

PELAPISAN PERMUKAAN BAJA TAHAN KARAT AISI 304 DENGAN KHROM OKSIDA MENGGUNAKAN METODA *SPUTTERING*

Sungkono¹, Jan Setiawan¹, Isfandi¹, Ihwanul Aziz²

¹Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN

Kawasan Puspiptek Serpong Gd.20 Tangerang Selatan, Banten 15314

²Pusat Sains dan Teknologi Akselerator – BATAN

Jalan Babarsari Kotak Pos 6101 ykbb Yogyakarta 55281

e-mail: sungkhana@gmail.com

(Naskah diterima: 20-05-2019, Naskah direvisi: 03-06-2019, Naskah disetujui: 12-06-2019)

ABSTRAK

PELAPISAN PERMUKAAN BAJA TAHAN KARAT AISI 304 DENGAN KHROM OKSIDA MENGGUNAKAN METODE *SPUTTERING*. Baja tahan karat digunakan sebagai bahan struktur reaktor daya tipe LWR, AGR dan LMFBR. Permasalahan bahan struktur yang timbul adalah ketahanan korosi rendah dan *swelling* dalam lingkungan radiasi tinggi. Salah satu cara yang digunakan adalah melapisi permukaan kelongsong baja tahan karat dengan khrom oksida. Tujuan penelitian adalah mendapatkan karakter mikrostruktur, kekerasan mikro, dan senyawa yang terbentuk pada lapisan permukaan baja tahan karat AISI 304. Metode yang digunakan adalah pelapisan permukaan AISI 304 dengan metode *DC-sputtering*. Proses pelapisan menggunakan bahan pelapis berupa target khrom, argon sebagai gas *sputter*, yang didoping gas oksigen dengan konsentrasi bervariasi dari 0 – 50 %volume, arus 10 – 20 mA, dan waktu 1 - 3 jam. Karakterisasi lapisan meliputi pengamatan mikrostruktur menggunakan mikroskop optik, kekerasan dengan *microhardness Vickers tester*, dan senyawa dalam lapisan dengan *X-ray diffractometer*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mikrostruktur *base metal* tersusun dari fasa austenit dan endapan karbida, antarmuka logam-lapisan terlihat jelas, serta lapisan kompak dan homogen dengan ketebalan cenderung naik dalam rentang 0 – 30 %volume, menurun pada 30 – 40 %volume, dan bertambah tebal pada 40 – 50 %volume gas O₂. Kekerasan lapisan bertambah tinggi hingga doping gas oksigen 30 %volume, kemudian menurun hingga 50 %volume gas O₂. Pada konsentrasi dopan tetap dengan arus 10 – 20 mA dan waktu proses 1 – 3 jam diketahui kekerasan lapisan permukaan AISI 304 bertambah tinggi seiring dengan meningkatnya arus dan waktu *sputtering*. Pada konsentrasi dopan 30 %volume O₂, arus 10 mA dan waktu 2 jam, lapisan yang terbentuk mengandung CrO₂.

Kata kunci: Lapisan permukaan, bahan struktur, AISI 304, mikrostruktur, senyawa lapisan

ABSTRACT

SURFACE COATING OF AISI 304 STAINLESS STEEL WITH CHROMIUM OXIDE BY SPUTTERING METHOD. *Stainless steel has been used as structure material of power reactors of LWR, AGR and LMFBR types. The problem of structural materials that arises is low corrosion resistance and swelling in high irradiation environments. One method to overcome this problem is surface coating of the stainless steel cladding with chromium oxide. The aim of this study is to obtain the characteristics of microstructure, microhardness, and compounds formed in the surface layer of AISI 304 stainless steel. DC-sputtering method was used for the coating of AISI 304 surface. The coating process used coater material of chromium target and argon as sputtering gas which was mixed with oxygen gas with concentrations varying from 0 - 50% volume. The process was carried out at 10 - 20 mA current for 1 - 3 hours. Characterization of the layer includes microstructure observation using optical microscope, hardness with microhardness Vickers tester, and compounds analysis in layers with X-ray diffractometer. The results shows that the base metal microstructure is composed of austenite and carbide deposits. The metal-layer interface is clearly visible. The thickness of the resulted compact and homogeneous layer tends to increase for O₂ gas composition in the range of 0 – 30 %volume but decrease for the range of 30 - 40 %volume and rise at 40 - 50 %volume. The hardness of the layer increases until oxygen gas is at 30 %volume and then decreases at 50 %volume of O₂ gas. At a fixed value of O₂ composition at a current of 10 - 20 mA and a process time of 1 - 3 hours, it is observed that the hardness of the SS 304 surface layer increases with increasing current and sputtering time. At a composition of 30 %volume of O₂, 10 mA current and 2 hours process, the resulted layer contains CrO₂.*

Keywords : *Surface layer, structure material, AISI 304, microstructure, layer compound.*

PENDAHULUAN

Bahan struktur berfungsi sebagai wadah secara fisik (proteksi bahan bakar), memberikan kekuatan mekanik, dan struktur penyangga untuk berbagai komponen reaktor nuklir. Bahan struktur yang utama adalah kelongsong bahan bakar, bejana tekan, kanal pendingin bahan bakar, plat penyangga teras, dan sistem pipa pendingin^[1]. Baja tahan karat digunakan sebagai bahan struktur reaktor daya tipe AGR (*Advanced Gas-cooled Reactors*) dan tipe LMFBR (*Liquid Metal Fast Breeder Reactors*). Bahan bakar reaktor tipe AGR menggunakan kelongsong dari baja tahan karat AISI 20 dan 25. Baja tahan karat (AISI) AISI 304 dan 304L digunakan sebagai bejana bertekanan reaktor LMFBR, AISI 316 dan AISI 316L digunakan sebagai kelongsong bahan bakar LMFBR. Suhu operasi teras reaktor tipe LMFBR sekitar 500 °C^[1]. Sementara itu, untuk reaktor daya tipe LWR menggunakan AISI 304/306 untuk *primary piping*, AISI 308/309 untuk *primary plenum clad*, AISI 304 untuk dinding teras, *steam dryers*, dan *preheater tubing*, serta AISI 405 untuk *tube supports*^[2].

Selama pengoperasian reaktor nuklir, komponen struktur akan mengalami pembebanan dinamis yang berfluktuasi. Hal ini dapat mengakibatkan terjadinya cacat pada permukaan material sehingga memicu terjadinya pemusatan tegangan lokal pada material baja tahan karat. Kondisi tersebut memungkinkan komponen struktur mengalami penurunan ketahanan lelah dan ketahanan korosi^[3]. Selain itu, faktor utilisasi seperti kelelahan mekanik, tegangan termal serta faktor lingkungan seperti radiasi partikel neutron, sinar gamma, lingkungan dan temperatur air pendingin dapat mempercepat penuaan komponen struktur reaktor nuklir. Degradasi material dapat terjadi karena penuaan akan menimbulkan retak korosif, degradasi korosif atau *irradiation assisted stress corrosion cracking* (IASCC). Sinar gamma yang

diterima bahan struktur pendukung teras reaktor yang berada dalam lingkungan air dengan temperatur dan tekanan tinggi, dapat memicu bahan terkorosi dan menimbulkan retakan yang disebut IGSCC (*Intergranular Stress Corrosion Cracking*)^[4].

Salah satu cara untuk mengatasi permasalahan yang diuraikan di atas adalah meningkatkan sifat ketangguhan permukaan bahan struktur yaitu dengan cara pelapisan permukaan pada baja tahan karat. Pelapisan permukaan logam merupakan salah satu usaha untuk meningkatkan kekerasan, ketahanan aus, ketahanan korosi, dan ketahanan terhadap beban dinamis bahan struktur terhadap lingkungan operasi reaktor nuklir. Salah satu metode yang digunakan untuk pelapisan bahan struktur adalah metode *sputtering*. Mekanisme proses *sputtering* terdiri dari beberapa tahapan, yaitu ion-ion *sputter* (gas argon) dipercepat pada target, kemudian beberapa atom keluar dari permukaan target, dan atom-atom tersebut mengalir sehingga membentuk awan elektron di sekitar substrat yang selanjutnya atom-atom tersebut terdeposit membentuk lapisan tipis pada permukaan substrat (AISI 304)^[5].

Pang mendapatkan bahwa fluks oksigen berpengaruh terhadap mikrostruktur lapisan sehingga kenaikan fluks oksigen menyebabkan lapisan khrom oksida bertransformasi dari amorf ke kristalin. Kekerasan, modulus elastisitas, dan ketahanan aus baja tahan karat berlapis tipis meningkat seiring dengan meningkatnya fluks oksigen, namun adhesi lapisan menurun^[6]. Hasil penelitian Melendez, et al, yaitu lapisan tipis yang terdeposit pada permukaan baja tahan karat AISI 304 akan meningkatkan ketahanan korosi terhadap lingkungan agresif ion-ion Cl⁻ sehingga dapat menaikkan ketahanannya terhadap korosi sumuran (*pitting corrosion*)^[7]. Abu-Shgaiir, et.al dalam penelitiannya mendapatkan bahwa lapisan Cr_xO_y terdeposit di permukaan baja tahan karat pada temperatur <500 °C. Lapisan α-Cr₂O₃

terbentuk pada nisbah gas argon terhadap oksigen sama dengan 1, tegangan bias 25 V, yang menghasilkan kekerasan lapisan 30 GPa[8].

Sehubungan hal tersebut, maka dalam penelitian ini akan dilakukan proses pelapisan permukaan AISI 304 dengan bahan khrom sebagai target, argon sebagai *sputter* gas, dan gas oksigen sebagai dopan menggunakan metode *sputtering*. Selanjutnya, lapisan yang terbentuk pada permukaan AISI 304 dikarakterisasi untuk mendapatkan karakter mikrostruktur, kekerasan mikro, dan senyawa yang terbentuk dalam lapisan. Hipotesis yang diajukan adalah konsentrasi gas dopan, arus, dan waktu *sputtering* mempengaruhi ketebalan, kekerasan mikro dan senyawa kimia lapisan permukaan AISI 304.

METODOLOGI

Bahan yang digunakan dalam penelitian adalah pelat baja tahan karat (AISI 304) dimensi 1,5 cm x 1 cm x 2 mm, pelat khrom kemurnian 99,95% sebagai target, gas argon kemurnian 99,99% sebagai *gas sputter*, dan gas O₂ kemurnian 99,99% sebagai dopan. Sementara itu, bahan yang digunakan dalam karakterisasi lapisan pada permukaan AISI 304 adalah bahan *mounting* yaitu resin *acrylic* dan pengeras, kertas ampelas, pasta intan, serta bahan etsa. Peralatan yang digunakan dalam pelapisan permukaan AISI 304 adalah mesin DC-*Sputtering*, sedangkan peralatan untuk karakterisasi lapisan pada permukaan AISI 304 adalah mesin *accutom*, mesin gerinda dan poles, mikroskop optik untuk mengetahui mikrostruktur dan ketebalan lapisan khrom oksida, *microvickers hardness tester* untuk menentukan kekerasan mikro *base metal* dan lapisan permukaan AISI 304, serta difraktometer sinar-X untuk menentukan senyawa kimia yang terbentuk dalam proses pelapisan AISI 304.

Proses pelapisan permukaan AISI 304 dilakukan dengan mesin DC- *Sputtering* pada kondisi tegangan bias 5 kV, jarak antara substrat dan target 25 mm, tekanan 2.10^{-2} bar. Penelitian awal dilakukan dengan konsentrasi gas oksigen 0–50 %volume, arus 10 mA, dan waktu proses 2 jam. Dari hasil penelitian awal, sampel yang permukaannya telah terbentuk khrom oksida dengan kekerasan tertinggi pada kondisi konsentrasi oksigen tertentu dijadikan dasar untuk penelitian berikutnya dengan variasi arus 10, 15, dan 20 mA serta variasi waktu proses *sputtering* 1, 2, dan 3 jam. Langkah berikutnya, mesin DC-*Sputtering* dimatikan dan setelah dingin AISI 304 berlapis tipis khrom oksida dilepas dari pemegang spesimen.

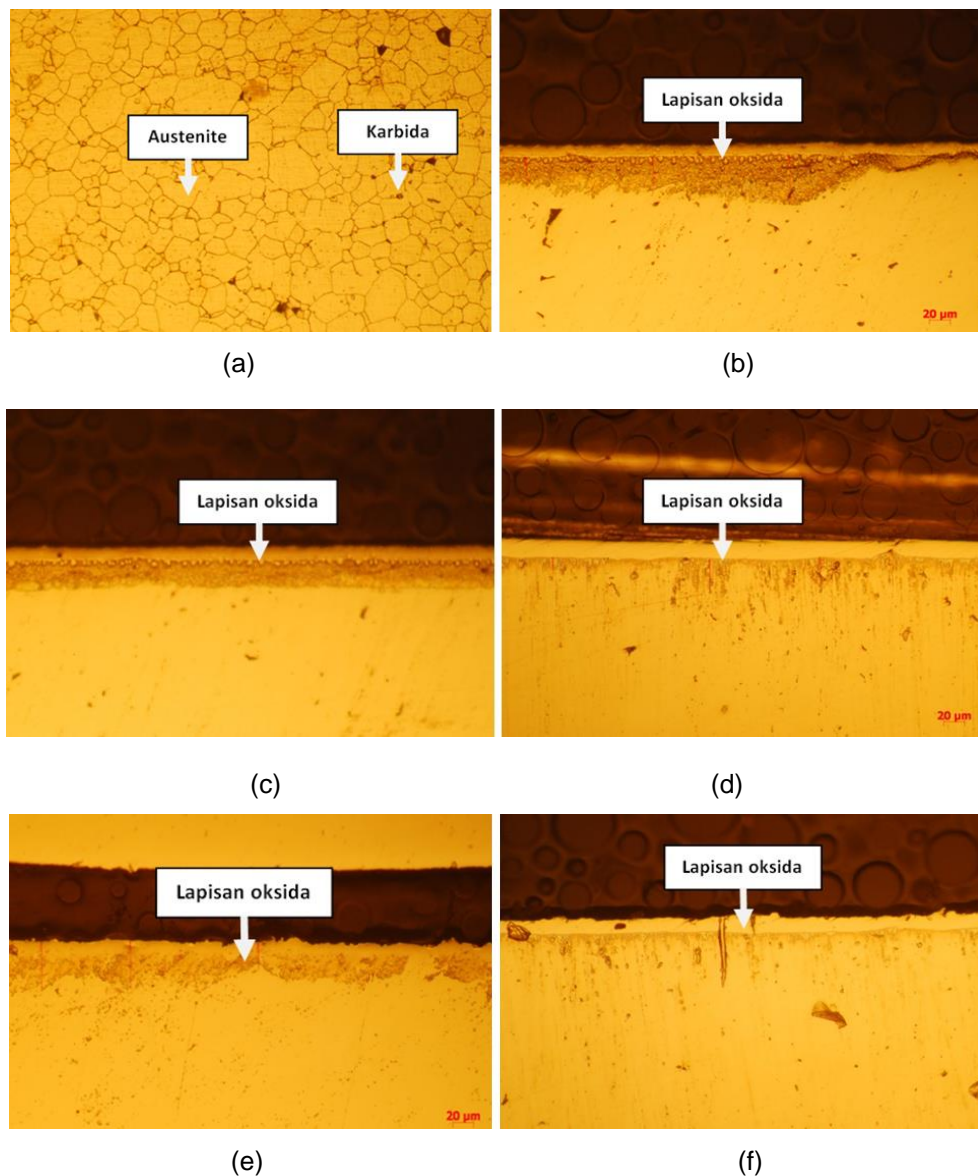
Karakterisasi terhadap lapisan permukaan AISI 304 dilakukan dengan tahapan sebagai berikut : (1) AISI 304 berlapis tipis dipotong dengan mesin *accutom* menjadi 2 bagian masing-masing untuk sampel metalografi dan kekerasan serta sampel uji XRD; (2) sampel metalografi dibingkai dengan resin *acrylic* dan pengeras, kemudian diampelas dengan kertas ampelas grit 320 hingga 1.500 untuk mendapatkan sampel dengan permukaan rata dan bebas goresan. Selanjutnya sampel dipoles dengan pasta intan untuk mendapatkan permukaan rata dan mengkilap, dan berikutnya dietsa; (3) pengamatan mikrostruktur sampel *base metal* dan lapisan permukaan AISI 304 menggunakan mikroskop optik; (4) pengujian kekerasan mikro sampel *base metal* dan lapisan permukaan AISI 304 menggunakan *microvickers hardness tester*; dan (5) pengujian komposisi senyawa kimia lapisan menggunakan XRD. Data yang diperoleh dari karakterisasi lapisan AISI 304 dianalisis untuk mengetahui karakter lapisan yaitu mikrostruktur *base metal*, antar muka logam-lapisan, ketebalan, kekerasan dan komposisi senyawa kimia lapisan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Mikrostruktur

Gambar 1 menunjukkan mikrostruktur lapisan permukaan AISI 304. Pada Gambar 1 (a) terlihat bahwa mikrostruktur *base metal*

dari sampel dengan fasa austenit dan endapan karbida di batas butir [7,9]. Gambar 1 (b), (c), (d), (e) dan (f) memperlihatkan mikrostruktur lapisan permukaan AISI 304 pada konsentrasi dopan masing-masing 10, 20, 30, 40, dan 50 %volume.

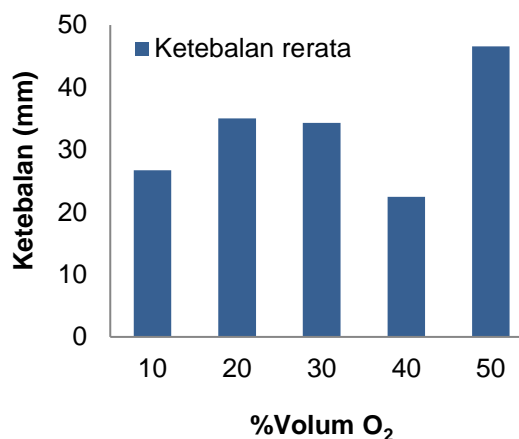


Gambar 1. Mikrostruktur AISI 304 berlapis tipis pada permukaannya dengan bahan target Cr, arus 10 mA, dan waktu sputtering 2 jam

- Base metal*
- Konsentrasi dopan 10 %volume O₂
- Konsentrasi dopan 20 %volume O₂
- Konsentrasi dopan 30 %volume O₂
- Konsentrasi dopan 40 %volume O₂
- Konsentrasi dopan 50 %volume O₂

Pada Gambar 1 terlihat adanya antar muka (*interface*) logam-lapisan yang nampak jelas membatasi logam dan lapisan, serta lapisan yang kompak dan homogen. Selain itu, dari antarmuka lapisan-logam terlihat bahwa daya rekat antara bahan pelapis dan *base metal* sangat baik. Gambar 1 (b), (c), (d), (e) dan (f) menunjukkan lapisan semakin tebal seiring dengan kenaikan konsentrasi dopan dalam rentang 10 – 30 %volume, kemudian menurun hingga konsentrasi 40 %volume dan kembali bertambah tebal pada 50 %volume. Dalam rentang konsentrasi dopan 10 – 30 %volume, semakin besar konsentrasi dopan maka kebolehdjian terbentuknya ion-ion negatif oksigen dalam proses *sputtering* semakin tinggi. Kondisi tersebut memberikan dampak pada kebolehdjian interaksi antara ion-ion negatif oksigen dengan partikel-partikel energi tinggi dari target khrom semakin besar. Partikel energi tinggi tersebut berasal dari khrom yang ditempatkan pada katoda sebagai target ditembak dengan ion-ion positif gas argon^[10]. Partikel-partikel dari target tersebut akan tersputter ke segala arah dan sebelum sampai ke substrat AISI 304 berinteraksi dengan ion-ion negatif oksigen yang berada di lingkungannya. Selanjutnya, hasil interaksinya berupa senyawa khrom oksida mengendap dan membentuk lapisan tipis pada permukaan AISI 304. Dengan demikian, semakin besar konsentrasi dopan oksigen maka ketebalan lapisan permukaan AISI 304 semakin tebal. Namun, ketebalan lapisan menurun pada rentang konsentrasi 30 – 40 %volume O₂ yang ditandai dengan ketidakrataan permukaan lapisan luar. Hal ini kemungkinan disebabkan lapisan yang terbentuk porous dan rontok. Hal ini menyebabkan, permukaan lapisan menjadi lebih kasar dibandingkan lokasi lapisan lain. Pada lokasi lapisan yang kasar terjadi pengintian deposit senyawa khrom oksida lebih tinggi dibandingkan lokasi lainnya sehingga terjadi pertumbuhan lapisan. Dengan demikian, lapisan menjadi lebih

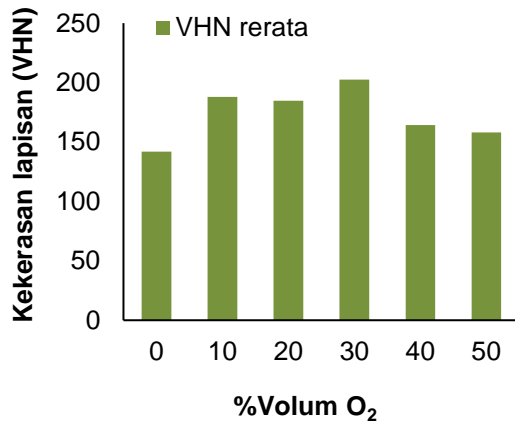
tebal hingga konsentrasi dopan 50 %volume. Data ketebalan lapisan permukaan AISI 304 dengan bahan target khrom sebagai fungsi konsentrasi oksigen pada arus 10 mA dan waktu 2 jam ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Ketebalan lapisan permukaan AISI 304 dengan bahan target khrom sebagai fungsi konsentrasi oksigen pada arus 10 mA dan waktu 2 jam.

Kekerasan

Kekerasan mikro *base metal* dan lapisan permukaan AISI 304 dapat diketahui dengan menggunakan peralatan *microvickers hardness tester*. Pada uji kekerasan mikro digunakan beban indenter sebesar 25 gf dengan waktu indentasi 10 detik, yang dilakukan pada 5 (lima) titik di lokasi *base metal* dan lapisan permukaan AISI 304. Kekerasan mikro rata-rata *base metal* dan lapisan permukaan AISI 304 ditunjukkan Gambar 3. Pada Gambar 3 terlihat bahwa kekerasan rata-rata *base metal* (AISI 304) adalah 141,84 VHN. Kekerasan lapisan pada permukaan AISI 304 dengan dopan 10 %volume O₂ dan 20 %volume O₂ relatif sama, yaitu masing-masing 188,06 VHN dan 184,74 VHN. Selanjutnya, kekerasan lapisan bertambah tinggi, yaitu 202,46 VHN pada 30 %volume O₂, kemudian menurun menjadi 164,3 VHN pada 40 %volume O₂ dan 157,92 VHN pada 50 %volume O₂.



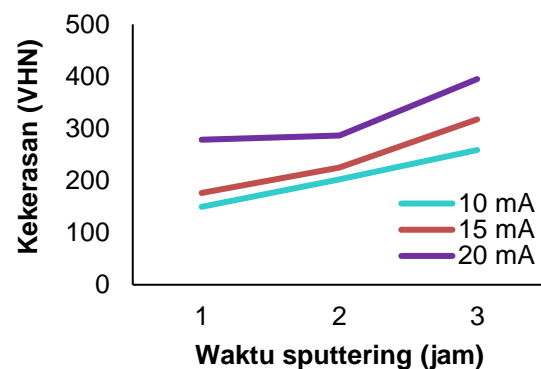
Gambar 3. Kekerasan lapisan permukaan AISI 304 dengan bahan target khrom sebagai fungsi konsentrasi oksigen pada arus 10 mA dan waktu 2 jam

Dari Gambar 3 diketahui bahwa proses pelapisan permukaan AISI 304 ditentukan oleh konsentrasi dopan. Semakin besar konsentrasi gas oksigen maka kebolehjadian terbentuknya ion-ion negatif oksigen semakin tinggi. Hal ini akan memberikan dampak pada kebolehjadian interaksi antara ion-ion negatif oksigen dengan partikel-partikel energi tinggi dari target semakin besar. Hasil interaksinya berupa senyawa khrom oksida mengendap dan membentuk lapisan tipis pada permukaan AISI 304. Dengan demikian, semakin besar konsentrasi dopan oksigen maka ketebalan lapisan permukaan AISI 304 semakin tebal. Namun, ketebalan lapisan tersebut akan berpengaruh terhadap kekerasan lapisan^[11]. Hal ini disebabkan semakin banyak ion negatif oksigen maka semakin cepat berinteraksi dengan partikel berenergi tinggi sehingga kebolehjadian membentuk senyawa khrom oksida stabil semakin rendah. Hal ini berdampak pada penurunan kekerasan lapisan seperti yang ditunjukkan pada sampel dengan konsentrasi dopan 40 – 50 %volume O₂.

Dengan demikian, ion-ion negatif oksigen memainkan peranan penting

selama proses deposisi lapisan pada permukaan baja tahan karat. Dari Gambar 2 dan 3 diketahui bahwa proses *sputtering* untuk sampel AISI 304 dengan konsentrasi dopan 30 %volume O₂ merupakan kondisi optimum pada arus 10 mA dan waktu proses 2 jam. Selanjutnya dilakukan proses *sputtering* baja tahan karat dengan konsentrasi dopan tetap, yaitu 30 % volume O₂ dengan variasi arus 10 - 20 mA serta variasi waktu proses 1 - 3 jam.

Data kekerasan lapisan ditunjukkan pada Gambar 4, yang memperlihatkan bahwa kekerasan lapisan pada permukaan AISI 304 bertambah tinggi seiring dengan bertambah besarnya arus dan waktu *sputtering*. Hal ini disebabkan semakin besar arus maka akan dihasilkan semakin banyak partikel berenergi tinggi dan aktivitas ion negatif oksigen semakin besar sehingga kebolehjadian interaksi antara partikel dan ion-ion oksigen bertambah besar yang ditandai dengan terbentuknya lapisan yang kompak. Selain itu, bertambah lamanya *sputtering* maka atom-atom khrom dan oksigen dalam senyawa khrom oksida lebih menata diri dan bertransformasi dari amorf ke kristalin sehingga terbentuk lapisan khrom oksida yang lebih stabil dan keras.

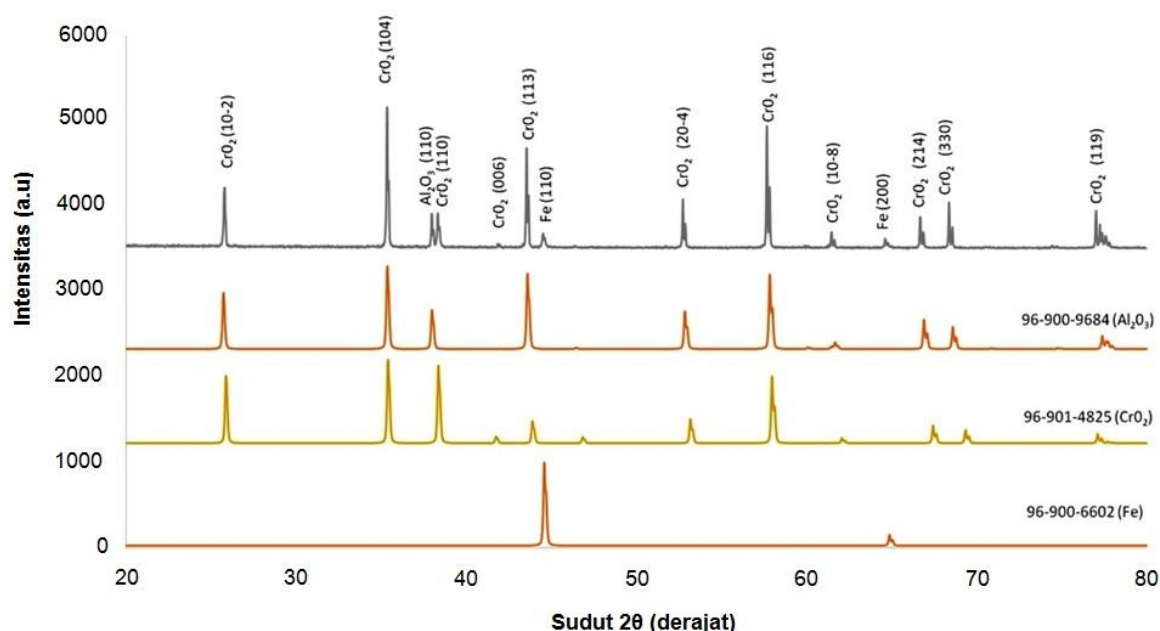


Gambar 4. Kekerasan lapisan permukaan AISI 304 sebagai fungsi arus dan waktu *sputtering* pada konsentrasi 30 %volume O₂.

Komposisi Kimia

Komposisi kimia berupa senyawa yang terbentuk dalam lapisan permukaan SS 304 dilakukan dengan peralatan difraktometer sinar-X. Gambar 5 menunjukkan pola difraksi sampel SS 304 dengan target khrom, Argon sebagai gas *sputter* dan dopan O₂ dengan konsentrasi 30 %volume, arus 10 mA dan waktu proses 2 jam. Hasil analisis Rietveld pada Gambar 5 memperlihatkan bahwa pada lapisan permukaan SS 304 berlapis tipis terdapat senyawa CrO₂ dan Al₂O₃ serta unsur Fe. Adanya senyawa CrO₂ membuktikan

terjadinya interaksi antara partikel energetik khrom dengan ion-ion negatif oksigen membentuk khrom oksida yang mengendap sebagai lapisan pada permukaan SS 304. Bentuk oksida dari khrom adalah CrO₂, CrO₃, Cr₂O₅, dan Cr₂O₃, dimana bentuk Cr₂O₃ paling stabil^[12,13]. Dengan demikian, proses *sputtering* ini belum sempurna karena belum terbentuk senyawa Cr₂O₃ yang kompak dan sangat keras dengan titik leleh 2.435 °C, densitas 5,22 g/cm³, dan struktur kristalnya heksagonal. Menurut diagram Ellingham, senyawa Cr₂O₃ terbentuk pada temperatur tinggi dan tekanan gas O₂ tinggi^[14,15].



Gambar 5. Pola difraksi sampel SS 304 berlapis tipis khrom oksida

SIMPULAN

Mikrostruktur baja tahan karat AISI 304 berlapis tipis khrom oksida mempunyai fasa austenit dan endapan karbida di batas butir. Ketebalan lapisan naik dalam rentang 0 – 30 %volume, menurun pada 30 – 40 %volume, dan bertambah tebal pada 40 – 50 %volume gas O₂. Kekerasan lapisan bertambah tinggi hingga doping gas oksigen 30 %volume, kemudian menurun hingga 50 %volume gas O₂. Dalam rentang konsentrasi oksigen 0 – 50% volume

dengan arus 10 mA dan waktu proses 2 jam diperoleh kondisi optimal SS 304 pada konsentrasi dopan 30 %volume O₂. Pada konsentrasi dopan tetap dengan arus 10 – 20 mA dan waktu proses 1 – 3 jam diketahui kekerasan lapisan pada permukaan SS 304 bertambah tinggi seiring dengan bertambah besarnya arus dan waktu *sputtering*. Pada konsentrasi dopan 30 %volume O₂, arus 10 mA dan waktu 2 jam, lapisan yang terbentuk mengandung senyawa khrom karbida (CrO₂).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Hari Suprihatin (PSTA-BATAN) dan Purwanta (PTBBN-BATAN) yang telah membantu pelaksanaan proses pelapisan permukaan baja tahan karat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. A. K. Bhaduri, K. Laha, "Development of improved materials for structural components of sodium-cooled fast reactors," *Procedia Engineering*, vol. 130, pp. 598-608, 2015.
- [2]. T. Allen, H. Bulet, R.K. Nanstad, and M. Samaras, "Advanced structural materials and cladding," *Journal of MCANES*, vol. 34, no. 1, pp. 20-27, 2009.
- [3]. P. L. Andressen, "Stress corrosion cracking of current structural materials in commercial nuclear power plants," *Corrosion*, vol. 69, no.10, pp. 1024-1038, 2013.
- [4]. D. S. Gomes, *et al*, "Evaluation of corrosion on the fuel performance of stainless steel cladding," *APJ Nuclear Science Tech.*, vol. 2, no. 40, pp. 1-6. 2016.
- [5]. C. Sun, X. Yang, W. Yen, "Effect of high-Al austenitic stainless alloy coatings prepared by magnetron sputtering on high temperature oxidation resistance of 316 stainless steel," *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, vol. 37, no. 6, pp. 590-596. 2017.
- [6]. X. Pang, "Microstructures and mechanical properties of chromium oxide coatings," *J. Mater. Res*, vol. 22, no.12, pp. 3531-3537. 2007.
- [7]. U.M.R Seelam, and C. Suryanarayana, "Metallography of Sputter Deposited SS 304 + Al Coatings," *Journal Metallography, Microstructures, and Analysis*, vol. 2, no. 5, pp. 287-298, 2013.
- [8]. C. L. Melendez, *et.al*, "Evaluation of corrosion resistance of thin films 304 stainless steel deposited by sputtering," *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 7, pp. 1149-1159, 2012.
- [9]. U.M.R. Seelam, and C. Suryanarayana. *Metallography of Sputter Deposited SS 304 + Al Coatings*, *J. Metallography Microstructures and Analysis*, vol. 2, no.5, pp. 287-298, 2013.
- [10]. D. Magnfalt,. *Fundamental Processes in Thin Film Growth : The Origin of Compressive Stress and the Dynamics of the Early Growth Stages*, Dissertations No. 1592, Linkoping University, Sweden, 2014.
- [11]. J. Ding, *et.al*, "Microstructure, mechanical, oxidation and corrosion properties of the Cr-Al-Si-N coatings deposited by a hybrid sputtering system," *Coatings*, vol. 7, no.119, pp. 1-17. 2017.
- [12]. K. Abu-Shgaiir, *et.al.*, "Characterizing crystalline chromium oxide thin film growth parameters," *Rev. Adv. Matter. Sci.*, vol. 24, pp. 64-68, 2010.
- [13]. J. Lin, W.D. Sproul, "Surface and properties of Cr₂O₃ coatings deposited using DCMS, PDCMS, and DOMS," *Journal Surface and Coating Technology*, vol. 276, pp. 70-76, 2015.
- [14]. A. Mittal, *et.al.*, "Some thermodynamics aspects of the oxides of chromium," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 45, no. 2, pp. 338-344, 2014..
- [15]. Javid, S., *et.al.*, "Deposition of chromium thin films on stainless steel-304 substrates using a low energy plasma focus device," *Journal of Fusion Energy*, vol. 31, pp. 242-248, 2012.

