



## LAPISAN *FLAME SPRAYED* SS430-AL PADA BAJA KARBON: STRUKTUR DAN KETAHANAN OKSIDASI TEMPERATUR TINGGI

Muhammad Rizki Hifdzia Fahmi<sup>a</sup>, Bambang Hermanto<sup>b</sup>, Sutrisno<sup>a</sup>, Toto Sudiro<sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup>Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta  
Jl. Ir H. Juanda No.95, Tangerang Selatan, Indonesia 15412

<sup>b</sup>Pusat Penelitian Fisika-LIPI

Gedung 440-442, Kawasan PUSPIPTEK Serpong, Tangerang Selatan, Indonesia 15343

\*E-mail : toto011@lipi.go.id

Masuk tanggal : 30-01-2020, revisi tanggal : 26-07-2020, diterima untuk diterbitkan tanggal 29-07-2020

### Abstrak

Pada penelitian ini, telah dilakukan proses pelapisan serbuk SS430 murni dan SS430-10Al pada substrat baja karbon rendah dengan teknik *flame spray* guna meningkatkan ketahanan material terhadap oksidasi pada temperatur tinggi. Untuk menganalisa ketahanan oksidasi dari lapisan tersebut, material diuji oksidasi pada temperatur 550 °C selama 10 siklus dengan material pembanding baja karbon tanpa pelapisan. Struktur lapisan yang terbentuk pada permukaan sebelum dan sesudah uji oksidasi dianalisa dengan menggunakan XRD (*x-ray diffractometer*) dan SEM-EDX (*scanning electron microscopy-energy dispersive x-ray spectroscopy*). Analisis XRD lapisan hasil *flame spray* sebelum uji oksidasi menunjukkan bahwa lapisan SS430 murni tersusun atas fasa (Fe-Cr) dan lapisan SS430-10 Al terdiri atas fasa (Fe-Cr) dan Al. Hasil analisis mikrostruktur pada lapisan hasil *flame spray* menunjukkan bahwa dengan penambahan aluminium, lapisan yang terbentuk lebih tebal dan mengikat dengan tingkat porositas yang lebih rendah. Namun, evaluasi oksidasi menunjukkan bahwa lapisan SS430 murni memiliki ketahanan terhadap oksidasi yang lebih baik dibandingkan dengan lapisan SS430-10Al dan substrat tanpa pelapisan.

**Kata Kunci:** *Flame spray*, SS430, aluminium, baja karbon, oksidasi

### Abstract

*In this study, the coating process of pure SS430 and SS430-10Al powders on a low carbon steel substrate was carried out using a flame spray technique to increase its resistance against oxidation at high temperatures. The material was oxidized at 550 °C for 10 cycles to investigate the oxidation resistance. As for the comparison, the carbon steel was oxidized without coating. The structure before and after layer was analyzed using XRD (x-ray diffraction) and SEM-EDX (scanning electron microscopy-energy dispersive x-ray spectroscopy). XRD analysis of the coating before oxidation shows that the pure SS430 layer is composed of (Fe-Cr) phase, and the SS430-10 Al layer consists of (Fe-Cr) and Al phases. The microstructure observed with the addition of aluminum leads to a thicker coating layer with lower porosity and excellent bonding adhesion to the substrate. However, the pure SS430 coating has better oxidation resistance when compared to the SS430-10Al coating and the substrate without layer.*

**Keywords:** *Flame spray, SS430, aluminum, carbon steel, oxidation*

## 1. PENDAHULUAN

Baja karbon ST41 memiliki kandungan karbon yang rendah, dan memiliki karakteristik mekanik yang baik, serta biaya produksi yang relatif murah. Baja seperti ini sangatlah cocok digunakan untuk berbagai aplikasi, seperti di bidang konstruksi, pabrik, dan aplikasi struktur. Akan tetapi, baja karbon rendah ST41 memiliki

ketahanan terhadap oksidasi yang rendah pada temperatur tinggi [1]. Maka dari itu, bermacam-macam metode pelapisan telah diterapkan untuk melindungi baja karbon, dan salah satu metodenya adalah *thermal spray* [2].

*Thermal spray* merupakan salah satu dari banyak metode untuk melapisi suatu material dasar dengan material pelapis. Teknik *thermal spray* dapat menghasilkan pelapis yang sangat

baik karena energi panas yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar yang dialirkan ke bubuk pelapis yang membuatnya menjadi keadaan cair (*molten*) atau semi cair (*semi-molten*) [3]. Tujuan dari dilakukannya *thermal spray* adalah untuk menggabungkan bahan dasar yang memiliki kekakuan dan kekuatan yang diinginkan dengan bahan pelapis yang memiliki sifat yang dibutuhkan pada permukaannya seperti ketahanan korosi, ketahanan aus, konduktivitas listrik atau panas, dan lainnya [4]. Kemudian bahan pelapis yang sudah dalam keadaan cair atau semi cair tersebut ditembakkan ke permukaan substrat sehingga melekat pada area permukaan tersebut dan saling mengikat saat kembali memadat hingga membentuk suatu lapisan [3], [5]. Ketebalan dari lapisan yang dihasilkan *thermal spray* adalah antara 50 hingga 1000  $\mu\text{m}$  [6]. *Flame spray* merupakan salah satu teknik dari *thermal spray* yang menggunakan panas dari gas bahan bakar (biasanya berupa gas asetilen atau propane) dan gas oksigen untuk mencairkan bahan pelapisnya [7]. Teknik ini dapat digunakan untuk bahan pelapis dalam bentuk kawat, batangan, dan serbuk.

Baja tahan karat (*stainless steel*) adalah bahan konstruksi berkinerja tinggi yang menggabungkan kekuatan dan kekakuan dengan ketahanan korosi yang berasal dari tingginya kadar kromium yang dikandungnya [8]. SS430 merupakan suatu paduan logam yang sebagian besar kandungannya adalah unsur Fe dan Cr, dengan kandungan kromium sekitar 17 %, yaberatng dapat diklasifikasikan ke dalam baja tahan karat feritik [9]. Paduan berbahan dasar Fe-Cr ini memiliki ketahanan terhadap oksidasi dan korosi yang baik.

Disisi lain, secara umum unsur Al dapat berperan penting dalam meningkatkan ketahanan oksidasi dan korosi pada temperatur tinggi yang baik dengan membentuk lapisan protektif  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yang bertindak sebagai lapisan pelindung [10]. Dalam berbagai aplikasi, umumnya Al dipadukan dengan unsur lain guna membentuk paduan intermetalik seperti Fe-Al, Cr-Al, Ti-Al, dan lain-lain.

Oleh karena itu pada penelitian ini akan dikembangkan lapisan SS430 dan SS430-10Al pada substrat baja karbon rendah guna meningkatkan ketahanan oksidasinya pada temperatur tinggi. Analisa fasa dan karakterisasi mikrostruktur dilakukan dengan menggunakan XRD (*x-ray diffraction*) dan SEM-EDX (*scanning electron microscopy-energy dispersive x-ray spectroscopy*).

## 2. PROSEDUR PERCOBAAN

Substrat yang digunakan pada penelitian ini adalah baja karbon rendah ST41. Proses preparasi sampel dimulai dengan mengebor substrat guna membuat lubang dengan diameter 1 mm, yang akan digunakan untuk menggantung sampel pada saat proses pelapisan nanti, dan sebelum proses pelapisan dilakukan, seluruh permukaan sampel dipoles dengan menggunakan kertas ampelas SiC dan diikuti dengan pembersihan sampel menggunakan *ultrasonic cleaning*, serta proses *sand blasting* pada permukaan sampel.

Kemudian substrat dikenai *flame spray* dengan serbuk komersil SS430 dan SS430-10Al dengan jarak antara pistol *flame spray* dan substrat sejauh 20 cm. Untuk tiap sisi pada 4 buah substrat digunakan 10 gram serbuk. Sedangkan untuk sampel SS430-10 Al, untuk tiap sisi pada 4 substrat digunakan serbuk SS430 sebanyak 9 gram dan 1 gram serbuk Al murni.

Alat *flame spray* yang digunakan pada penelitian ini adalah Metallisation MK47 Flame Spray System, UK dengan Asetilen ( $\text{C}_2\text{H}_2$ , *ultra high purity grade*) dan Oksigen ( $\text{O}_2$ , *ultra high purity grade*) sebagai gas bahan bakar dan angin kompresor sebagai gas pembawa dengan tekanan gas oksigen ( $\text{O}_2$ ) 2 bar, gas asetilen ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) 1 bar, dan angin kompresor 1,5 bar, dimana proses pelapisan dilakukan pada seluruh sisi substrat.

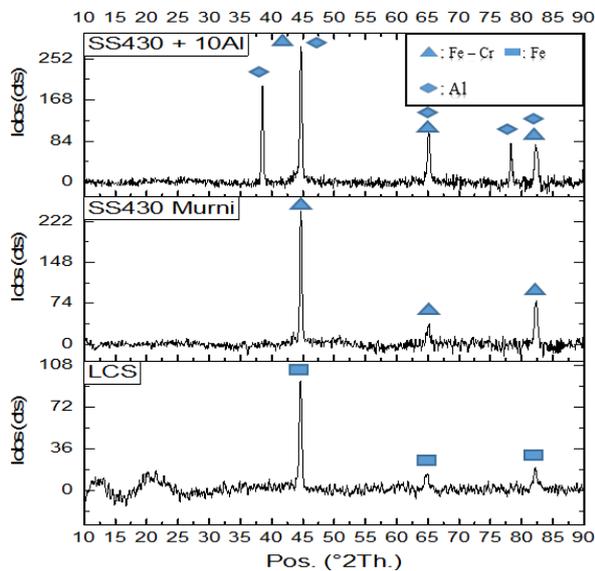
Pengujian ketahanan oksidasi pada temperatur tinggi dilakukan pada temperatur 550 °C selama 10 siklus dengan sampel pembanding adalah baja karbon rendah tanpa pelapisan. Satu siklus pengujian terdiri atas proses oksidasi pada temperatur 550 °C selama 20 jam dan pendinginan pada temperatur ruang selama 4 jam. Dimensi dan massa sampel sebelum pengujian, serta perubahan massa sampel pada setiap siklus diukur dengan menggunakan caliper dan timbangan digital dengan derajat ketelitian 0,01 mg. Data-data tersebut selanjutnya diplot menjadi kurva laju oksidasi untuk tiap sampel dengan mengukur pertambahan massa sampel dibagi dengan luas permukaan awal dari sampelnya pada tiap siklus.

Analisa XRD (*x-ray diffraction*) dilakukan dengan menggunakan Rigaku SmartLab untuk mengidentifikasi fasa yang terbentuk pada pelapis dan untuk menganalisa apakah ada unsur pengotor yang terbentuk. Sampel yang telah dianalisa kemudian diresin, dipotong dan dipolis hingga *mirror finishing* guna analisa lebih lanjut dengan menggunakan SEM-EDX (*scanning electron microscopy-energy dispersive x-ray spectroscopy*) untuk mengobservasi morfologi dan analisa elemen.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Analisa Fasa dan Mikrostruktur Lapisan SS430 Murni dan SS430-10Al

Gambar 1 menunjukkan pola difraksi sinar-x baja karbon rendah, lapisan SS430 murni, dan lapisan SS430-10Al yang dideposisikan pada permukaan baja karbon rendah dengan teknik *flame spray*.

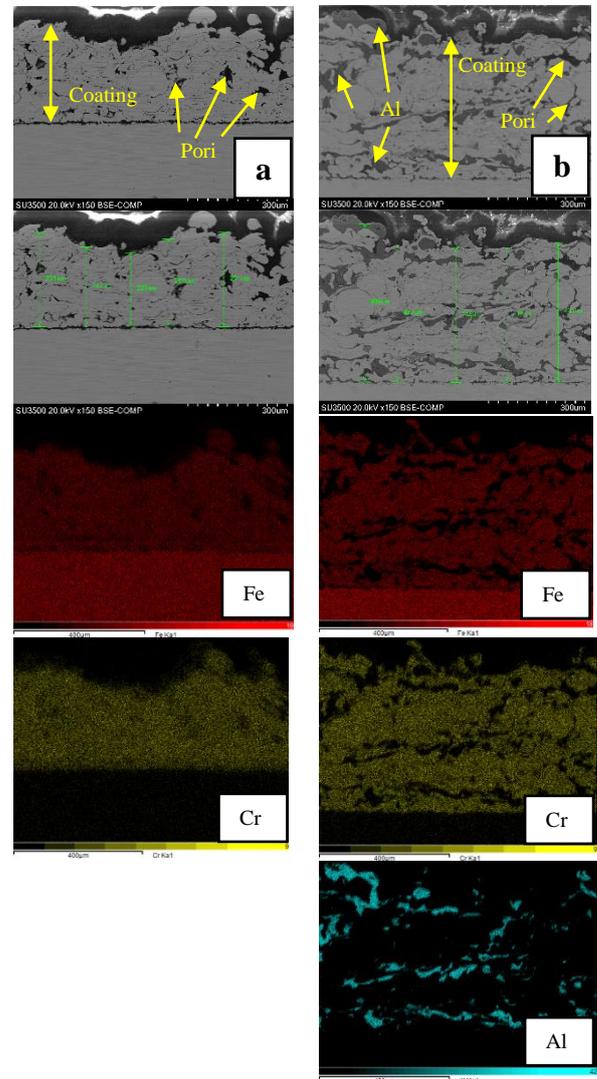


Gambar 1. Pola difraksi sinar-x (a) baja karbon rendah, (b) lapisan SS430 murni dan (c) lapisan SS430-10 Al pada permukaan baja karbon rendah dengan teknik *flame spraying*

Hasil analisa menunjukkan bahwa fasa yang terdeteksi pada baja karbon rendah adalah fasa Fe yang merupakan penyusun utama dari baja karbon rendah [1]. Lalu pada lapisan SS430 murni terdeteksi hanya satu fasa yang dominan, yaitu fasa Fe-Cr. Hal ini dikarenakan kandungan unsur dari serbuk SS430 yang sebagian besar terdiri dari unsur Fe dan Cr [9]. Dari Gambar 1 juga dapat dilihat bahwa unsur penyusun lapisan tidak mengalami oksidasi saat proses pelapisan sehingga tidak terdeteksi fasa pengotor apapun. Sedangkan pada lapisan SS430-10Al dapat dilihat bahwa lapisan tersebut tersusun atas dua fasa, yaitu fasa Fe-Cr dari serbuk SS430, dan fasa Al dari serbuk aluminium. Elemen penyusun lapisan tidak membentuk paduan intermetalik. Munculnya fasa Al ini menunjukkan bahwa pada saat proses pelapisan, serbuk Al ini tidak berpadu dengan serbuk SS430 sehingga XRD (*x-ray diffraction*) mendeteksi masing-masing fasa tersebut berdiri sendiri-sendiri [11]. Seperti halnya pada lapisan SS430 murni, pada baja karbon tidak terdapat fasa pengotor yang terdeteksi.

Gambar 2 menunjukkan mikrostruktur penampang lintang dan distribusi elemen penyusun lapisan SS430 murni dan SS430-10 Al

yang dideposisikan pada permukaan baja karbon dengan teknik *flame spraying* dianalisa dengan menggunakan SEM-EDX (*scanning electron microscopy-energy dispersive x-ray spectroscopy*).



Gambar 2. Hasil analisis dengan SEM-EDX menunjukkan mikrostruktur dan distribusi masing-masing unsur pada lapisan (a) SS430 murni dan (b) SS430-10 Al

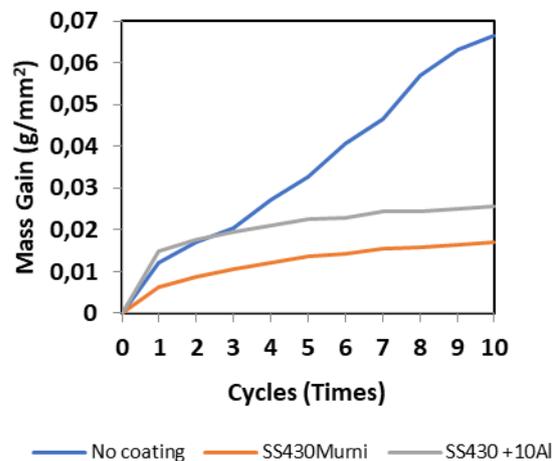
Dari Gambar 2 dapat dilihat bahwa hasil *flame spray* lapisan SS430 murni dan SS430-10 Al terdistribusi dengan baik. Analisa penampang lintang menunjukkan bahwa lapisan SS430 murni yang terbentuk memiliki ketebalan yang tidak merata, dengan rata-rata ketebalan lapisan adalah 264 µm. Dari hasil SEM juga dapat dilihat bahwa terdapat pori dan celah di antara pelapis dan substratnya. Hal ini terjadi karena teknik *flame spray* dapat menghasilkan mikrostruktur lapisan dengan ukuran butir dan pori yang relatif besar, serta dapat menyebabkan munculnya retak yang lebih panjang jika dibandingkan dengan teknik *thermal spray* yang lainnya [7]. Selain itu, hal tersebut juga dimungkinkan karena pada jarak tembak 20 cm, serbuk SS430 yang akan

dilapiskan tidak mencair (*melting*) seluruhnya sehingga menghasilkan sejumlah pori. Keberadaan pori ini dapat menyebabkan munculnya retak yang dapat berdampak pada lemahnya daya ikat lapisan [12]. Sedangkan pada lapisan SS430 dengan penambahan 10 Al terlihat bahwa lapisan yang terbentuk memiliki dua kontras warna yang berbeda yang menandakan terdapat dua fasa yang berbeda pada lapisan tersebut. Penambahan serbuk Al menghasilkan lapisan yang terdeposisi pada permukaan substrat menjadi lebih tebal dengan ketebalan rata-rata 437  $\mu\text{m}$ . Hal ini terjadi karena densitas dari Al yang lebih rendah dari unsur penyusun utama SS430 sehingga dengan massa yang sama, volume dari serbuk SS430-10Al menjadi lebih banyak [13]. Dari hasil tersebut juga dapat dilihat bahwa dengan penambahan serbuk Al membuat pelapis lebih mengikat dengan substrat yang ditunjukkan dengan celah (*gap*) yang lebih sempit di antara substrat dan pelapis, serta jumlah pori yang lebih sedikit. Hal ini mungkin disebabkan oleh aluminium yang memiliki temperatur cair yang lebih rendah (660  $^{\circ}\text{C}$ ), ketika dideposisikan dengan jarak tembak 20 cm, serbuk Al dapat mencair lebih sempurna dibandingkan serbuk SS430, sehingga dapat menempel dengan baik dan berperan sebagai material pengikat antara lapisan dan substrat, serta dapat mengurangi porositas lapisan [12].

Dari Gambar 2 juga dapat dilihat hasil karakterisasi EDX yang difokuskan untuk menganalisa distribusi elemen penyusun utama SS430 dan aluminium pada lapisan yang dideposisikan pada permukaan baja karbon. Seperti ditunjukkan pada Gambar 2(a), unsur Fe dan Cr terlihat tersebar secara merata pada lapisan SS430 murni. Hasil ini juga mendukung hasil karakterisasi XRD yang menunjukkan bahwa lapisan yang terbentuk tersusun atas fasa Fe-Cr. Sedangkan pada Gambar 2(b) dapat dilihat bahwa distribusi unsur Fe, Cr dan Al pada lapisan SS430 dengan penambahan 10 Al tidak merata. Pada beberapa lokasi terjadi kekosongan unsur Fe dan Cr, namun mengandung atau terdapat unsur Al. Hal ini juga mendukung hasil karakterisasi XRD yang menunjukkan bahwa fasa Fe-Cr dan Al tidak bereaksi antara satu sama lainnya, namun masih berdiri sendiri-sendiri sesuai dengan fasa penyusunnya. Hal ini terjadi disebabkan oleh kurangnya energi panas yang dihasilkan pada saat pembakaran (proses deposisi lapisan) untuk membentuk fasa intermetalik yang diharapkan [14].

### 3.2. Kurva Laju Oksidasi

Gambar 3 menunjukkan kurva laju oksidasi lapisan SS430 murni dan SS430-10 Al setelah diekspos pada temperatur 550  $^{\circ}\text{C}$  selama 10 siklus, dengan material pembanding baja karbon rendah tanpa pelapis.

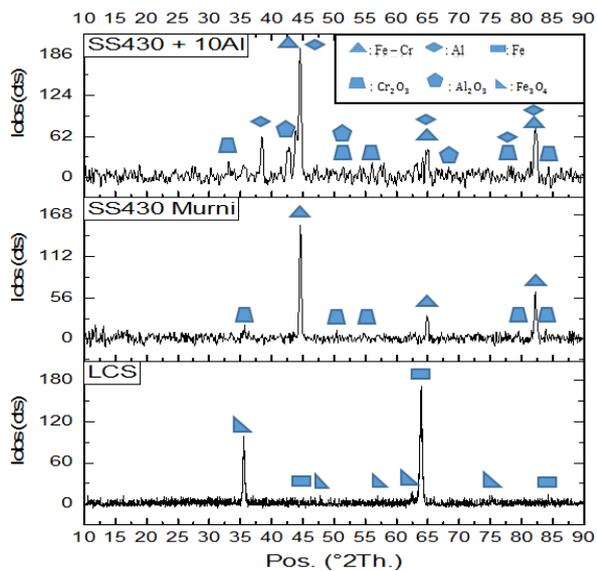


Gambar 3. Kurva laju pertambahan massa per satuan luas permukaan pada baja karbon rendah, SS430 dan SS430-10 Al setelah uji oksidasi pada  $T = 550^{\circ}\text{C}$  selama 10 siklus

Dari kurva laju oksidasi pada Gambar 3 dapat dilihat bahwa terjadi pertambahan massa persatuan luas permukaan untuk masing-masing material yang disebabkan oleh pembentukan oksida selama uji oksidasi. Baja karbon rendah tanpa pelapis memiliki pertambahan massa persatuan luas permukaan paling besar yang mengindikasikan bahwa material ini memiliki ketahanan oksidasi paling rendah karena sebagian elemen penyusunnya teroksidasi pada temperatur 550  $^{\circ}\text{C}$  membentuk oksida Fe yang tidak protektif [1]. Sementara itu, pelapisan SS430 murni dan SS430-10Al dapat meningkatkan ketahanan oksidasi baja karbon rendah pada temperatur tinggi. Hasil kurva laju oksidasi di atas menunjukkan bahwa material baja karbon rendah dengan lapisan SS430 murni memiliki pertambahan massa paling kecil dibandingkan dengan lapisan SS430 dengan penambahan 10 Al. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa lapisan SS430 murni memiliki ketahanan oksidasi yang paling baik jika dibandingkan dengan baja karbon rendah dengan penambahan 10 Al dapat menurunkan ketahanan oksidasi lapisan SS430 murni.

### 3.3. Analisa Fasa dan Struktur Mikro Lapisan SS430 Murni dan SS430-10Al Setelah Uji Oksidasi

Gambar 4 menunjukkan pola difraksi sinar-x baja karbon rendah, lapisan SS430 murni dan lapisan SS430-10Al setelah uji oksidasi pada temperatur 550  $^{\circ}\text{C}$  selama 10 siklus.



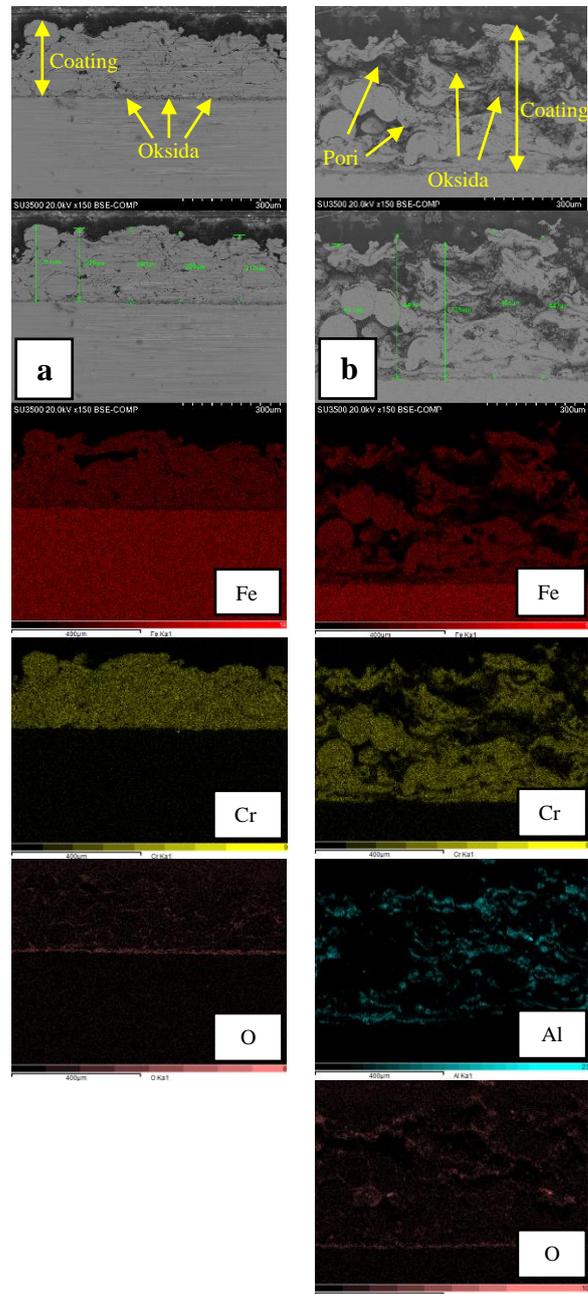
Gambar 4. Pola difraksi sinar-x pada (a) baja karbon rendah, (b) lapisan SS430 murni dan (c) lapisan SS430-10 Al setelah uji oksidasi pada  $T = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$  selama 10 siklus

Dari Gambar 4 dapat dilihat bahwa pada ketiga material terbentuk fasa baru setelah uji oksidasi. Pada baja karbon rendah terbentuk  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  yang terbentuk karena oksigen bereaksi dengan unsur Fe yang dikandung baja karbon [1]. Lalu pada lapisan baja ferritik SS430 murni membentuk khromium oksida ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) yang merupakan lapisan protektif oksida yang dapat berperan sebagai pelindung pada temperatur tinggi [15]. Pembentukan oksida ini terjadi karena pada temperatur tinggi, unsur Cr yang terkandung pada SS430 bereaksi dengan oksigen membentuk  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Sedangkan pada lapisan SS430-10 Al, setelah uji oksidasi pada temperatur  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$  selama 10 siklus, analisa XRD mendeteksi pembentukan khromium oksida ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) dan aluminium oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) pada lapisan SS430-10Al akibat oksidasi unsur Cr dan Al penyusun lapisan yang reaktif terhadap oksigen.

Gambar 5 menunjukkan mikrostruktur penampang melintang dan distribusi elemen penyusun lapisan SS430 murni dan SS430-10 Al yang dideposisikan pada permukaan baja karbon setelah uji oksidasi pada temperatur  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$  selama 10 siklus yang dianalisa dengan menggunakan SEM-EDX.

Hasil analisa morfologi pada Gambar 5 menunjukkan bahwa setelah pengujian selama 10 siklus pada temperatur  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lapisan SS430 murni memiliki mikrostruktur yang lebih rapat dan homogen dibandingkan lapisan SS430-10 Al. Retakan dan pori dengan ukuran yang cukup besar ditemukan pada lapisan dengan penambahan 10 Al, dimana struktur ini tidak ditemukan pada material sebelum uji oksidasi. Dari Gambar 5 juga dapat dilihat adanya kontras warna yang mengidentifikasi adanya

perbedaan komposisi, terutama dapat dilihat pada *interface* antara lapisan dan substrat pada Gambar 5(a) dan 5(b), serta juga dapat dijumpai pada permukaan dan lapisan SS430 dengan penambahan 10 Al.



Gambar 5. Hasil SEM-EDX menunjukkan mikrostruktur dan distribusi unsur pada lapisan (a) SS430 murni dan (b) SS430-10 Al setelah uji oksidasi pada  $T = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$  selama 10 siklus

Untuk mengetahui lebih lanjut elemen penyusun pada area atau lokasi dengan kontras warna yang berbeda tersebut, dapat dilihat hasil analisa EDX lapisan SS430 murni seperti pada Gambar 5(a) menunjukkan bahwa unsur Fe dan Cr terdistribusi secara merata pada lapisan. Distribusi oksigen tidak dapat dilihat dengan jelas pada bagian lapisan terluar, namun dapat

dideteksi cukup jelas pada *interface* antara lapisan dan substrat. Hal ini mengindikasikan bahwa Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang terbentuk dan terdeteksi dari analisa XRD seperti ditunjukkan pada Gambar 4(b) sangat tipis, sehingga sulit dideteksi dengan SEM-EDX, hal ini diperkuat dengan rendahnya puncak difraksi Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Lain halnya dengan distribusi oksigen pada *interface* lapisan dan substrat, dimana pada lokasi tersebut juga teridentifikasi adanya distribusi Fe, menunjukkan bahwa terbentuk oksida Fe pada *interface* tersebut. Hal ini sangat mungkin terjadi karena seperti ditunjukkan pada hasil analisa SEM (Gambar 2(a)), sebelum oksidasi terdapat celah antara lapisan SS430 murni dan baja karbon rendah, dimana ada potensi oksigen terperangkap pada lokasi tersebut, sehingga pada saat dilakukan uji oksidasi pada temperatur tinggi, oksidasi pada *interface* terjadi yang menyebabkan elemen Fe yang berasal dari substrat bereaksi dengan oksigen membentuk oksida Fe pada *interface* tersebut.

Sedangkan analisa SEM-EDX pada Gambar 5(b) menunjukkan bahwa pada daerah berwarna gelap keabuan disekitar pori pada lapisan SS430-10Al dan *interface* antara lapisan dan substrat dapat diidentifikasi distribusi Al, Cr dan O, yang menunjukkan bahwa sebagian elemen tersebut baik Al dan Cr telah teroksidasi membentuk Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> atau campuran antara kedua oksida tersebut, seperti ditunjukkan pada hasil analisa XRD pada Gambar 4(c). Pembentukan pori pada lapisan ini mungkin berkaitan dengan keberadaan Al yang tetap pada fasa originalnya setelah proses pelapisan. Pada proses pelapisan dengan teknik *flame spray*, serbuk Al diharapkan dapat bereaksi dengan serbuk SS430 membentuk paduan baru yaitu fasa intermetalik yang memiliki karakteristik mekanik dan ketahanan oksidasi pada temperatur tinggi yang baik. Namun, ternyata paduan intermetalik ini tidak terbentuk dan masing-masing serbuk masih berada pada fasa originalnya karena tidak dilakukan proses pemanasan lebih lanjut, seperti annealing pada temperatur tertentu [1]. Karena titik leleh dari alumunium yang relatif rendah yaitu sekitar 660 °C dibandingkan SS430 murni menyebabkan alumunium pada pelapis dimungkinkan dalam keadaan *semi-molten* saat dilakukan pengujian pada temperatur 550 °C, sehingga membuatnya menjadi tidak stabil dan memungkinkan untuk bergerak dan menghasilkan pori yang diinisiasi pada *interface* antara SS430 dan Al. Pori ini dimungkinkan semakin besar dengan meningkatnya waktu pengujian oksidasi. Perubahan mikrostruktur ini menyebabkan terbentuknya celah atau retak baik

pada lapisan dan *interface* antara lapisan dan substrat. Oksigen menjadi lebih mudah berdifusi ke dalam yang menyebabkan elemen penyusun lapisan dan baja karbon rendah menjadi lebih mudah teroksidasi, membentuk oksida Al, Cr pada lapisan dan oksida Fe pada *interface* lapisan dan substrat [12]. Pembentukan oksida ini menyebabkan pertambahan masa lapisan SS430 dengan penambahan 10 Al menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan lapisan SS430 murni, sepanjang siklus oksidasi.

Di samping itu, jika pada temperatur pengujian tersebut elemen Al tidak meleleh, Ellingham diagram yang menunjukkan hubungan antara energi bebas pembentukan oksida logam dan temperatur mengindikasikan bahwa Al memiliki tingkat kemudahan teroksidasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan elemen Fe, dan Cr. Berdasarkan diagram tersebut, oksida yang paling tidak stabil berada di bagian paling atas diagram, sedangkan oksida paling stabil dan mudah terbentuk berada di bagian paling bawah [16]. Pada diagram tersebut dapat dilihat bahwa kurva pembentukan oksida Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> lebih tinggi dibandingkan dengan kurva pembentukan Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dengan estimasi besarnya energi bebas pembentukan masing-masing oksida tersebut pada temperatur 550 °C, seperti ditunjukkan pada persamaan reaksi berikut:



Persamaan 1 memiliki nilai energi bebas pembentukan yang lebih negatif dibandingkan dengan persamaan 2 dan 3, yang berarti bahwa pembentukan oksida Al lebih potensial terjadi dibandingkan dengan oksida Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Pada saat dilakukan penambahan Al pada pelapis memungkinkan oksida yang terbentuk lebih banyak dan memiliki pertambahan massa pada sampel lapisan SS430 dengan penambahan 10Al lebih tinggi jika dibandingkan pelapis tanpa penambahan Al.

Sehingga berdasarkan hasil pada penelitian di atas diperoleh bahwa lapisan SS430 murni memiliki ketahanan yang paling baik untuk meningkatkan ketahanan oksidasi temperatur tinggi baja karbon rendah. Pada penelitian selanjutnya diharapkan ada pertimbangan saat penambahan Al pada serbuk baja guna meningkatkan ketahanan oksidasi. Hal ini memerlukan modifikasi proses untuk menghasilkan paduan intermetalik yang secara umum memiliki sifat dan ketahanan oksidasi-korosi temperatur tinggi yang baik.

#### 4. KESIMPULAN

Pada penelitian ini, pelapis SS430-Al hasil *flame spray* telah berhasil dideposisikan pada permukaan baja karbon rendah. Analisa laju oksidasi pada temperatur 550 °C selama 10 siklus menunjukkan bahwa pelapis SS430-Al dapat meningkatkan ketahanan oksidasi baja karbon rendah secara signifikan. Pelapis SS430 murni memberikan proteksi yang lebih baik terhadap degradasi oksidasi dibandingkan dengan pelapis SS430 dengan penambahan 10Al. Hasil analisa penampang lintang lapisan SS430 menunjukkan bahwa tidak terjadi perubahan mikrostruktur yang signifikan antara lapisan sebelum dan sesudah oksidasi. Hal ini menunjukkan bahwa lapisan SS430 murni memiliki ketahanan yang sangat baik terhadap oksidasi pada temperatur 550 °C.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Program DIPA PPF-LIPI 2019. Segala fasilitas untuk menunjang pelaksanaan penelitian ini disediakan oleh P2 Fisika-LIPI. Kontributor utama dalam penulisan makalah ini adalah Toto Sudiro.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Sudiro, A. I. J. Hia, Cisanto, dan D. Aryanto, "High temperature cyclic oxidation resistance of 50Cr-50Al coatings mechanically alloyed on low carbon steel," *J. Alloys Compd.*, vol. 732, pp. 655–665, 2018.
- [2] R. Jamshidi, O. Bayat, dan A. Heidarpour, "Tribological and corrosion behavior of flame sprayed Al-10 wt% Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> composite coating on carbon steel," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 358, pp. 1–10, 2018.
- [3] G. E. Timuda, B. Hermanto, dan T. Sudiro, "Study of flame spray coated Fe-Al using N<sub>2</sub> as a gas carrier," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1191, 2019.
- [4] B. Fotovvati, N. Namdari, dan A. Dehghanhadikolaei, "On coating techniques for surface protection: A review," *J. Manuf. Mater. Process.*, vol. 3, no. 28, p. 1-22, 2019.
- [5] S. Amin dan H. Panchal, "A review on thermal spray coating processes," *Int. J. Curr. Trends Eng. Res. (IJCTER)*, vol. 2, no. 4, pp. 556–563, 2016.
- [6] M. A. Zavareh, A. A. D. M. Sarhan, P. A. Zavareh, B. A. Razak, dan S. Kakoei, "Fundamentals and applications of thermal spray coating," *Can. J. Basic Appl. Sci.*, vol. 5, pp. 1–11, 2017.
- [7] B. Uyulgan, E. Dokumaci, E. Celik, I. Kayatekin, N. F. A. Azem, I. Ozdemir, dan M. Toparli "Wear behaviour of thermal flame sprayed FeCr coatings on plain carbon steel substrate," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 190, pp. 204–210, 2007.
- [8] L. Gardner, "Stability and design of stainless steel structures – Review and outlook," *Thin-Walled Struct.*, vol. 141, pp. 208–216, 2019.
- [9] M. Cortie dan M. du Toit, "Stainless steels ferritic," *Ref. Modul. Mater. Sci. Mater. Eng.*, pp. 1–4, 2016.
- [10] P. G. Sheasby and R. Pinner, "*The Surface Treatment and Finishing of Aluminium and its Alloys*," 6th edition., Ohio: ASM International, 2001.
- [11] A. E. Fath, Irmaniar, D. Aryanto, S. A. Saptari, dan T. Sudiro, "High temperature oxidation of Fe-Cr-Al coatings prepared by flame spray technique," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1204, 2019.
- [12] O. Redjidal, B. Zaid, M. S. Tabti, K. Henda, dan P. C. Lacaze, "Characterization of thermal flame sprayed coatings prepared from FeCr mechanically milled powder," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 213, no. 5, pp. 779–790, 2013.
- [13] R. Y. Sundawa, D. Aryanto, A. S. Wismogroho, dan T. Sudiro, "Microstructure and phase composition of Fe-B-Al coatings on low carbon steel prepared by using mechanical alloying technique," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 755, 2017.
- [14] B. Liu, Q. Yang, dan Y. Wang, "Interaction and intermetallic phase formation between aluminum and stainless steel," *Results Phys.*, vol. 12, pp. 514–524, 2018.
- [15] V. F. C. Lins, M. M. R. Castro, R. Z. Domingues, dan T. Matencio, "High temperature cyclic oxidation resistance of iron chromium base alloys," *Chem. Eng. Technol.*, vol. 33, no. 2, pp. 334–340, 2010.
- [16] J. H. E. Jeffes, "Ellingham diagrams," in *Encyclopedia of Materials: Science and Technology (Second Edition)*, London: Elsevier Ltd, 2001, pp. 2751–2753.

