



PAPER – OPEN ACCESS

Studi Pengaruh Oksidasi Thermal cyclic Dan Heat treatment Pada Lapisan Komposit Logam Berpenguat Keramik WC12Co – NiCrAlY Dengan Metode Thermal Spray HVOF

Author : Muhammad Dafa Arkaan, dkk
DOI : 10.32734/ee.v6i1.1901
Electronic ISSN : 2654-7031
Print ISSN : 2654-7031

Volume 6 Issue 1 – 2023 TALENTA Conference Series: Energy and Engineering (EE)



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NoDerivatives 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/).
Published under licence by TALENTA Publisher, Universitas Sumatera Utara



Studi Pengaruh Oksidasi *Thermal cyclic* Dan *Heat treatment* Pada Lapisan Komposit Logam Berpenguat Keramik WC12Co – NiCrAlY Dengan Metode Thermal Spray HVOF

Muhammad Dafa Arkaan^{a,1}, Endro Junianto^{b,2*}, Edy Riyanto^{c,3}, Budi Prawara^{c,4},
Rd. Dadan Ramdan^{a,5}, Erie Martides^{c,6}

^aProgram Studi Teknik Material/Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara Teknik Material, ITB, Indonesia

^bPusat Riset Mekatronika Cerdas, BRIN, Indonesia

^cPusat Riset Material Maju, BRIN, Indonesia

¹dafaarkaan@gmail.com, ²endrojuni56@gmail.com, ³edy.riyanto@brin.go.id, ⁴budi006@brin.go.id,

⁵dadan@material.itb.ac.id, ⁶erie001@brin.go.id.

Abstrak

Degradasi permukaan merupakan masalah utama yang terjadi pada berbagai komponen *engineering* yang diaplikasikan pada lingkungan yang agresif serta beroperasi pada temperatur tinggi karena mengalami oksidasi terutama pada kondisi operasi *thermal cyclic*. Salah satu cara untuk mengatasi masalah tersebut adalah dengan meningkatkan sifat permukaan material melalui pelapisan. Pada penelitian ini, substrat SS 316 dilapisi dengan serbuk komposit logam berpenguat keramik WC-Co/NiCrAlY menggunakan metode *thermal spray* HVOF dengan parameter yang konstan. Beberapa pengujian dan pemeriksaan dilakukan terhadap lapisan tersebut untuk mengetahui kualitas lapisan, seperti pengujian oksidasi *thermal cyclic*, uji kekerasan menggunakan Vickers, SEM, XRD, dan *heat treatment*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa laju oksidasi lapisan mencapai nilai tertinggi pada awal siklus pengujian dan menurun pada pertengahan siklus. Kehadiran *unmelted particle*, porositas dan oksida pada spesimen *As spray*, *Thermal Cyclic* dan *Heat Treatment* mempengaruhi nilai kekerasan lapisan topcoat, dengan nilai tertinggi adalah $545,6 \pm 35,53$ HV_{0,5}.

Kata Kunci: *Thermal Cyclic*; *Thermal Spray* HVOF; WC – Co/NiCrAlY; *Heat Treatment*

Abstract

Surface degradation is a major problem in various engineering components that are applied to aggressive environments and operate at high temperatures due to oxidation, especially under thermal cyclic operating conditions. One way to overcome this problem is to improve the material's surface properties through coatings. In this study, the SS 316 substrate was coated with WC-Co/NiCrAlY ceramic matrix composite powder using the HVOF thermal spray method with constant parameters. Several tests and inspections were carried out on the coating to determine the quality of the coating, such as cyclic thermal oxidation testing and hardness testing using Vickers, SEM, XRD, and heat treatment. The test results showed that the oxidation rate of the coating reached its highest value at the beginning of the test cycle and decreased in the middle of the cycle. The presence of unmelted particles, porosity, and oxides in the *As spray*, *Thermal Cyclic*, and *Heat Treatment* specimens affected the hardness value of the topcoat layer, with the highest value being $545,6 \pm 35,53$ HV_{0,5}.

Keywords: *Thermal Cyclic*; *Thermal Spray* HVOF; WC – Co/NiCrAlY; *Heat Treatment*

1. Pendahuluan

Degradasi permukaan seringkali terjadi pada berbagai komponen *engineering* yang diaplikasikan pada lingkungan yang agresif serta beroperasi pada temperatur tinggi. Pada kondisi lingkungan tersebut, komponen seringkali mengalami kegagalan karena oksidasi yang disebabkan kondisi operasi *thermal cyclic*. Kondisi operasi *thermal cyclic* merupakan suatu kondisi lingkungan kerja komponen yang mengalami pembebanan termal dalam sejumlah siklus pemanasan dan pendinginan. Kondisi lingkungan kerja tersebut dapat menyebabkan komponen rentan terjadi oksidasi. Pemilihan material dan perlakuannya sangat penting dilakukan terutama material yang mampu bertahan dari oksidasi yang terjadi karena kondisi operasi *thermal cyclic*. Salah satu perlakuan material untuk meningkatkan sifat permukaan material komponen agar dapat bertahan lama pada kondisi operasi tersebut [1]. Dengan melakukan pelapisan permukaan menggunakan material logam tahan oksidasi pada komponen dapat meningkatkan umur pakai komponen serta mencegah terjadinya penurunan sifat-sifat mekanik material karena oksidasi dan korosi, terutama pada kondisi operasi dengan temperatur yang tinggi [2]-[4].

Metode pelapisan *thermal spray* dapat digunakan untuk mengurangi permasalahan berkaitan dengan degradasi permukaan. *High Velocity Oxy-Fuel* (HVOF) coating merupakan satu metode dari Thermal Spray Coating yang dinilai mampu membentuk lapisan yang keras *dense*, dan memiliki *bond strength* yang tinggi dengan tingkat oksida dan porositas yang lebih rendah, serta *residual stress* lapisan lebih rendah dibandingkan dengan jenis proses *thermal spray* yang lain, sehingga dapat meningkatkan ketahanan aus dan korosi [1].

Lapisan WC – Co yang dibentuk dengan proses *thermal spray* memiliki kekerasan yang tinggi, ketahanan aus serta ketahanan kimia yang baik [5]. Lapisan WC – Co dan WC-CoCr telah diketahui memiliki sifat mekanik permukaan yang baik dalam lingkungan yang agresif seperti pada temperatur tinggi [3]. Sedangkan paduan MCrAlY (M→Co; Ni) digunakan untuk membentuk lapisan pengikat antara lapisan keramik dengan substrat, atau dengan kata lain sebagai *bondcoat*. Saat ini, paduan MCrAlY merupakan paduan yang banyak digunakan untuk aplikasi operasi dengan temperatur yang tinggi [6-7]. Selain itu penggunaan MCrAlY sebagai *bondcoat* adalah untuk memberikan kecocokan ekspansi termal yang baik antara *topcoat* dengan substrat [6]. Namun penggunaan lapisan MCrAlY tidak dianjurkan pada aplikasi yang melibatkan gabungan oksidasi dengan erosi, karena lapisan ini memiliki sifat ketahanan aus yang rendah. Maka dari itu penggabungan paduan ini dengan WC – Co dapat meningkatkan ketahanan aus sekaligus ketahanan terhadap oksidasi [7-9].

Pada penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh deposisi *metal matrix composite coating* ada substrat SS 316 terhadap ketahanan pada korosi temperatur tinggi, Lapisan yang dibuat terdiri dari NiCrAlY sebagai *bondcoat* dan komposit logam berpenguat keramik yaitu gabungan dari 30% WC12Co dan 70% NiCrAlY sebagai *topcoat*. Beberapa pengujian dan karakterisasi akan dilakukan terhadap lapisan ini, seperti pengujian *thermal cyclic*, XRD, SEM-EDS *mapping*, dan *microvickers*. Selain itu, lapisan yang dibuat juga akan diuji dengan *heat treatment* untuk mengetahui pengaruhnya terhadap sifat mekanik dan struktur mikro lapisan.

2. Bahan dan Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan baja tahan karat SS 316, yang digunakan sebagai material substrat dengan ukuran 20 × 20 × 5 mm. Komposisi kimia aktual substrat ditentukan dengan metode OES yang dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kandungan Komposisi kimia substrat

Unsur	C	Cr	Ni	Mo	Fe
Komposisi	0,037	16,4	9,94	1,95	Bal

Proses persiapan pelapisan substrat diawali dengan proses grit blasting sehingga diperoleh nilai kekasaran permukaan rata – rata (Ra) yaitu $4,24 \pm 0,2 \mu\text{m}$ pada substrat. Proses pembuatan serbuk *coating* (*bond coat* dan *topcoat*) melalui proses pengurangan ukuran serbuk dengan *Ball milling* dan *sieving* untuk masing-masing serbuk, yang kemudian dilakukan proses *blending* untuk mendapatkan serbuk *coating metal matrix composite* untuk *topcoat*. Lapisan *bondcoat* yang digunakan yaitu NiCrAlY dengan ukuran 400 mesh atau $37 \mu\text{m}$, sedangkan untuk lapisan *topcoat* menggunakan serbuk WC12Co dengan ukuran $15 - 45 \mu\text{m}$ dan serbuk NiCrAlY dengan ukuran $53 - 106 \mu\text{m}$. Komposisi campuran kedua serbuk *coating* untuk *topcoat* adalah 30%wt WC12Co + 70%wt NiCrAlY. Proses penyemprotan dengan metode HVOF dilakukan dengan parameter konstan selama proses penyemprotan. Nilai parameter proses *thermal spray* HVOF ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter proses *thermal spray* HVOF

Parameter	Nilai	Satuan
Tekanan udara	6,2	Bar
Tekanan oksigen	8	Bar
Tekanan nitrogen	5	Bar
Tekanan propana	5,5	Bar
Putaran powder feeder	5	Bar
Temperatur preheating substrat	100	°C
Sudut penyemprotan	90	°

Pengujian *thermal cyclic* yang dilakukan mengacu pada standar ASTM C1525 dan beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya yang berkaitan dengan proses uji *thermal cyclic* [3]. Pada pengujian *thermal cyclic* dilakukan pemanasan dan pendinginan sebanyak 25 siklus dimana 1 siklus pengujian terdiri dari pemanasan sampel pada temperatur 750 oC selama 1 jam lalu didinginkan di lingkungan pada temperatur ruang selama 20 menit. Proses *heat treatment* dilakukan terhadap sampel setelah proses penyemprotan pada temperatur $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ selama 2 jam lalu didinginkan di dalam tungku hingga temperatur kamar. Perhitungan perubahan berat lapisan dilakukan setiap 5 siklus pengujian *thermal cyclic*. Pengujian kekerasan lapisan dan karakterisasi SEM dilakukan pada lapisan setelah penyemprotan (sampel AS), lapisan setelah pengujian *thermal cyclic* (sampel TC), dan lapisan setelah proses *heat treatment* (sampel HT). Untuk karakterisasi XRD dilakukan pada lapisan (sampel TC).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Ketebalan Lapisan

Pengukuran ketebalan lapisan dilakukan pada sampel setelah proses penyemprotan, dan pengujian *thermal cyclic* dilakukan dengan SEM. Hasil pengukuran nilai ketebalan lapisan *topcoat* dapat dilihat pada Tabel 3.

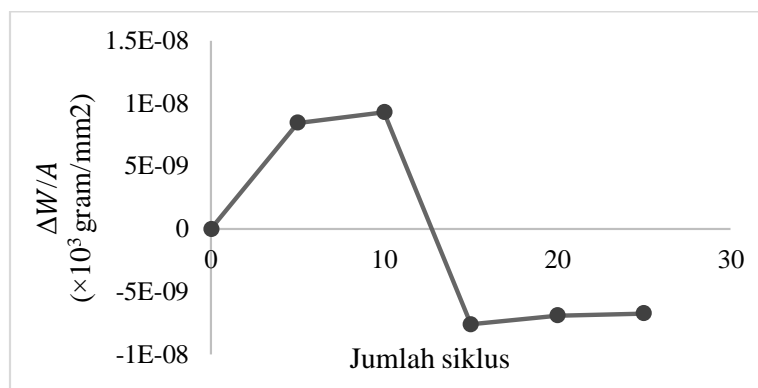
Tabel 3. Data nilai ketebalan lapisan *topcoat* pada sampel AS dan TC

Jenis Sampel	Ketebalan Lapisan <i>Topcoat</i> (μm)
AS	$73,58 \pm 4,34$
TC	$63,73 \pm 0,32$

Terjadi penurunan nilai ketebalan lapisan *topcoat* sebesar 13,4% karena pengujian *thermal cyclic* yang dilakukan menyebabkan terjadi proses oksidasi, dimana membentuk lapisan oksida dengan ketebalan tertentu yang cukup tebal selama pengujian, sehingga tidak dapat lagi menempel pada substrat.

3.2. Hasil Pengujian Thermal Cyclic

Penimbangan berat sampel untuk pengujian *thermal cyclic* dilakukan setiap 5 siklus pengujian sampel TC. Total siklus pengujian yang dilakukan adalah 25 siklus. Kurva perubahan massa per satuan luas $\left(\frac{\Delta W}{A}\right)$ dapat dilihat pada Gambar 1.



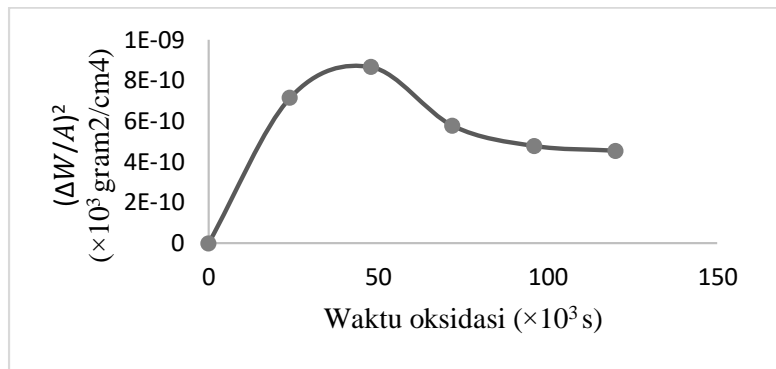
Gambar 1. Kurva perubahan nilai $\frac{\Delta W}{A}$ pada setiap siklus

Gambar 1 dapat dilihat terjadi kenaikan serta penurunan berat lapisan selama proses pengujian *thermal cyclic*. Jika diamati pada 10 siklus pertama terjadi penambahan berat lapisan. Hal ini diperkirakan karena terjadi pembentukan lapisan oksida selama pengujian *thermal cyclic* sehingga menyebabkan terjadi penambahan berat pada sampel. Selanjutnya penurunan berat sampel yang terjadi dapat diamati pada siklus ke-10 sampai dengan 15. Hal ini diperkirakan karena lapisan oksida yang telah terbentuk cukup tebal serta bersifat rapuh sehingga terlepas dari substrat dan terjadi penurunan berat pada lapisan [10].

Penentuan kinetika oksidasi lapisan (K_p) yang terjadi setelah pengujian *thermal cyclic* dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan (1) [11].

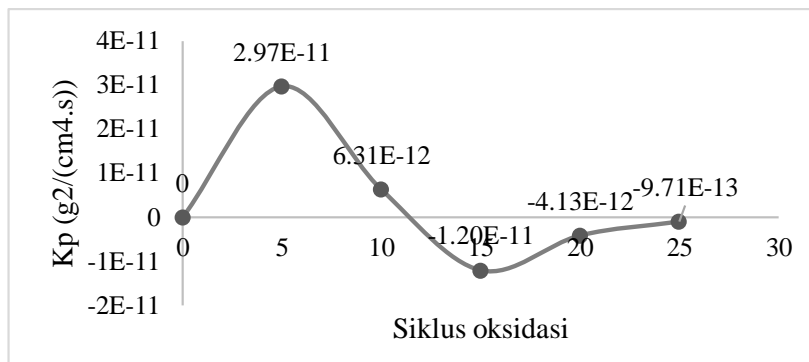
$$\left(\frac{\Delta W}{A}\right)^2 = K_p t + C \quad (1)$$

Nilai K_p dapat diperoleh dengan mendapatkan gradien dari persamaan garis regresi linier dari kurva $\left(\frac{\Delta W}{A}\right)^2$ terhadap waktu oksidasi (t). Nilai K_p yang diperoleh akan menunjukkan laju oksidasi lapisan selama proses pengujian. Sehingga dengan mensubstitusi nilai $\frac{\Delta W}{A}$ ke persamaan (1), maka dapat diperoleh nilai $\left(\frac{\Delta W}{A}\right)^2$ pada setiap waktu oksidasi. Setelah pengolahan data telah dilakukan, maka *plot* waktu oksidasi dan $\left(\frac{\Delta W}{A}\right)^2$ dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Kurva perubahan nilai $(\frac{\Delta W}{A})^2$ terhadap waktu oksidasi

Dari hasil plot nilai $(\frac{\Delta W}{A})^2$ terhadap waktu oksidasi pada Gambar 2, dapat dilihat bahwa plot nilai yang diperoleh tidak dapat dilakukan regresi linier, sehingga diperkirakan nilai K_p lapisan pada setiap siklus berbeda – beda. Maka penentuan nilai K_p pada setiap siklus dapat dilakukan dengan mencari gradien garis linier pada tiap waktu oksidasi. Nilai K_p di setiap siklus dapat dilihat pada Gambar 3.

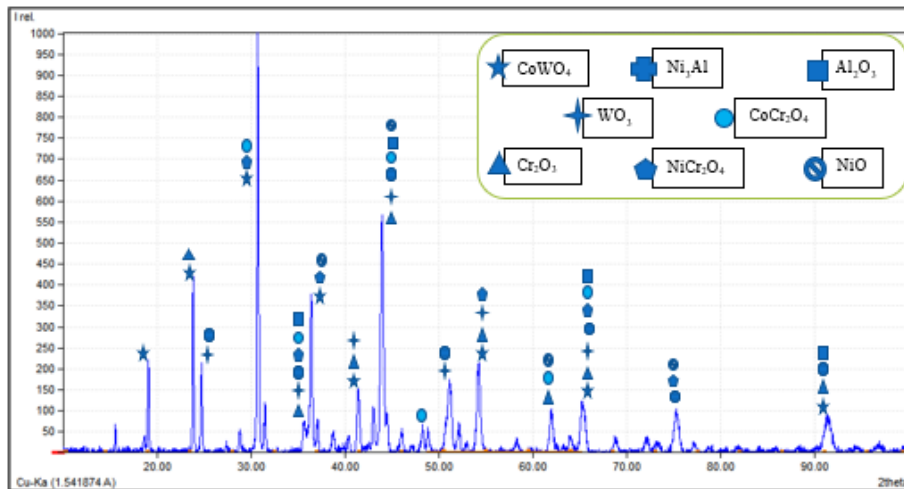


Gambar 3. Plot nilai K_p terhadap siklus oksidasi

Berdasarkan Gambar 3, nilai K_p pada awal siklus hingga siklus ke-5 bernilai positif. Selanjutnya setelah siklus ke-5 sampai dengan siklus ke-15, nilai K_p terus mengalami penurunan. Dan setelah siklus ke-15 nilai K_p kembali mengalami peningkatan yang relatif sedikit. Dari data nilai K_p pada setiap siklus tersebut diperkirakan bahwa lapisan yang telah dibuat akan mengalami oksidasi dengan laju yang relatif tinggi pada awal siklus pengujian, namun setelahnya lapisan akan mengalami penurunan laju oksidasi hingga pertengahan siklus pengujian. Selanjutnya laju oksidasi lapisan akan kembali mengalami sedikit peningkatan. Sehingga dapat disimpulkan bahwa lapisan yang dibentuk mengalami oksidasi pada awal siklus hingga siklus ke-5 lalu setelahnya lapisan akan memasuki daerah pasivasi dimana terjadi penurunan laju oksidasi dan berat lapisan cenderung stabil.

3.3. Hasil Karakterisasi XRD Serbuk Campuran $WC12Co - NiCrAlY$, Sampel Setelah Pengujian Oksidasi (TC)

Analisa terhadap hasil karakterisasi XRD dari sampel setelah pengujian *thermal cyclic*, dimana hasil karakterisasi XRD sampel TC dapat dilihat pada Gambar 4.

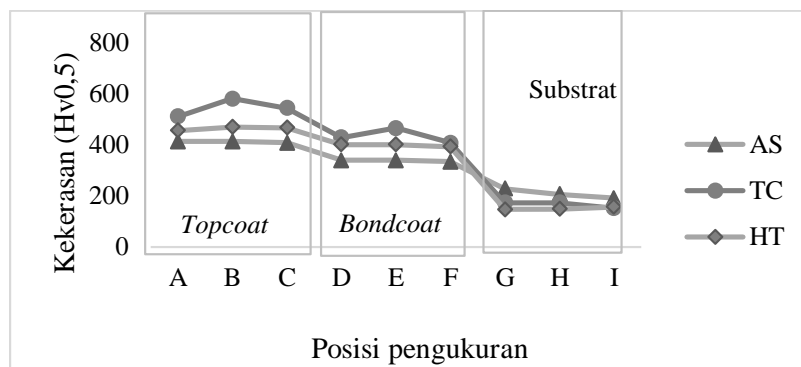


Gambar 4. Hasil analisis kurva XRD sampel TC

Gambar 4 menunjukkan fasa – fasa yang terbentuk pada lapisan setelah pengujian *thermal cyclic* yaitu Al_2O_3 , Cr_2O_3 , WO_3 , Ni_3Al , NiO , $CoWO_4$, $NiCr_2O_4$, dan $CoCr_2O_4$. Dari hasil analisis kurva XRD dapat dilihat bahwa lapisan terdiri dari oksida Al, Cr, dan Ni yang diperkirakan mampu meningkatkan ketahanan oksidasi. Selain itu pada lapisan juga terbentuk fasa oksida spinel seperti $CoWO_4$, $NiCr_2O_4$, dan $CoCr_2O_4$. Terbentuknya $CoCr_2O_4$ pada permukaan lapisan diperkirakan mampu menahan pembentukan CoO sehingga ketahanan oksidasi akan meningkat. Dan juga segregasi fasa Ni_3Al yang kemungkinan terjadi selama proses oksidasi diperkirakan dapat menahan difusivitas Al sehingga reaksi pembentukan Al_2O_3 lebih lambat [3].

3.4. Hasil Pengujian Keras Lapisan

Setelah pengujian kekerasan dilakukan ketiga sampel AS, TC, dan HT pada daerah lapisan *topcoat* dan *bondcoat*, hasil nilai kekerasan rata – rata yang diperoleh dapat dilihat pada Gambar 5.



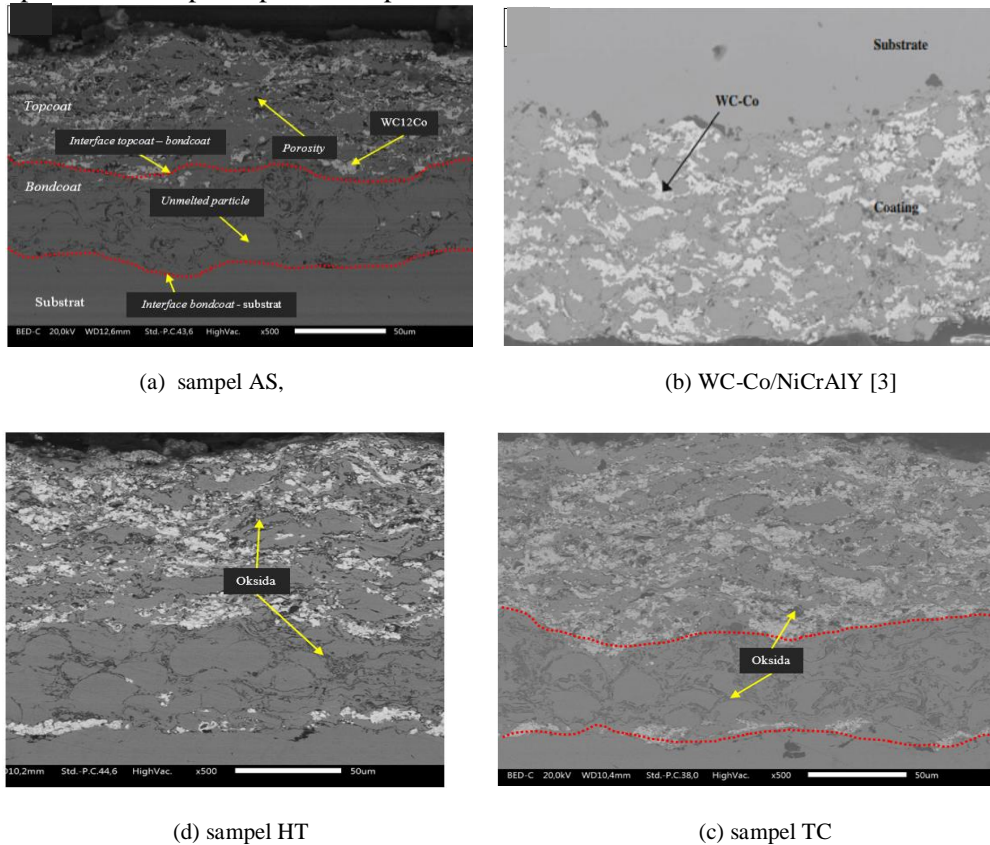
Gambar 5. Grafik perbandingan nilai kekerasan lapisan topcoat, bondcoat, dan substrat dari sampel AS, TC, dan HT.

Hasil perbandingan nilai kekerasan lapisan *topcoat*, *bondcoat*, dan substrat dari sampel AS, TC, dan HT yang terdapat pada Gambar 5 menunjukkan bahwa secara keseluruhan lapisan dari seluruh sampel mengalami penurunan nilai kekerasan, dimana nilai kekerasan tertinggi yaitu lapisan *topcoat*, lalu lapisan *bondcoat*, dan yang terendah adalah nilai kekerasan substrat. Adanya perbedaan nilai kekerasan karena jenis material penyusunnya yang berbeda.

Lapisan *topcoat* yang merupakan lapisan komposit berpenguat keramik memiliki kekerasan tertinggi karena terdapat karbida tungsten sebagai *reinforcement* bagi matriks NiCrAlY sehingga kekerasan lapisan *topcoat* menjadi lebih tinggi [12]. Nilai kekerasan akan dipengaruhi oleh jenis dan komposisi material penyusun, serta struktur mikro yang dimiliki oleh material.

3.5 Struktur Mikro Lapisan

Pengamatan struktur mikro dilakukan pada sampel AS, sampel TC, dan sampel HT menggunakan SEM perbesaran 500x. Berikut ini pembahasan mengenai hasil pengamatan struktur mikro yang telah dilakukan. Hasil pengamatan struktur mikro lapisan dari sampel dapat dilihat pada Gambar 6.



(a) sampel AS,

(b) WC-Co/NiCrAlY [3]

(d) sampel HT

(c) sampel TC

Gambar 6. Struktur mikro dari penampang lapisan

Gambar 6(a) menunjukkan bahwa penampang sampel memiliki tiga daerah yang berbeda yaitu daerah substrat, daerah lapisan *bondcoat* dan terakhir daerah lapisan *topcoat*. Lapisan *topcoat* terdapat bagian yang berwarna putih yang diperkirakan merupakan agregat WC dan Co yang diselubungi paduan NiCrAlY, yang mana juga dapat diamati pada struktur mikro pada Gambar 6(b) yang merupakan struktur mikro dari WC-Co/NiCrAlY[3]. Hal ini menandakan bahwa penyebaran partikel serbuk WC12Co merata di sepanjang lapisan sehingga dapat menjelaskan lebih tingginya kekerasan lapisan *topcoat* daripada lapisan *bondcoat* ataupun substrat [13].

Hasil pengamatan struktur mikro lapisan dari sampel TC pada Gambar 6(c) dapat terlihat warna abu – abu tua di daerah pertemuan antar *splat* pada struktur mikro lapisan dari sampel TC. Hal tersebut menunjukkan telah terjadi oksidasi pada lapisan [14]. Oksida pada lapisan yang terbentuk setelah proses oksidasi juga diperkirakan menyebabkan peningkatan kekerasan pada lapisan setelah pengujian *thermal cyclic*.

Gambar 6(d). hasil pengamatan struktur mikro lapisan dari sampel HT yang menunjukkan bahwa pada penampang struktur mikro lapisan juga terlihat warna abu – abu tua di daerah pertemuan antar *splat* yang menandakan bahwa lapisan mengalami oksidasi. Oksidasi yang terjadi diperkirakan karena *heat treatment* tidak dilakukan pada kondisi atmosfer yang vakum [15]. Selain itu pada struktur mikro penampang lapisan *topcoat* terjadi pengurangan porositas yang ditandai dengan semakin sedikit bintik hitam yang terlihat. Hal tersebut diperkirakan karena telah terjadi proses homogenisasi struktur mikro pada penampang lapisan pada sampel HT [5]. *Heat treatment* akan mempengaruhi struktur mikro lapisan serta lingkungan proses *heat treatment* juga akan mempengaruhi terjadinya proses oksidasi pada lapisan.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pelapisan dengan *thermal spray* HVOF meningkatkan sifat permukaan material terhadap oksidasi dan *thermal cyclic*. Sehingga metode ini dapat di aplikasikan pada komponen yang beroperasi di temperatur tinggi seperti pipa *boiler*.

4. Kesimpulan

1. Laju oksidasi tertinggi dari lapisan WC12Co – NiCrAlY terjadi pada 5 siklus pertama yaitu $2,97 \times 10^{-11} \text{ g}^2/(\text{cm}^4.\text{s})$, selanjutnya laju oksidasi akan mengalami penurunan hingga titik terendah pada siklus ke-15 yaitu $-1,2 \times 10^{-11} \text{ g}^2/(\text{cm}^4.\text{s})$. Hingga siklus ke-25 laju oksidasi mengalami sedikit peningkatan dan relatif stabil.
2. Berdasarkan hasil SEM, pada struktur mikro lapisan sampel AS, TC dan HT dapat terlihat adanya cacat lapisan seperti *unmelted particle* dan porositas. Akan tetapi pada sampel TC dan HT terdapat garis berwarna abu – abu gelap dan cukup tebal pada perbatasan *splat* yang diperkirakan merupakan oksida. Selain itu porositas lapisan sampel HT terlihat lebih sedikit dibandingkan dengan sampel AS.
3. Berdasarkan hasil analisis kurva XRD, terbentuk fasa – fasa oksida pada lapisan setelah pengujian *thermal cyclic* yaitu Al_2O_3 , Cr_2O_3 , WO_3 , Ni_3Al , NiO , CoWO_4 , NiCr_2O_4 , dan CoCr_2O_4 .
4. Terjadi peningkatan nilai kekerasan lapisan setelah pengujian *thermal cyclic* dan setelah *heat treatment*. Kekerasan rata – rata lapisan *topcoat* dari sampel AS, TC, dan HT berturut – turut adalah $412 \pm 3,46 \text{ HV}_{0,5}$; $545,6 \pm 35,53 \text{ HV}_{0,5}$; dan $464,67 \pm 7,57 \text{ HV}_{0,5}$. Sedangkan kekerasan rata – rata lapisan *bondcoat* dari sampel AS, TC, dan HT berturut – turut adalah $338 \pm 3,46 \text{ HV}_{0,5}$; $434,33 \pm 29,37 \text{ HV}_{0,5}$; dan $398,33 \pm 4,62 \text{ HV}_{0,5}$. Selanjutnya urutan nilai kekerasan tertinggi yaitu lapisan *topcoat*, lalu lapisan *bondcoat*, dan terendah adalah nilai kekerasan substrat.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Pusat Riset Mekatronika Cerdas – BRIN untuk fasilitas riset di laboratoriu *Thermal Spray Coating* HVOF dan Teknik Material, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara - ITB.

Referensi

- [1] H. Vasudev, L. Thakur, A. Bansal, H. Singh, and S. Zafar, “High temperature oxidation and erosion behaviour of HVOF sprayed bi-layer alloy-718/Nicaly coating,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 362, pp. 366–380, 2019.
- [2] S. Takahashi, M. Hatano, Y. Kojima, Y. Harada, A. Kawasaki, and F. Ono, “Thermal cycle properties of plasma sprayed oxidation-resistant metallic coatings,” *Materials Science Forum*, vol. 696, pp. 296–301, 2011.
- [3] B. Somasundaram, R. Kadoli, and M. R. Ramesh, “Evaluation of cyclic oxidation and hot corrosion behavior of HVOF-sprayed WC-co/nicaly coating,” *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 23, no. 6, pp. 1000–1008, 2014.
- [4] A. Kumar, V. Srivastava, and N. K. Mishra, “Oxidation resistance of uncoated & detonation -gun sprayed wc-12co and Ni-20CR coatings on T-22 boiler steel at 900°C,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 377, p. 012076, 2018.
- [5] J. Cheng, J. Peng, M. Wang, K. Bo, K. Li, G. Zhang, and Z. Yang, “Effects of cyclic heating and water-cooling on the mechanical properties of WC-Co Coatings,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 831, p. 154769, 2020.
- [6] L. Y. Ni, C. Liu, H. Huang, and C. G. Zhou, “Thermal cycling behavior of thermal barrier coatings with HVOF Nicaly Bond coat,” *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 20, no. 5, pp. 1133–1138, 2011.

- [7] M. Vicente Mendoza, C. de Morado Rueda, A. Mosqueda Sánchez, and F. Juárez López, “*Thermal cyclic* oxidation of nicocralyta coatings manufactured by Combustion Flame Spray,” *Materials Today Communications*, vol. 25, p. 101617, 2020.
- [8] D. Das, R. Verma, and V. Pathak, “Plasma sprayed wc-12%co-coatings for TBC applications on diesel engine piston,” *International Journal of Surface Engineering and Interdisciplinary Materials Science*, vol. 7, no. 1, pp. 37–54, 2019.
- [9] M. Mathapati, R. M. R., and M. Doddamani, “Cyclic oxidation behavior of plasma sprayed nicraly/WC-co/Cenosphere coating,” *AIP Conference Proceedings*, 2018.
- [10] F. Ghadami, A. Sabour Rouh Aghdam, and S. Ghadami, “A comprehensive study on the microstructure evolution and oxidation resistance of conventional and nanocrystalline MCrAlY coatings,” *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, 2021.
- [11] R. Verma and G. Kaushal, “Cyclic oxidation behaviour and characterization of HVOF deposited Inconel 718 coatings at 700°C,” *MATERIALS, MECHANICS & MODELING (NCMMM-2020)*, 2021.
- [12] D. K. Das, P. C. Mishra, S. Singh, and R. K. Thakur, “Properties of ceramic-reinforced aluminium matrix composites - A Review,” *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, vol. 9, no. 1, 2014.
- [13] A. Zakeri, F. Ghadami, A. Sabour Rouhaghdam, and B. Saeedi, “Study on production of modified mcraly powder with Nano Oxide dispersoids as HVOF thermal spray feedstock using mechanical milling,” *Materials Research Express*, vol. 7, no. 1, p. 015030, 2020.
- [14] F. Ghadami, A. Sabour Rouh Aghdam, and S. Ghadami, “Isothermal and cyclic oxidation behavior of HVOF-sprayed Nicocraly coatings: Comparative investigations on the conventional and nanostructured coatings,” *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 29, no. 8, pp. 1926–1942, 2020.
- [15] S. K. Asl, M. H. Sohi, K. Hokamoto, and M. Uemura, “Effect of *heat treatment* on wear behavior of HVOF thermally sprayed WC-co coatings,” *Wear*, vol. 260, no. 11-12, pp. 1203–1208, 2006.