



PENGARUH PROSES PERLAKUAN PANAS TERHADAP NILAI KEKERASAN *METAL MATRIX COMPOSITE COATING* PADA SUBSTRAT SS316 UNTUK APLIKASI PIPA *BOILER*

Erie Martides^{a,*}, Budi Prawara^a, Endro Junianto^a, Frida Rahmania Putri^b, dan Djoko Hadi Prajitno^c

^aPusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronik – LIPI
Gedung 20 Kampus LIPI, Jl. Cisitu No. 21/154D, Bandung, Indonesia 40135

^bJurusan Teknik Metalurgi, UNJANI
Jl. Terusan Jenderal Gatot Subroto, Bandung, Indonesia

^cPusat Sain Teknologi Nuklir Terapan – BATAN
Jl. Tamansari No. 71, Bandung, Indonesia 40132

*Email : erie.martides@gmail.com

Masuk tanggal : 14-5-2018, revisi tanggal : 29-11-2018, diterima untuk diterbitkan tanggal : 09-01-2019

Intisari

Deposisi lapisan komposit dalam matriks logam (MMC) $\text{NiCr}+\text{Cr}_3\text{C}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ dan $\text{NiCr}+\text{WC}_{12}\text{Co}+\text{Al}_2\text{O}_3$ pada permukaan material SS316 untuk aplikasi pada pipa *boiler* batu bara telah dilakukan menggunakan teknik HVOF (*high velocity oxygen fuel thermal spray coating*) dengan parameter tekanan bahan bakar dan jarak penembakan yang konstan. Selanjutnya lapisan MMC dipanaskan dengan variasi temperatur 600, 700 dan 800 °C dan pendinginan menggunakan air untuk mendapatkan nilai kekerasan yang optimum sesuai dengan aplikasi pada pipa boiler pembangkit listrik. Nilai kekerasan yang tertinggi diperoleh pada lapisan $\text{NiCr}+\text{WC}_{12}\text{Co}+\text{Al}_2\text{O}_3$ dengan proses perlakuan panas 800 °C yaitu sebesar 551,31 VHN.

Kata Kunci: *High velocity oxygen fuel, metal matrix composites coating, baja tahan karat 316*

Abstract

Deposition of Metal Matrix Composite (MMC) Coating of $\text{NiCr}+\text{Cr}_3\text{C}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ and $\text{NiCr}+\text{WC}_{12}\text{Co}+\text{Al}_2\text{O}_3$ on the surface of SS316 material for coal fire boiler application have been performed using High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) technique with constant parameters of fuel pressure and spray distance. After that the MMC layers are heated with temperature variation of 600, 700 and 800 °C with water quenched to obtain optimum hardness value according to the application of boiler tube of power plant. The highest hardness value applied to the $\text{NiCr}+\text{WC}_{12}\text{Co}+\text{Al}_2\text{O}_3$ layer with the heat treatment process of 800 °C ie. 551.31 VHN.

Keywords: *High velocity oxygen fuel, metal matrix composites coating, stainless steel 316*

1. PENDAHULUAN

Baja tahan karat (*stainless steel*) SS316 banyak digunakan sebagai material untuk komponen diberbagai industri, karena memiliki ketahanan korosi yang baik, stabil pada temperatur tinggi, dan memiliki transfer panas yang lebih baik apabila dibandingkan dengan SS304 [1]. Pipa boiler (*boiler tube*) pada pembangkit listrik seringkali terbuat dari material SS316 yang mampu bekerja pada lingkungan yang korosif, yaitu banyak mengandung oksigen, sulfur, dan karbon dari hasil pembakaran batubara. Disisi lain, SS316 apabila diaplikasikan pada temperatur antara 500 – 850 °C akan mengalami fenomena sensitisasi yaitu

terbentuknya presipitat karbida krom di sepanjang batas butir, yang dikenal dengan *chrom depleted zone* sehingga menyebabkan rentan terjadinya korosi batas butir [2]. Akibat dari fenomena tersebut akan menurunkan ketahanan korosi dan sifat mekanik seperti kekerasan dan ketahanan aus, sehingga akan berdampak pada penurunan umur pakai komponen tersebut.

Beberapa penelitian sebelumnya, untuk meningkatkan sifat mekanik sesuai dengan kebutuhan aplikasi dari material SS316 yaitu dengan cara mendeposisikan material *coating* baik itu cermet, metal, atau *ceramic coating* pada permukaan SS316 menggunakan metode thermal

spray coating [3]. *Metal matrix composite* seringkali digunakan sebagai bahan untuk melapisi material yang membutuhkan ketahanan terhadap temperatur tinggi dengan lingkungan yang korosif, karena memiliki kekuatan yang tinggi, kekakuan, kekerasan, ketahanan terhadap aus dan dampak tinggi, CTE (*coefficient thermal expansion*) yang rendah, dan mempunyai densitas yang rendah. Sedangkan nickel chromium (NiCr) banyak dipilih sebagai material matriks pada MMC karena mempunyai kemampuan untuk menahan oksidasi pada temperatur tinggi, dan memiliki temperatur leleh yang tinggi pula [4]. Sedangkan karbida khromium (CrC), tungsten karbida kobal (WC-Co), serta aluminium oksida (Al_2O_3) dipilih sebagai material penguat untuk pelapis MMC karena keduanya memiliki nilai kekerasan yang sangat tinggi sehingga akan tahan terhadap gesekan dan tumbukan. Memadukan 2 (dua) dari 3 (tiga) material di atas sebagai matriks dan penguat akan menghasilkan material baru yang dapat mengatasi korosi pada temperatur tinggi dan erosi pada pipa boiler.

Metode HVOF (*high velocity oxygen fuel thermal spray coating*) dipilih untuk mendeposisikan material pelapis (*material coating*) pada permukaan pipa boiler karena proses tersebut memiliki temperatur pembakaran yang tidak terlalu tinggi dibanding proses *thermal spray coating* lainnya (3200 °C), tetapi kecepatan partikelnya sangat tinggi (1200Mts/sec). Lapisan yang dihasilkan proses HVOF sangat padat dengan jumlah degradasi, oksidasi dan transformasi fasa yang rendah, sehingga menghasilkan persentasi porositi yang rendah dengan kekuatan adhesi yang tinggi [5].

Deposisi material pelapis pada substrat dengan metode *thermal spray coating* akan menimbulkan tegangan sisa (*residual stress*) yang berasal dari 2 penyebab, yaitu pada tahap deposisi material *feedstock* dan yang kedua yaitu berkaitan dengan proses pendinginan [6]. Material *feedstock* yang mencair seluruhnya/sebagian akan menumbuk substrat yang secara langsung memanaskan dan memadatkan logam cair pada permukaan substrat. Perbedaan temperatur antara substrat dan logam cair yang tinggi dengan jarak yang berdekatan, tidak memungkinkan substrat untuk berkontraksi secara sempurna, sehingga menyebabkan tegangan sisa yang dikenal dengan *quenching stress*.

Kehadiran *quenching stress* pada hasil *thermal spray coating* akan menurunkan sifat mekanik dari material, karena berkontribusi terhadap cracking, dan distorsi berlebih pada substrat [6]-[7]. Untuk menghilangkan tegangan

sisa pada *coating* dan substrat perlu dilakukan *post-heat treatment* untuk meningkatkan sifat mekanik.

Pada penelitian ini dilakukan deposisi 2 variasi MMC *coating* menggunakan teknik HVOF *thermal spray coating* dengan parameter yang konstan. Untuk meningkatkan nilai kekerasan lapisan dilakukan proses perlakuan panas dengan beberapa variasi temperatur pemanasan. Dari hasil tersebut akan dilakukan pembahasan secara komprehensif untuk mengetahui pengaruh *post-heat treatment* pada nilai kekerasan lapisan serta mendapatkan nilai kekerasan yang optimum untuk aplikasi pada pipa boiler.

2. PROSEDUR PERCOBAAN

Variasi bahan *feedstock* pada percobaan ini yaitu MMC-1 (NiCr + Cr_3C_2 + Al_2O_3) dan MMC-2 (NiCr + $WC_{12}Co$ + Al_2O_3) dengan ukuran serbuk seluruhnya sama yaitu #270 hasil dari proses *ball mill* dan *sieving* sebelum dilakukan proses *mixing* menggunakan *mixer* tipe Y. Serbuk MMC dan serbuk *bond coat* (#325) dilakukan proses pemanasan 80 – 100 °C dengan tujuan untuk menghilangkan uap air yang terkandung dalam serbuk selama proses *sieving* dan penyimpanan. Proses *blasting* menggunakan alumina dengan sudut penyemprotan 45° merupakan proses persiapan permukaan untuk menghilangkan segala bentuk kontaminan dan juga membentuk profil pada permukaan substrat. Teknik HVOF *thermal spray coating* digunakan untuk mendeposisikan bahan *feedstock bond coat* dan *top coat* (MMC) pada permukaan SS316 secara berturut-turut setelah sebelumnya dilakukan proses pre-heat substrat ≤ 150 °C.

Lapisan yang telah melekat pada permukaan SS316 dilakukan proses perlakuan panas pada tungku *muffle* dengan variasi temperatur 600, 700 dan 800 °C, masing-masing dengan waktu penahanan (*holding time*) selama 4 jam, kemudian dilanjutkan pendinginan cepat (*quench*) dengan media air. Untuk mengetahui kualitas lapisan dilakukan beberapa pengujian dan pemeriksaan, seperti pengujian kekerasan, pemeriksaan struktur mikro, dan analisis XRD (*x-ray diffraction*).

Pengujian kekerasan menggunakan metode *micro vickers* yang mengacu pada standar ASTM E384 [8] dengan indentor piramida intan dengan sudut 136°, beban pengujian sebesar 50 gram, dan lama pembebanan selama 10 detik pada 3 titik yang berbeda pada setiap spesimen. Spesimen pengujian diambil pada daerah melintang (*cross section*) untuk mengetahui perbedaan kekerasan pada substrat, *bond coat*

dan *top coat*. Pemeriksaan struktur mikro dilakukan menggunakan SEM (*scanning electron microscopy*). Analisis menggunakan XRD dilakukan untuk mengidentifikasi senyawa yang terbentuk pada lapisan hasil deposisi MMC *coating* pada permukaan SS316.

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Struktur Mikro

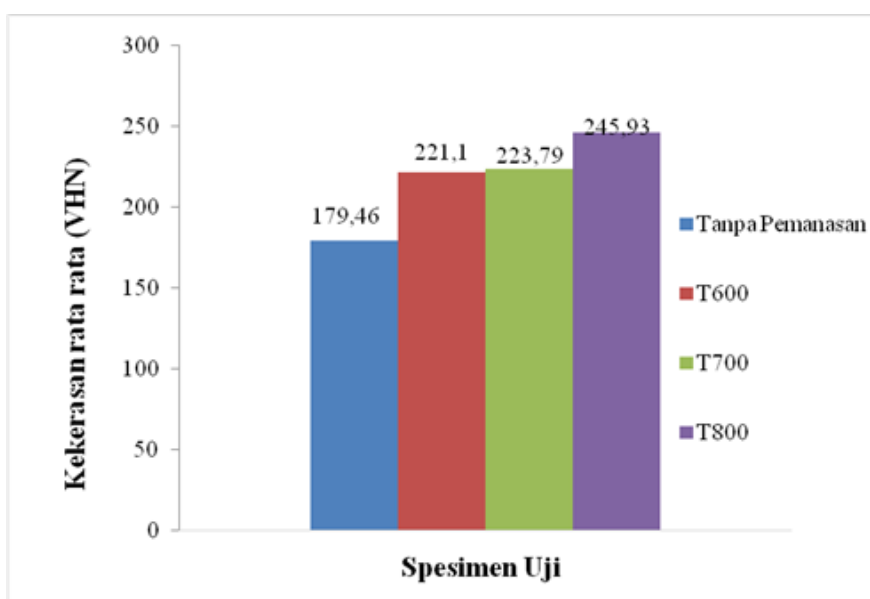
Gambar 1 menunjukkan nilai kekerasan *coating* MMC-1 ($\text{NiCr-Cr}_3\text{C}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$) terhadap material SS316 tanpa perlakuan panas dan SS316 dengan proses perlakuan panas, dimana nilai kekerasan lapisan MMC-1 semakin meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur perlakuan panas. Nilai kekerasan tertinggi yaitu pada material SS316 dengan perlakuan panas 800 °C mencapai nilai 245,93VHN. Meningkatnya nilai kekerasan sangat dipengaruhi oleh pembentukan karbida krom yang banyak terbentuk pada temperatur yang semakin tinggi. Unsur krom pada temperatur di atas 500 °C akan berikatan dengan unsur karbon yang terdapat pada MMC dan membentuk karbida krom [4].

Pada umumnya nilai kekerasan akan menurun seiring dengan meningkatnya temperatur kerja, karena pada temperatur yang tinggi terjadi penurunan efek penguatan pada batas butir disebabkan peningkatan *grain coarsening* [9]. Tetapi hasil dari proses *quenching* dengan media air menghasilkan ukuran butir yang semakin menurun, hal ini akan menjadikan semakin banyak dislokasi yang menumpuk di batas butir, dan untuk melewati batas butir tersebut, dislokasi

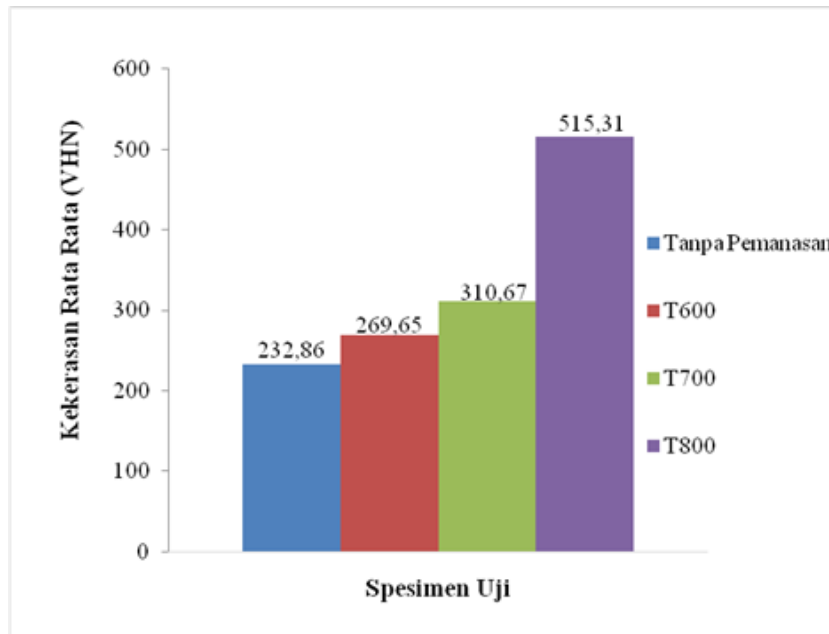
membutuhkan banyak energi. Dislokasi yang menumpuk di batas butir menyebabkan terjadinya penguatan [10].

Pada Gambar 2, terlihat bahwa nilai kekerasan MMC-2 ($\text{NiCr} + \text{WC}_{12}\text{Co} + \text{Al}_2\text{O}_3$) semakin bertambah seiring dengan meningkatnya temperatur perlakuan panas. Material dengan lapisan *coating* tanpa perlakuan panas memiliki nilai kekerasan sebesar 232,86 VHN dan kekerasan semakin meningkat pada temperatur 800 °C menjadi 551,31VHN. Sama halnya dengan MMC-1 meningkatnya nilai kekerasan pada material SS316 yang dikenai proses perlakuan panas karena terbentuknya karbida di temperatur tinggi. Apabila dilihat dari karakterisasi hasil pengujian XRD, pada MMC-2 jumlah senyawa karbida tungsten yang terbentuk tinggi yang sangat berkontribusi terhadap nilai kekerasan lapisan MMC-2.

Karakterisasi *coating* menggunakan XRD pada lapisan hasil deposisi menggunakan proses HVOF *thermal spray coating* dilakukan pada material MMC-1 dan MMC-2 dengan scanning 2θ dari 10° sampai dengan 100°. Pada Gambar 3 terlihat puncak utama adalah menunjukkan keberadaan Ni sebagai unsur utama dengan nilai $2\theta = 43^\circ$, dan diikuti senyawa Cr_3C_2 dan Cr_7C_3 berturut-turut di $2\theta = 52^\circ$ dan 76° , sedangkan pada $2\theta = 11^\circ$ yaitu senyawa Al_2O_3 . Pada hasil XRD pada lapisan ($\text{NiCr-Cr}_3\text{C}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$) tidak nampak hadirnya oksida sebagai fasa mayor maupun minor sebagai penghalang untuk terjadinya difusi oksigen dari lingkungan ke dalam lapisan.



Gambar 1. Perbandingan kekerasan pada *coating* MMC-1 dengan beban 50gr

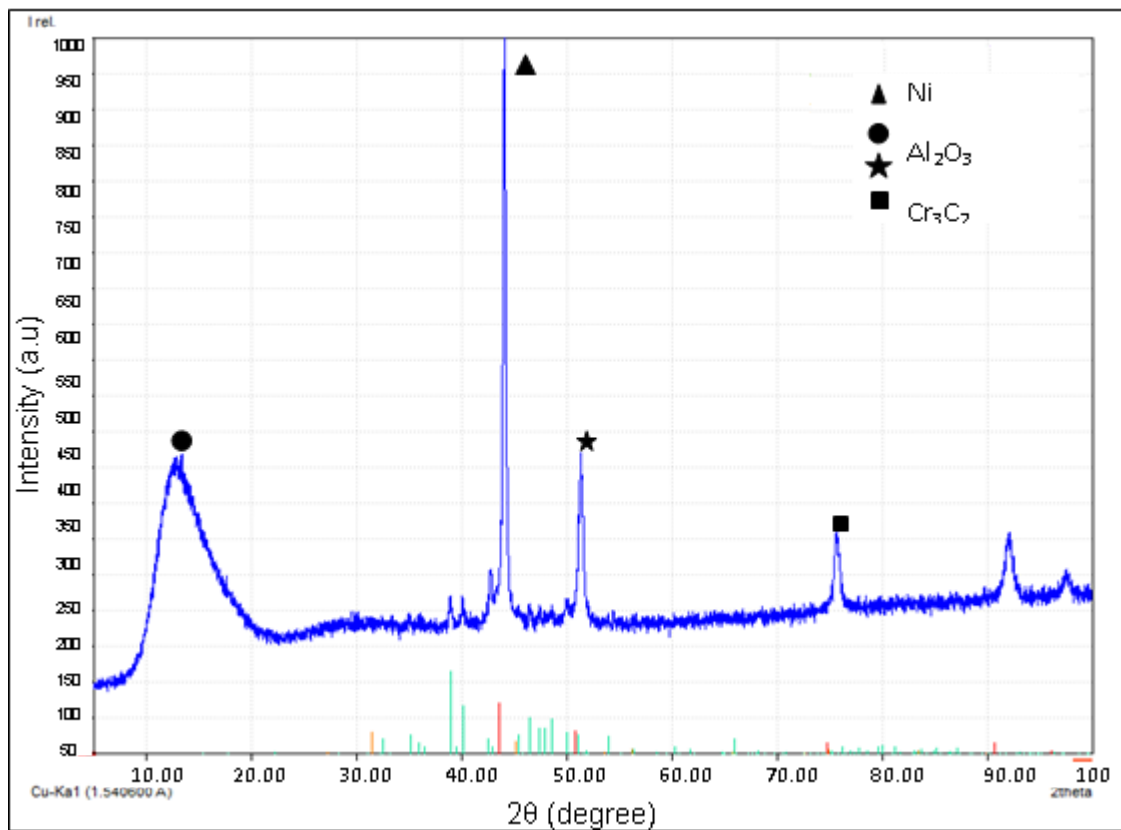


Gambar 2. Perbandingan kekerasan pada *coating* MMC-2 dengan beban 50gr

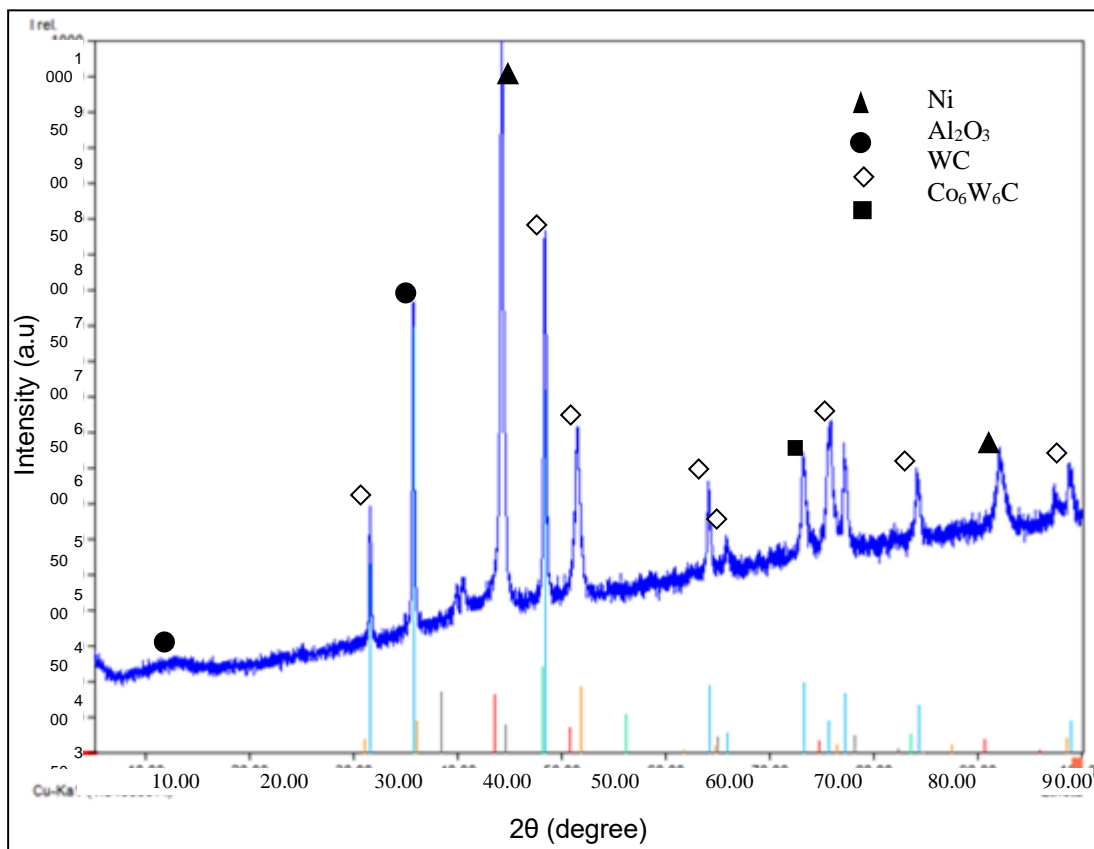
Gambar 4 adalah karakterisasi XRD pada lapisan (NiCr + WC₁₂Co + Al₂O₃), pola difraksi menunjukkan puncak tertinggi pada $2\theta = 43^\circ$ yaitu Ni yang merupakan unsur utama pada lapisan. Senyawa karbida lain yang terbentuk pada lapisan yaitu senyawa WC, W₂C dan Co₆W₆C yang memberikan kontribusi pada kekerasan lapisan dan ketahanan aus lapisan. Senyawa-senyawa tersebut semakin meningkat karena adanya interaksi yang sangat kompleks antara unsur WC-Co dan oksigen pada saat deposisi partikel cair pada substrat. Tetapi nilai kekerasan dan ketahanan aus akan menurun apabila terjadi dekarburasi dari WC [11]. Pada Gambar 5 merupakan struktur mikro MMC-1 (NiCr-Cr₃C₂-Al₂O₃) untuk lapisan tanpa perlakuan panas dan setelah perlakuan panas dengan variasi temperatur pemanasan 600, 700, dan 800 °C menggunakan SEM dengan metode *back scattered electron* sehingga memunculkan warna gelap dan terang. Dapat terlihat pada struktur mikro MMC-1 memunculkan *splats*, *unmelted particle*, dan juga adanya porositas atau oksidasi, dimana pada struktur mikro dengan temperatur pemanasan yang semakin meningkat, jumlah porositas yang terbentuk semakin menurun, tetapi warna gelap yang diindikasikan sebagai senyawa karbida krom semakin banyak.

Keberadaan senyawa karbida Cr₃C₂ dan Cr₇C₃ di sepanjang fasa Ni sangat dipengaruhi oleh teknik penyemprotan pada saat proses HVOF berlangsung. Pada proses tersebut melibatkan pendinginan cepat dari serbuk partikel cair ketika terdeposisi pada substrat yang suhunya lebih rendah dari pada partikel cair sehingga menghasilkan fasa nonequilibrium dan metastabil pada lapisan [12].

Pada Gambar 6 yang merupakan lapisan MMC-2 (NiCr + WC₁₂Co + Al₂O₃) memunculkan dua warna yakni warna gelap dan warna terang. Pada gambar tersebut terlihat bagian yang berbentuk lamellar merupakan *splats* yang didominasi dari serbuk matriks yakni Ni dan Cr, sedangkan pada bagian yang berbentuk agak bulat yang menumpuk di antara *splats* dan bagian atas lapisan merupakan bagian yang tidak mencair ataupun mencair sebagian (*unmelted particles*) pada saat proses deposisi *coating* pada substrat [13].



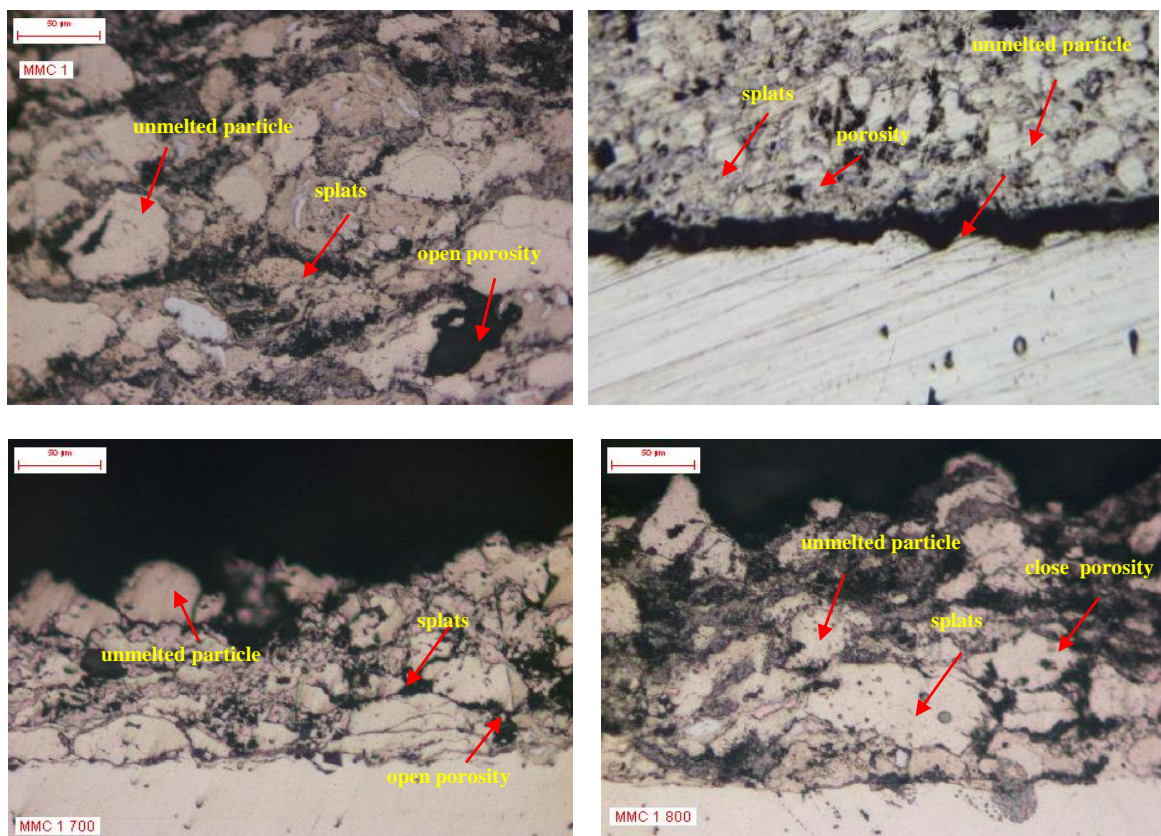
Gambar 3. Karakterisasi XRD lapisan MMC-1 (NiCr-Cr₃C₂-Al₂O₃)



Gambar 4. Karakterisasi XRD lapisan MMC-2 (NiCr + WC₁₂Co + Al₂O₃)

Sama halnya dengan MMC-1, pada MMC-2 pun nilai porositas yang terlihat pada struktur

mikro lapisan porositas dan oksida tidak mendominasi dengan semakin tingginya



Gambar 5. Foto struktur mikro MMC-1 dengan mikroskop optik untuk kondisi : (a) Tanpa perlakuan panas, (b) Hasil perlakuan panas pada $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$, (c) Hasil perlakuan panas pada $T = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$, (d) Hasil perlakuan panas pada $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$

temperatur perlakuan panas. Keberadaan oksida dan porositas pada umumnya terletak di bagian antar *splats* yang merupakan batas antara layer satu dengan yang lainnya. Jumlah porositas yang semakin rendah serta terbentuknya senyawa karbida di temperatur tinggi pada saat proses perlakuan panas sangat mempengaruhi sifat mekanik dari lapisan, yaitu nilai kekerasan, dan juga ketahanan aus yang semakin meningkat yang sangat sesuai dengan aplikasi *boiler tube* pada pembangkit listrik yang bekerja pada temperatur tinggi dengan lingkungan erosi dari abu terbang (*fly ash*) hasil pembakaran batubara sebagai bahan bakar pada pembangkit tersebut [14].

4. KESIMPULAN

Proses perlakuan panas dengan pendinginan cepat (*water quenched*) setelah proses HVOF sangat mempengaruhi sifat mekanik lapisan MMC pada permukaan baja tahan karat SS316. Dari kedua jenis MMC *coating*, nilai kekerasan yang tertinggi dimiliki oleh MMC-2 ($\text{NiCr} + \text{WC}_{12}\text{Co} + \text{Al}_2\text{O}_3$) dengan temperatur perlakuan panas $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, yaitu 551,31 VHN. Semakin tinggi temperatur perlakuan panas akan membentuk karbida dengan jumlah yang semakin tinggi, serta akan menurunkan jumlah porositas pada lapisan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didukung dan didanai dari program penelitian kegiatan Unggulan LIPI sub program Pengembangan Material dan Rekayasa Manufaktur (PMERM) tahun 2017.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. Balamanikandasuthan, K. Arun, dan S. S. Palam, "Design and fabrication of erosion protection shield for boiler tubes and its analysis," *Int. J. Res. Mech. Mater. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 39–52, 2015.
- [2] A. N. Okpala, A. Christian, dan E. Amula, "Effect of sensitization on the corrosion of austenitic stainless steel in fresh water," *J. Mech. Civ. Eng.*, vol. 13, no. 6, pp. 133–137, 2016.
- [3] H. Saini, "Wear characterisation of thermal spray coatings on Stainless Steel 316 L," *Int. J. Adv. Res.*, vol. 3, pp. 1111–1119, 2017.
- [4] M. Mruthunjaya dan K. I. Parashivamurthy, "Microstructural characterization and hot erosion behavior of WC-12Co coated stainless steel using HVOF technique," *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, vol. 7, no. 3, pp. 53–62, 2016.

- [5] S. Amin dan H. Panchal, "A Review on thermal spray coating processes," *Curr. Trends Eng. Res.*, vol. 2, no. 4, pp. 556–563, 2016.
- [6] P. Araujo, D. Chicot, M. Staia, dan J. Lesage, "Residual stresses and adhesion of thermal spray coatings," *Surf. Eng.*, vol. 21, no. 1, pp. 35–40, 2005.
- [7] M. Giacomantonio, S. Gulizia, M. Jahedi, Y. Wong, R. Moore, dan M. Valimberti, "Heat treatment of thermally sprayed Ni-based wear and corrosion coatings," *Mat. Forum*, vol. 35, pp. 48–55, 2011.
- [8] ASTM Standard E384, "Standard test method for microindentation hardness of materials," Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, USA, 2011.
- [9] B. Al-Mangour, P. Vo, R. Mongrain, E. Irissou, dan S. Yue, "Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of stainless steel 316L coatings produced by cold spray for biomedical applications," *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 23, no. 4, pp. 641–652, 2014.
- [10] J. Ridhwan, E. Hamzah, M. Z. Selamat, Z. Zulfattah, dan M. H. M. Hafidzal, "Effect of aging treatment on the microstructures and hardness of Fe-Ni-Cr superalloy," *Int. J. Automot. Mech. Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 1430–1441, 2013.
- [11] H. T. and A. G. Jalali Azizpour, S. Norouzi, dan H. M. Majd, "Application of HVOF thermal spraying in high speed gas compressor shafts," *World Acad. Sci. Eng. Technol. Int. J. Mech. Mechatronics Eng.*, vol. 4, No:9, no. 9, pp. 859–861, 2010.
- [12] R. Bhatia, H. Singh, dan B. S. Sidhu, "Characterisation of 80% Cr₃c₂-20% (Ni-20cr) coating and erosion behaviour," *Asian J. Eng. Appl. Tech.*, vol. 1, no. 2, pp. 5–12, 2012.
- [13] K. H. Stern, *Metallurgical and Ceramic Protective Coatings*, Chapman and Hall, 2015.
- [14] T. Crowe, A. Guraydin, dan A. T. Harding, "The effects of heat treatment on area percent porosity and corrosion behavior of high-nickel thermal spray coatings approval page," *Mater. Eng.*, pp. 1–27, 2011.

