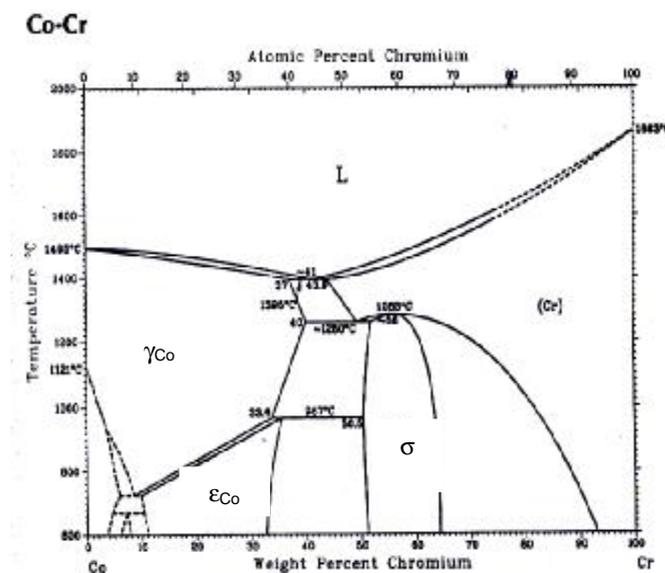


Gambar 6. Hasil Tempa Paduan Tanpa Si dan Mn Untuk Variasi Temperatur : a. 1050°C, b. 1100°C, c. 1150°C, d. 1200°C selama 30 menit. Tanda Panah Menunjukkan Terjadinya Retakan

Pembentukan Fasa yang Mengakibatkan Kegagalan Tempa

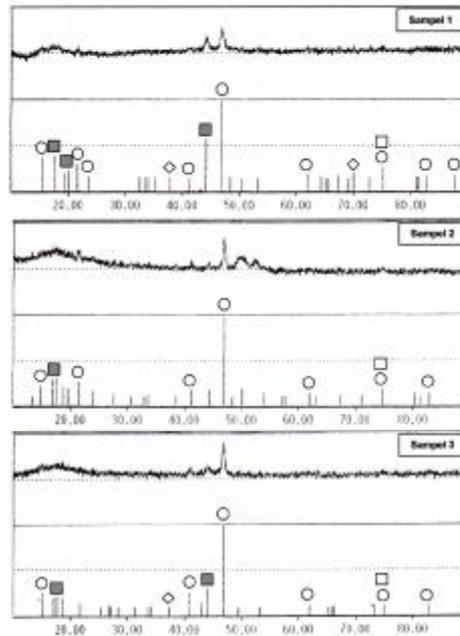
Telah disebutkan bahwa struktur kristal benda kerja berbentuk kubik dapat menghindari timbulnya retak selama tempa (Lee, 2005). Oleh karena itu struktur fasa heksagonal yang dimiliki oleh paduan Co harus diubah menjadi fasa kubik melalui pengerjaan pemanasan awal sebelum tempa, dimana fasa ϵ_{hcp} bertransformasi menjadi γ_{fcc} . Berdasarkan diagram fasa Co-Cr (Gambar 7), pada komposisi 30%Cr, temperatur

transformasi berada pada 970 °C. Walaupun sampel sudah dilakukan pemanasan awal lebih tinggi dari temperatur transformasinya (rentang temperatur 1050 °C - 1200 °C), sedemikian hingga diperkirakan semua sampel uji tidak mengalami retak, tetapi pada kenyataannya tidak demikian. Semua sampel paduan Co akibat proses tempa yang mengandung Si serta tanpa kandungan Si dan Mn mengalami retak. Sedangkan semua sampel paduan Co yang mengandung Mn tidak mengalami retak. Hal ini berarti selama pemanasan awal pada sampel yang mengandung Si serta tanpa kandungan Si dan Mn, di dalam fasa γ_{fcc} muncul fasa lain yang tidak mempunyai struktur kisi kristal kubik. Berdasarkan diagram fasa Co-Cr dan Co-Cr-Mo, fasa yang kemungkinan besar muncul di dalam matrik fasa γ_{fcc} adalah fasa σ . Fasa ini mempunyai struktur kisi kristal tetragonal (Varano, 1997). Untuk melihat pembentukan fasa σ yang muncul pada temperatur tinggi dapat dilakukan dengan cara sampel didinginkan cepat ke dalam media air setelah tempa, sedemikian hingga fasa σ_{tcp} tetap terbentuk hingga pada temperatur kamar dan tidak sempat bertransformasi. Sementara itu fasa γ_{fcc} bertransformasi menjadi ϵ_{hcp} .



Gambar 7. Diagram Fasa Biner Co-Cr

Munculnya fasa ganda ini dapat dilihat dari hasil uji XRD (Gambar 8). Kurva puncak intensitas paling tinggi pada semua paduan Co (sampel uji 1, 2, 3) didominasi oleh struktur kristal hcp (100), tepatnya pada sudut difraksi (2θ) $47,3^\circ$. Jika hasil uji XRD ini dihubungkan dengan diagram fasa biner dan terner, maka fasa yang terbentuk adalah fasa ϵ dengan kisi kristal hcp.

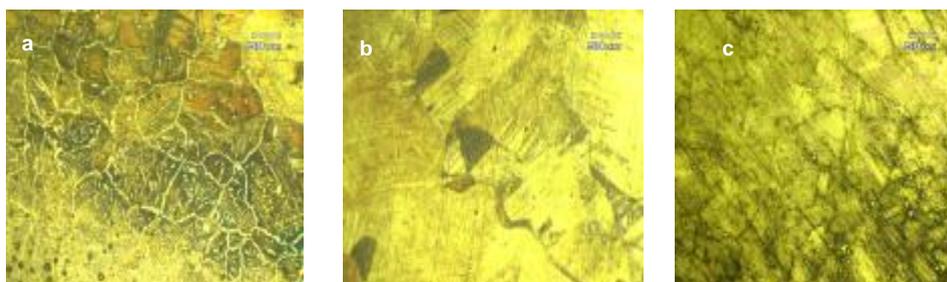


Gambar 8. Pola XRD Pada Sampel Setelah Dilakukan Proses Tempa

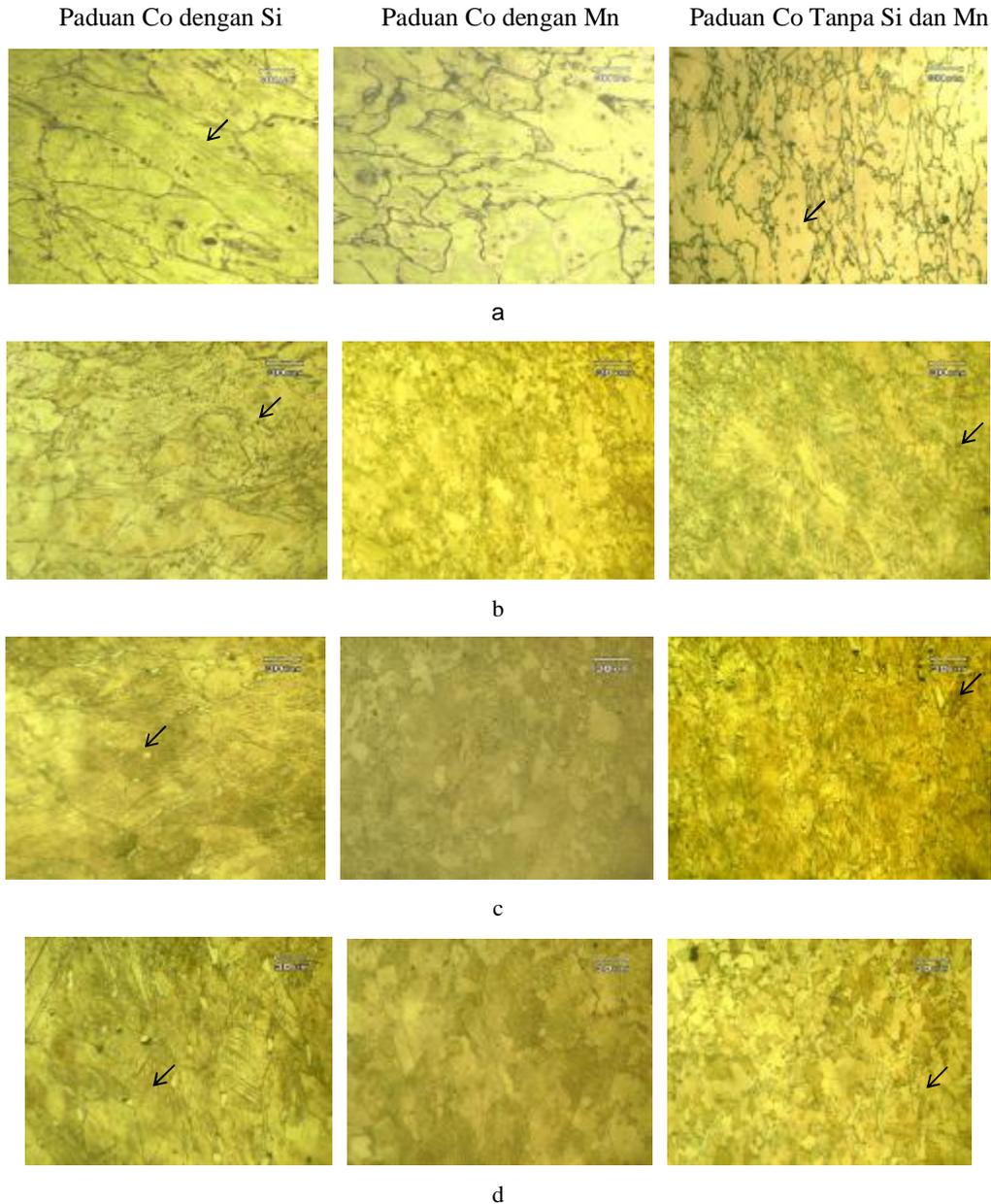
○ : Heksagonal (ϵ_{hcp}), ■ : Kubik (γ_{fcc})/Tetragonal (σ_{tcp}), ◇ : Tetragonal (σ_{tcp}),
 □ : Kubik (γ_{fcc})

Kurva puncak intensitas tertinggi kedua terletak pada sudut difraksi (2θ) $44,2^\circ$, yang menunjukkan struktur kisi kristal tcp. Pada gambar 8, terhadap kurva puncak ini, bila ditarik garis lurus ke bawah, maka sudut difraksi berada pada paduan sampel uji 1 dan paduan sampel uji 3. Oleh karena itu, struktur kisi kristal tetragonal (tcp) berada pada paduan tersebut. Berdasarkan diagram fasa, struktur kisi kristal tetragonal dimiliki oleh fasa $\tilde{\sigma}$ Hal ini berarti fasa tcp terbentuk di dalam kedua paduan Co tersebut. Tetapi pada paduan sampel uji 2, kisi kristal ini tidak terbentuk. Dengan kata lain fasa σ_{tcp} tidak terbentuk. Dengan terbentuknya fasa σ di dalam paduan Co mengakibatkan sampel mengalami kegagalan tempa akibat retak.

Struktur mikro paduan Co dengan dan tanpa kandungan Si dan Mn (gambar 9) terdiri atas butir-butir fasa ϵ , di dalam butiran dan di batas butir tampak adanya presipitasi fasa σ . Tetapi untuk paduan Co dengan kandungan Mn, struktur mikro terdiri atas butir-butir fasa tunggal ϵ dan fasa σ tidak terbentuk.



Gambar 9. Struktur Mikro Hasil Homogenisasi Paduan Co-Cr-Mo, a. Si, b. Mn, c. Tanpa Si dan Mn



**Gambar 10. Struktur Mikro Paduan Co Setelah Tempa.
Terdapat Presipitat (Tanda Panah)
a. 1050 °C, b. 1100 °C, c. 1150 °C, d. 1200 °C.**

Pengaruh Si di Dalam Paduan Co

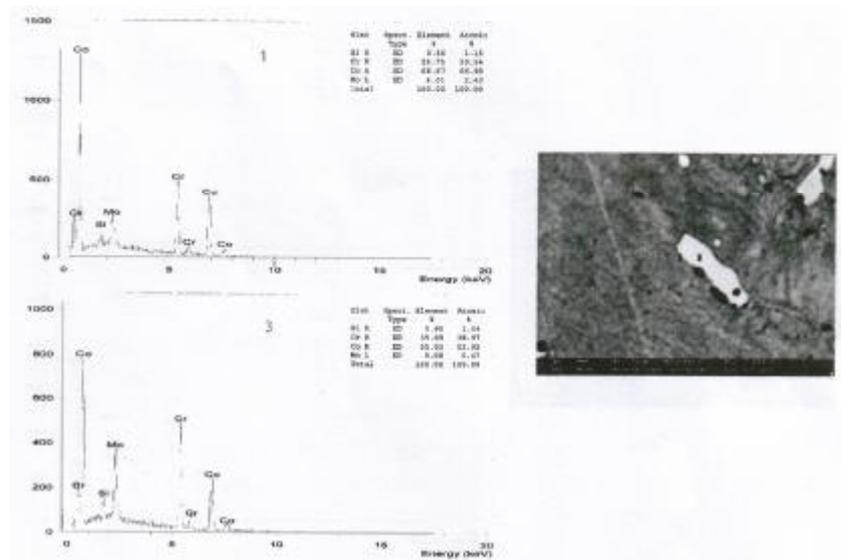
Pada sampel uji 1, gambar 10, dengan adanya kandungan Si, presipitasi muncul di dalam matrik fasa ϵ . Komposisi kandungan unsur Cr dan Mo lebih tinggi di dalam presipitat dari kandungan matriksnya, masing-masing unsur meningkat 5,09%, dan 4,08%. Adanya kenaikan persen unsur di dalam presipitat, diduga membentuk fasa σ karena presipitasi mengandung 0,8%Si, maka fasa intermetalik yang mungkin terbentuk adalah MoSi_2 , Cr_3Si , Mo_3Si . Munculnya fasa σ ditunjukkan dengan nilai kandungan Cr yang lebih tinggi dari pada matriksnya, dan senyawa intermetalik ditunjukkan dengan kandungan Mo yang lebih tinggi. Jika dilihat dari perbandingan komposisi masing-masing unsur dalam presipitatnya terdiri

dari 0,8% Si, 35,09% Cr dan 9,09% Mo, maka senyawa intermetalik yang paling mungkin terbentuk adalah MoSi_2 . Dari hasil analisa ini menunjukkan bahwa presipitasi fasa σ dan MoSi_2 tetap terbentuk pada saat pengerjaan tempa dengan pemanasan awal dari 1050°C sampai 1200°C , sedemikian hingga sampel menjadi retak.

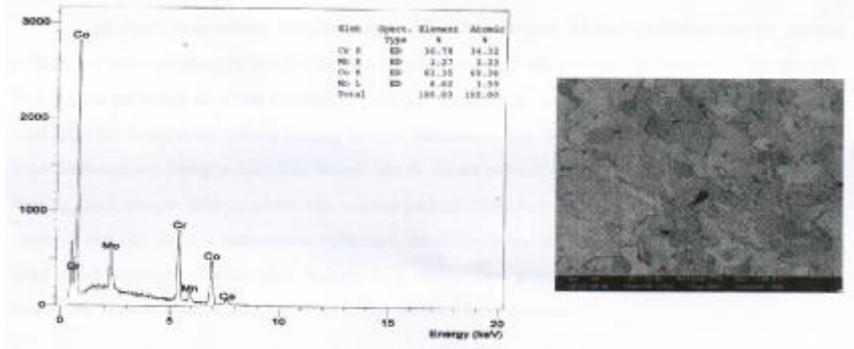
Kandungan Si di dalam Co sangat memungkinkan larut padat homogen karena diameter atom Si tidak jauh berbeda dengan diameter atom Co sebagai logam dasar dan logam pepadu lainnya (Cr dan Mo) (Lee, 2005). Demikian juga sifat elektronegatif masing-masing unsur logam tersebut adalah sama. Tetapi unsur-unsur Co, Cr, dan Mo mempunyai valensi berbeda dengan unsur Si. Ketiga unsur tersebut memiliki valensinya sama (2), sedangkan unsur Si memiliki valensi 4, dengan kulit terluar mempunyai susunan konfigurasi $3s^2 3p^2$. Hal ini berarti unsur Si mudah sekali bersenyawa dan membentuk ikatan kimia seperti senyawa intermetalik Mo_2Si . Struktur kisi kristal senyawa ini adalah tetragonal, sebagai penyebab terjadinya kegagalan akibat retak selama tempa.

Hasil analisa EDAX menunjukkan terbentuk presipitasi pada sampel uji 3 akibat proses pemanasan awal. Presipitasi ini mengandung Cr lebih tinggi dari pada matriknya. Hal ini berarti terbentuk fasa σ (diagram biner Co-Cr). Akibatnya terjadi kegagalan tempa akibat munculnya retak halus pada temperatur pemanasan awal dengan rentang 1050°C sampai 1200°C .

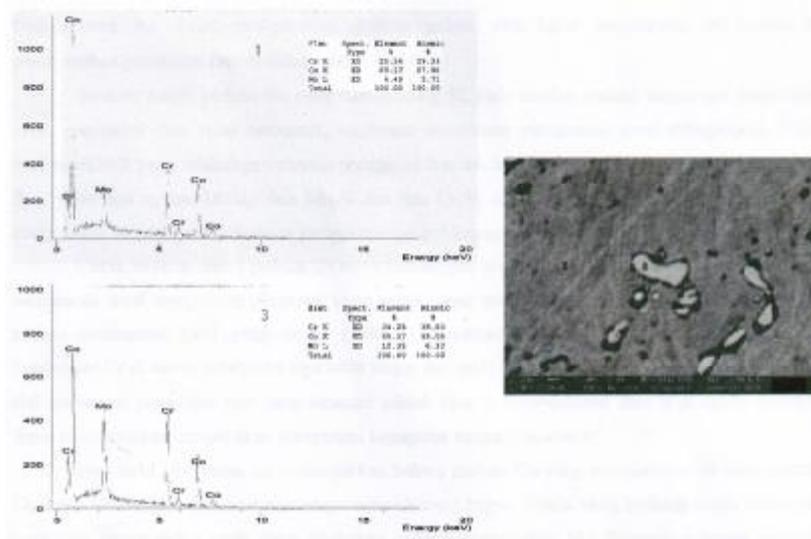
Pembentukan presipitasi fasa dengan kandungan unsur-unsur yang berbeda tersebut menunjukkan gejala adanya mekanisme akumulasi atom-atom yang sejenis yang larut padat di dalam suatu logam induknya. Mekanisme pergerakan atom-atom logam yang larut padat tersebut merupakan mekanisme pergerakan atom-atom melalui proses difusi. Khusus untuk paduan yang mengandung unsur Cr-Mo-Si, mekanisme difusi melalui proses substitusi.



Gambar 11. Hasil Analisis EDAX Untuk Matriks dan Presipitat Sampel Uji 1 Setelah Proses Tempa



Gambar 12. Hasil Analisis EDAX Untuk Matriks Sampel Uji 2 Setelah Proses Tempa



Gambar 13. Hasil Analisis EDAX Untuk matriks dan Presipitat Sampel Uji 3 Setelah Proses Tempa

Pengaruh Mn di Dalam Paduan Co

Dari hasil pengamatan struktur mikro dan XRD tampak adanya perbedaan antara sampel paduan Co tanpa kandungan Mn dan dengan kandungan Mn. Pada paduan Co dengan kandungan Mn, fasa σ tidak terbentuk di dalam matriknya. Oleh karena itu tidak terjadi retak pada sampel hasil tempa. Dari fakta ini ditunjukkan dengan adanya kandungan Mn, pembentukan fasa yang terpresipitasi tidak berlangsung, sehingga fungsi Mn di dalam paduan Co-Cr-Mo adalah sebagai penstabil fasa γ_{fcc} . Jadi dengan adanya unsur Mn, selama paduan dilakukan pemanasan awal, pergerakan atom-atom Cr dan Mo melalui mekanisme substitusi, berdifusi bebas hingga kedua unsur pepaduan tersebut larut padat homogen. Berdasarkan hukum Fick, atom-atom pepaduan bergerak dari kumpulan atom-atom yang konsentrasinya tinggi menuju ke konsentrasi lebih rendah.

Pengaruh Temperatur Pemanasan Awal Terhadap Struktur Mikro

Berdasarkan diagram fasa biner Co-Cr dengan kandungan 30%Cr, pada suhu kamar, terdiri dari fasa ϵ dan merupakan kondisi kritis dalam hal pembentukan fasa σ . Peningkatan kandungan Cr sedikit lebih besar dari 30% menyebabkan fasa σ akan mudah terbentuk.

Struktur mikro paduan Co yang mengandung Si, pada masing-masing temperatur pemanasan awal, presipitasi fasa tetap terbentuk, meskipun temperatur pemanasan awal ditingkatkan. Hasil analisis EDAX yang dilakukan terhadap presipitasi fasa ini, kemungkinan terbentuk beberapa struktur fasa, yaitu fasa σ , fasa MoSi_2 , fasa Mo_3Si dan fasa Cr_3Si . Akibat terbentuknya fasa σ dan fasa-fasa intermetalik tersebut, menyebabkan sampel mengalami kegagalan tempa akibat retak (Gambar 4).

Untuk struktur mikro paduan Co tanpa kandungan Si dan Mn, pada masing-masing temperatur pemanasan awal mengalami peristiwa yang sama, yaitu presipitasi fasa tetap terbentuk, walaupun hingga pemanasan awal yang tinggi (1200°C). Berdasarkan analisa EDAX, komposisi kimia kandungan Cr di dalam presipitasi fasa lebih tinggi dari pada komposisi kimia matrik di sekelilingnya. Hal ini berarti presipitasi fasa yang teramati adalah fasa σ . Pembentukan fasa σ di dalam matrik ϵ dapat menyebabkan sampel akan mengalami kegagalan tempa (Gambar 6).

Dari hasil percobaan ini menunjukkan bahwa paduan Co yang mengandung Si serta paduan Co tanpa Si dan Mn, mempunyai mampu tempa kurang bagus. Untuk mencegah kegagalan tempa akibat retak dapat dilakukan melalui penambahan Mn. Pengerjaan tempa terhadap sampel paduan Co yang mengandung Mn dengan temperatur pemanasan awal 1050°C sampai 1200°C tidak mengalami kegagalan tempa akibat retak. Kalau ditinjau dari analisa struktur mikro, presipitasi fasa σ tidak terbentuk dan hanya terdiri dari fasa tunggal ϵ .

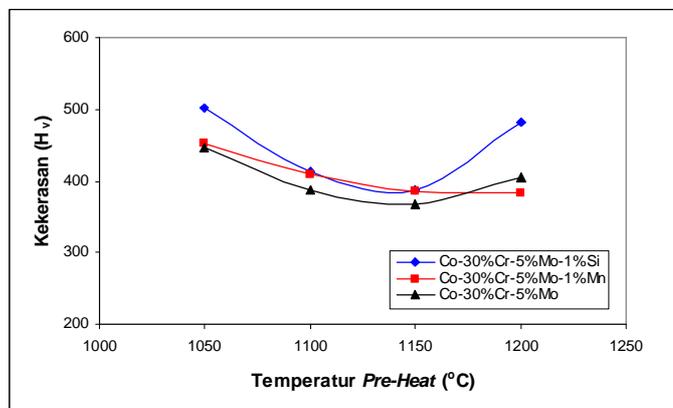
Pengaruh Unsur Padu Terhadap Kekerasan

Hasil pengukuran kekerasan mikro menunjukkan bahwa paduan Co dengan masing-masing kandungan Si dan Mn mempunyai kekerasan yang tinggi antara 368,14 Hv sampai dengan 502,32 Hv. Hal ini menunjukkan paduan yang mempunyai kekuatan tarik tinggi di atas 1000 Mpa. Adapun temperatur pemanasan awal kurang berpengaruh terhadap perubahan kekerasan secara signifikan. Ini terlihat dari keberadaan kurva yang saling tumpang tindih. Untuk kurva paduan dengan kandungan Mn, tipe kurva yang terbentuk berupa kurva yang landai. Pada umumnya peningkatan temperatur pemanasan awal diikuti dengan penurunan nilai kekerasan. Hal ini disebabkan semakin tinggi temperatur pemanasan, ukuran butiran akan semakin besar sehingga nilai kekerasan akan semakin turun. Kontribusi penguatan presipitasi kurang signifikan karena presipitasi yang mulai terbentuk masih berukuran halus dan belum terdistribusi secara merata.

Tetapi tipe kurva kekerasan sampel paduan yang mengandung Mn berbeda dengan tipe kurva sampel paduan tanpa dan dengan kandungan Si (sampel 1 dan 3), yaitu mempunyai harga ekstrim minimum pada pemanasan awal temperatur 1150°C . Pada kurva ini nilai kekerasan akan menurun hingga temperatur pemanasan 1150°C , namun meningkat

kembali pada temperatur pemanasan 1200 °C (Gambar 14). Terdapat beberapa kemungkinan terjadinya peningkatan kekerasan ini.

Terjadinya peningkatan nilai kekerasan ini disebabkan karena pada temperatur ini, presipitat dengan struktur kristal tetragonal yang terbentuk telah mengalami pembesaran ukuran serta telah terdistribusi secara merata di dalam matriksnya, sehingga kontribusi penguatannya semakin signifikan terhadap peningkatan kekerasan. Sementara itu, berdasarkan diagram terner Co-Cr-Mo untuk pemanasan awal dibawah 1200 °C, kemungkinan fasa yang terbentuk adalah fasa γ , ϵ dan σ . Akibat proses pendinginan cepat, fasa γ tetap terbentuk pada temperatur kamar yang dapat menurunkan kekerasan. Sedangkan, pada temperatur pemanasan awal di bawah 1200 °C, fasa ϵ tidak terbentuk. Akibat proses pendinginan cepat, hanya terbentuk fasa ϵ dan σ pada temperatur kamar.



Gambar 14. Hasil Uji Kekerasan

SIMPULAN

1. Paduan Co-Cr-Mo mempunyai mampu tempa kurang bagus untuk temperatur pemanasan awal 1050 °C – 1200 °C.
2. Penambahan Si dalam paduan Co-Cr-Mo tidak berpengaruh terhadap peningkatan mampu tempa. Dengan kandungan sejumlah unsur Si tersebut, paduan Co masih mengalami kegagalan tempa akibat retak pada temperatur pemanasan awal 1050 °C – 1200 °C.
3. Keberhasilan mampu tempa paduan Co-Cr-Mo pada selang temperatur pemanasan awal 1050 °C – 1200 °C dilakukan dengan penambahan Mn.
4. Karena pada paduan mengandung Cr, sehingga fasa σ dengan struktur kisi kristal tetragonal mudah terbentuk. Adanya kandungan Si menyebabkan terbentuknya fasa intermetalik MoSi_2 .
5. Pembentukan fasa σ dan fasa intermetalik MoSi_2 di dalam matrik γ selama tempa mengakibatkan paduan Co mengalami kegagalan tempa akibat retak.

6. Paduan Co-Cr-Mo yang mengandung Si dan Mn mempunyai sifat *bio compatible*, namun untuk aplikasi proses pembentukannya, paduan dengan kandungan Mn paling mungkin dilakukan karena mempunyai sifat mampu tempa yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- ASM Hand Book Vol. 2, 1995, ***Properties and Selection : Non-Ferrous Alloys and Special Purpose Materials***, The Material Information Society, USA.
- ASM Hand Book, Vol. 3, 1992, ***Alloy Phase Diagrams***, ASM International, The Material Information Society, USA.
- Avner, S.H., 1974, ***Introduction to Physical Metallurgy***, 2nd edition, McGraw-Hill.
- Chiba, Akihiko, 2005, ***Mechanical and Properties and Forged low Ni and C Containing Co-Cr-Mo Biomedical Implant***, Material Science Forum, Vol. 475-429, P. 2317-2322, Trans Technology, Switzerland.
- Dieter, G. E., 1976, ***Mechanical Metallurgy***, International Student Edition, 2nd Edition, McGraw-Hill Series in Naterial Science and Engineering, Tokyo, Auckland.
- Hiroamoto, S., et.all, 2005, ***Microstructure and Corrosion Behavior in Biological Environments of the New Forged Low-Ni Co-Cr-Mo Alloys***, Biomaterials – Science Direct, P. 4912 – 4923, Elsevier, Japan.
- Lee, Sang-Hak, 2005, ***Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Ni and C - Free Co-Cr-Mo Alloys for Medical Applications***, Materials Transaction, Vol. 46, No. 8, The Japan Institute of Metals.
- Standar ASTM Designation : F 75 – 98
- Standar ASTM Designation : F 563 – 95
- Varano, R., and S Yue, 1997, ***Cobalt Alloy Used in Metal-Metal Hip Implant Application - Applicatioan and Material Performance***, Proceeding of The Nickel-Cobalt 97, International Symposium Vol. IV, Sudbury, Ontario, Canada.

