

KETAHANAN MULUR DAN OKSIDASI SIKLIK BAJA SUS 304 HASIL PELAPISAN *METAL MATRIX COMPOSITE* NiCr+Cr₃C₂ DENGAN METODA HVOF

Muhammad Luthfi Naufal¹, Muhammad Walid¹, Djoko Hadi Prajitno²

¹Jurusan Teknik Metalurgi Fakultas Teknologi Manufaktur – UNJANI

Jl. Terusan Jenderal Gatot Subroto, Kota Bandung, 40284

²Pusat Sains dan Teknologi Nuklir Terapan – BATAN

Jl. Tamansari No.71, Lb. Siliwangi, Coblong, Kota Bandung, 40132

e-mail: mluthfinaufal7@gmail.com

(Naskah diterima: 21-11-2019, Naskah direvisi: 16-12-2019, Naskah disetujui: 18-01-2020)

ABSTRAK

KETAHANAN MULUR DAN OKSIDASI SIKLIK BAJA SUS 304 HASIL PELAPISAN *METAL MATRIX COMPOSITE* NiCr+Cr₃C₂ DENGAN METODA HVOF. Telah dilakukan proses deposisi *Metal Matrix Composite coating* 60% NiCr + 30% Cr₃C₂+ 10% Al₂O₃ dan 60% NiCr + 40% Cr₃C₂ dengan menggunakan teknik *High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) Thermal Spray Coating*, pada permukaan baja SUS 304. Tujuan pelapisan untuk meningkatkan ketahanan mulur dan oksidasi siklik dalam aplikasi pipa *boiler tubes* PLTU. Pengujian *creep* telah dilakukan pada temperatur 550°C dengan pembebanan sebesar 0.4 σ_y dan 0.6 σ_y (*yield strength*) selama 30240 menit (21 hari). Pengujian oksidasi siklik dengan variasi temperatur 600°C, 700°C dan 800°C selama 1 jam dalam *tubes furnace* dan pendinginan diluar selama 15 menit dalam 1 siklus dan di lakukan sebanyak 5 siklus. Spesimen *coating Metal Matrix Composite* (MMC) 3 komponen merupakan *coating* yang rekomendasikan dalam aplikasi pipa *boiler tubes* PLTU merupakan laju mulur yang paling rendah sebesar 0.000148917%/jam. Spesimen *coating* MMC 3 komponen pada temperatur 600°C memiliki perubahan berat oksida, ketebalan *coating*, dan senyawa oksida yang terbentuk paling rendah.

Kata kunci: SUS 304, HVOF *Thermal Spray Coating*, *Metal Matrix Composite*, ketahanan mulur, oksidasi siklik.

ABSTRACT

CREEP AND CYCLIC OXIDATION RESISTANCE OF SUS 304 STEEL AFTER COATING WITH METAL MATRIX COMPOSITE NiCr+ Cr₃C₂ BY HVOF METHOD. Deposition of 60% NiCr + 30% Cr₃C₂ + 10% Al₂O₃ and 60% NiCr + 40% Cr₃C₂ metal matrix composite coating has been done on SUS 304 steel surface by the High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) Thermal Spray Coating technique. The purpose of the coating was to improve SUS 304 steel creep resistance and cyclic oxidation on boiler tubes of steam power plant application. The treatments include creep test at 550°C with a load of 0.4 and 0.6 σ_y (yield strength) for 30240 minutes (21 days), cyclic oxidation with various temperatures of 600, 700 dan 800°C in tubes furnace for 1 hour and cooling for 15 minute in 1cycle. Measurement was done every one cycle to observe weight change of the oxide, and the measurement was done for 5 cycles. The recommended coating specimen for boiler tubes of steam power plant application is coating specimen of 3 three components of MMC with the lowest creeprate of 0.000148917 %/hour and cyclic oxidation resistance at 600° (which has a lowest change in oxide weight, coating thickness and oxide compounds formed on coating).

Keywords: SUS 304, HVOF Thermal Spray Coating, Metal Matrix Composite, Creep Resistance, Cyclic Oxidation.

PENDAHULUAN

Keputusan Menteri Energi Sumber Daya Mineral Republik Indonesia No. 5899 K/20/MEM/2016 tentang Pengesahan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT. Perusahaan Listrik Negara (PT. PLN Persero) Tahun 2016 s/d 2025[1] melalui pengembangan PLTU sebesar 19.813 MW, maka permintaan material yang tahan terhadap temperatur tinggi akan meningkat, terutama material untuk peralatan teknis seperti ketel uap (*boiler*) sebagai pemasok uap untuk menggerakkan turbin pembangkit listrik. Definisi temperatur tinggi pada kondisi operasi *boiler* merujuk pada rentang temperatur operasi antara 500°C– 800°C[2].

Batu bara yang digunakan untuk pembangkit listrik di Indonesia rata-rata menggunakan *low rank coal* atau lignit dengan nilai kalori 4.200 kkal/kg yang dapat ditngkatkan melalui proses pengeringan atau proses *blending* [3]. Selain nilai kalor, pada *low rank coal* memiliki kandungan air sekitar 30–60%, sulfur sekitar 0.4–1% dan *ash* sekitar 10–50%[4], dengan keberadaan kandungan tersebut dalam batubara sebagai bahan bakar, output sistem kombusi dapat berdampak negatif pada sifat-sifat material boiler termasuk sifat mekanik, sifat fisika, dan sifat kimia pada permukaan.

Pada temperatur tinggi dengan ada nya kandungan *ash* terdiri dari hasil pembakaran senyawa oksida bersifat *non-combustible* diantaranya SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂, Mn₃O₄, CaO, MgO, Na₂O, K₂O dapat menyebabkan erosi atau terkikisnya dinding luar *boiler* dan terjadi penumpukan endapan pada dinding boiler oleh *ash* yang disebut *slagging*. *Ash* dapat mengakibatkan terbentuknya *fouling* yaitu pembentukan alkali sulfat diantaranya CaSO₄ dan Na₂SO₄ yang berasal dari hasil kombinasi proses pembakaran antara batubara dengan sulfur yang ikut bersama *fly ash* sehingga dapat menginisiasi korosi pada permukaan *boiler tubes* yang terpapar oleh kombusi batubara[5].

Metode proteksi *boiler* yang digunakan yaitu menggunakan metode TSC (*Thermal Spray Coatings*) sebagai perlindungan permukaan substrat. TSC sebagai metode pembentukan *coating* metalik maupun non metalik yang dihasilkan dari kondisi lelehan atau semi lelehan yang diakibatkan oleh energi seperti *flame*/nyala api, busur listrik dan busur plasma. Energi tersebut digunakan untuk melelehkan material pelapis (yang berasal dari bentuk serbuk, atau batangan kawat) yang diumpangkan melalui *spray gun* dengan kecepatan tinggi mengarah pada permukaan logam substrat dengan memanfaatkan gas atau *atomization jets*[6]. Karakterisasi TSC bergantung teknik TSC yang digunakan. Penelitian ini menggunakan teknik HVOF *thermal spraying* yang memiliki ukuran ketebalan berkisar 100–300 μm[7]. TSC dapat meningkatkan umur pakai komponen, menciptakan daya lekat yang baik antara *coating* dan substrat, menekan harga produksi menjadi relatif rendah serta tahan terhadap *thermal shocks*, korosi dan erosi[8].

Feedstock yang digunakan dalam penelitian kali ini adalah *Metal Matrix Composite* (MMC) berbasis NiCr dengan penambahan Cr₃C₂ serta Al₂O₃. MMC adalah material *composite* dengan menggabungkan dua atau lebih material logam yang berbeda bentuk dan komposisi kimia yang terdiri dari matriks dan fasa penguat logam yang tidak larut satu sama lain. Material komposit diklasifikasikan sebagai berikut yaitu matriks terdiri dari polimer (PMC), metalik (MMC), *ceramic* (CMC) serta karbon, dan *reinforcement* (penguat) terdiri dari partikel, laminar dan fiber yang terbagi lagi menjadi dua yaitu *whiskers* dan *larges*[9]. Tujuan penggunaan MMC antara lain meningkatkan kekuatan dan elastisitas, memiliki *high fracture toughness* dan keuletan yang tinggi, meningkatkan konduktivitas listrik dan termal, memiliki ketahanan aus yang baik, serta memiliki koefisien ekspansi termal yang kecil[10].

Hal utama yang akan dikemukakan dalam penelitian ini adalah untuk melengkapi output dari data penelitian Walid dkk, 2018 yang telah berhasil mendeposisikan *feedstock* MMC berbasis matriks NiCr pada substrat baja SUS 304 dengan teknik HVOF *thermal spraying*, dan karakterisasi pasca pengujian *creep* dengan pembebanan 80% dari yield strength baja SUS 304. Spesimen yang digunakan adalah *as-received* dari penelitian sebelumnya. Sehingga harapannya didapatkan persamaan regresi linier dari plot grafik melalui laju regangan ϵ_{SSCr} terhadap kenaikan tegangan σ_{creep} , serta menetapkan kondisi fisik coating apakah kondisi adheren setelah dikondisikan pada temperatur tinggi dan tegangan statik σ_{creep} yang lebih rendah. Paduan MMC divariasikan menjadi dua jenis kondisi yaitu 60% NiCr + 30% Cr₃C₂ + 10% Al₂O₃ (3 komponen) dan 60% NiCr + 40% Cr₃C₂

(2 komponen) dengan pembebanan 40% dari *yield strength*.

METODOLOGI

Material *feedstock* yang digunakan untuk *coating* substrat dengan teknologi HVOF yaitu serbuk berbahan MMC (*Metal Matriks Composite*) 60%NiCr + 30%Cr₃C₂ + 10%Al₂O₃ (3 komponen) dan 60%NiCr + 40%Cr₃C₂ (2 komponen). Serbuk dibawah terdiri dari serbuk Al₂O₃ (Metco 105 NS), Cr₃C₂ (Woka 7102) dan NiCr (Metco 43C-NS). Tahapan proses tersebut meliputi proses *sieving* untuk menghasilkan serbuk dengan ukuran mesh yang diinginkan yang disesuaikan dengan tabel 1. Serbuk dengan ukuran *mesh* tersebut dilakukan pencampuran dengan proses *blending* selama 16 jam dengan kecepatan putaran sebesar 64 rpm untuk menghasilkan *feedstock* 3 komponen dan 2 komponen.

Tabel 1. Komposisi *feedstock*[2].

Kode	Feedstock	Komposisi		Ukuran Serbuk	
		Wt%	gram	µm	mesh
A 3 komponen	Matriks (tipe/produsen) NiCr (43C-NS/OERLIKON METCO)	60	420	-37	400
	Penguat (tipe/produsen) Cr ₃ C ₂ -20%NiCr (WOKA 7102/ OERLIKON METCO)	30	210	-45+15	325
	Penguat (tipe/produsen) Al ₂ O ₃ (105 NS/SULZER METCO)	10	70	-45+15	325
Sum		100	700	-	-
B 2 komponen	Matriks (tipe/produsen) NiCr (43C-NS/OERLIKON METCO)	60	420	-37	400
	Penguat (tipe/produsen) Cr ₃ C ₂ -20%NiCr (WOKA 7102/ OERLIKON METCO)	40	280	-45+15	325
	Sum		100	700	-
BC Bond Coat	Matriks (tipe/produsen) NiCr (43C-NS/OERLIKON METCO)	100	500	-106+15	140

Spesimen dilakukan proses preparasi awal terlebih dahulu, sebelum dilakukan proses *coating* yaitu proses *grit blasting* dengan parameter yang digunakan pada Tabel 2. Proses *coating* dilakukan dengan teknologi HVOF *thermal spray coating* pada

spesimen yang berjumlah 2 spesimen pada 3 komponen dan 1 spesimen pada 2 komponen yang akan digunakan untuk proses pengujian *creep*. Selanjutnya, untuk proses pengujian oksidasi siklik berjumlah 3 spesimen pada 3 komponen.

Tabel 2. Parameter proses *grit blasting*

Parameter	Nilai	Satuan
Jenis Abrasif	-	<i>White aluminium oxide</i>
Kekerasan Abrasif	9	<i>Moh scale</i>
<i>Bulk Density</i>	2400	Kg/mm ³
Tekanan	5-6	Bar
Sudut <i>Spraying</i>	45	Derajat
Jarak <i>Nozzle</i> ke Substrat	150	mm
Diameter Penembakan	3	mm

Pada pengujian *creep* dilakukan dengan temperatur 550°C dengan variasi pembebanan 0,6 dan 0,4 σ_y pada 3 komponen dan 0,4 σ_y pada 2 komponen. Proses oksidasi siklik dilakukan pada *tube furnace* sebanyak 3 spesimen dengan variasi temperatur tinggi yaitu 600°C, 700°C dan 800°C yang ditahan dalam tungku selama 1 jam dan didinginkan diluar tungku selama 15 menit sebanyak 5 siklus.

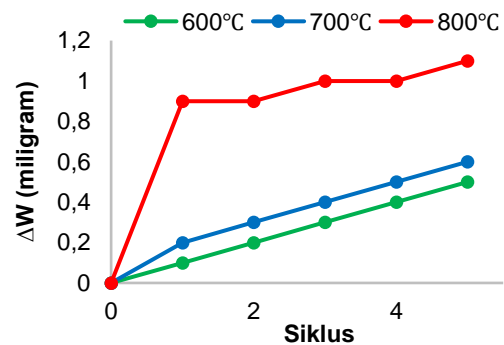
Karakterisasi sampel yang dilakukan meliputi pengujian XRD (*X-Ray Diffraction*) untuk mengetahui fasa dan oksidasi yang terbentuk, pengujian SEM (*Scanning Electron Microscope*) untuk melihat rekahan yang terjadi setelah dilakukan proses uji *creep*, pengujian metalografi melihat bagian permukaan cross section pada spesimen proses oksidasi siklik dan pengujian kekerasan *micro Vickers* untuk melihat distribusi kekerasan pada spesimen yang dilakukan sebanyak 3 kali pengukuran dengan menggunakan beban sebesar 50 gram selama 10 detik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Oksidasi pada *Coatings*

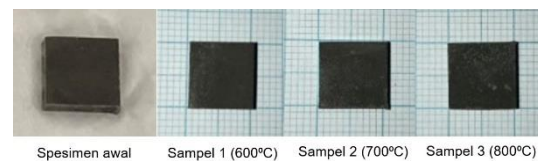
Gambar 1 ditunjukkan data dari tiga kondisi oksidasi siklik yang keseluruhannya menunjukkan kenaikan yang konstan. Hasil kurva tersebut merupakan hubungan antara perubahan berat terhadap jumlah siklus pada proses oksidasi siklik yang telah dilakukan

pada spesimen coating MMC 3 komponen pada variasi temperatur tinggi (600°C, 700°C dan 800°C). Kenaikan perubahan berat yang terjadi merupakan terjadinya penambahan berat oksida, yang dihasilkan dari reaksi oksidasi dengan logam pada kondisi temperatur tinggi. Hasil data tersebut menunjukkan bahwa dengan kenaikan temperatur menghasilkan penambahan berat oksida semakin besar. Kesimpulan tersebut relevan dengan penelitian sebelumnya D.Saber dkk pada tahun 2017[19], dan A. Cahit dkk pada tahun 2018[20].



Gambar 1. Kurva perubahan berat pasca-oksidasi siklik.

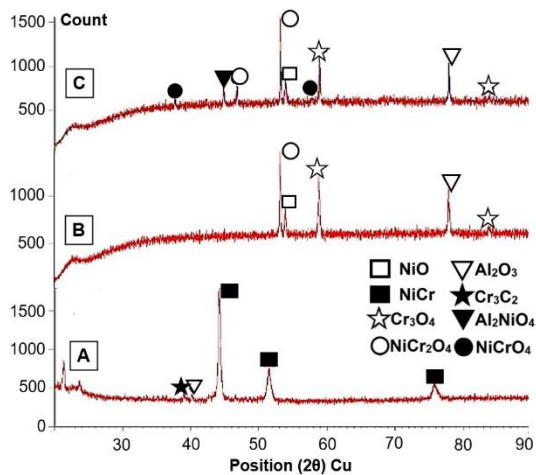
Perubahan juga terjadi pada spesimen *coating* MMC 3 komponen awal berukuran 1 cm x 1 cm, yang dilakukan setelah proses oksidasi siklik seperti yang terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Perbandingan *coating* MMC 3 komponen pada oksidasi siklik.

Melalui pengamatan visual, perubahan terjadi pada saat kondisi sebelum perlakuan panas dan setelah proses oksidasi siklik. Pada spesimen kondisi awal memiliki warna lebih cerah dibandingkan dengan spesimen yang telah di proses oksidasi siklik yaitu memiliki warna lebih gelap yang berarti bahwa spesimen telah mengalami reaksi oksidasi[9,10].

Analisis data XRD pada *coating* MMC 3 komponen kondisi awal menghasilkan pola difraksi yang mengidentifikasi fasa-fasa *coating* pada Gambar 3.



Gambar 3. Analisis data XRD pada
(a) kondisi awal
(b) Oksidasi siklik temperatur 600°C
(c) Oksidasi siklik temperatur 800°C

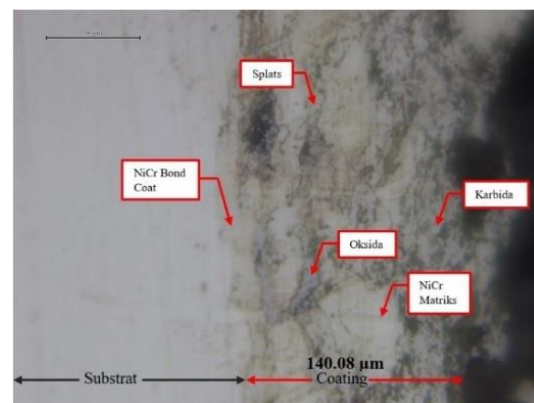
Terdapat beberapa puncak yang ditunjukkan secara kualitatif. Pada kondisi awal data puncak difraksi sinar-X didominasi oleh matrik *coating* yaitu NiCr dan Cr₃C₂. Setelah dioksidasi pada suhu 600°C Muncul oksida nikel NiO, Cr₂O₃ dan NiCr₂O₄. Pada temperatur oksidasi yang lebih tinggi muncul Al₃NiO₄

Mikrograf Coatings Cross Section

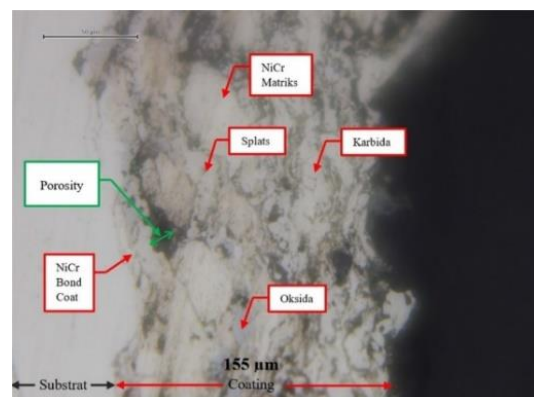
Proses metalografi bertujuan untuk mengamati dan mengukur ketebalan di bagian *coating cross section* yang terjadi sebelum dan setelah dilakukan proses oksidasi siklik seperti yang terlihat pada Gambar 4 sampai dengan Gambar 7. Keempat data hasil mikrograf menunjukkan bahwa terdapat perbedaan pada masing-masing spesimen yang diindikasikan dengan adanya penambahan ketebalan *coating* pada kondisi setelah dilakukan proses oksidasi siklik. Penambahan ketebalan *coating* paling besar yaitu sebesar 174,06 µm terdapat pada kondisi oksidasi siklik temperatur 800°C

dibandingkan dengan kondisi temperatur 600°C dan 700°C.

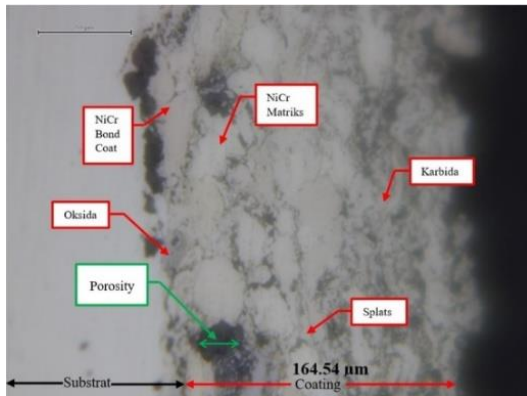
Berdasarkan data yang diperoleh dari pengujian oksidasi siklik yang telah dilakukan, faktor yang mempengaruhi penambahan ketebalan *coating* adalah pembentukan lapisan oksida pada temperatur tinggi, yang diikuti dengan penambahan lapisan oksida baru seiring kenaikan temperatur. Selanjutnya, setelah di oksidasi siklik porositas terbentuk pada bagian *interface*. Porositas muncul dikarenakan adanya perbedaan CTE (*Coefficient Thermal Expansion*) antara substrat dengan *coating*, yang mana pada CTE pada *coating* lebih rendah dibandingkan substrat.



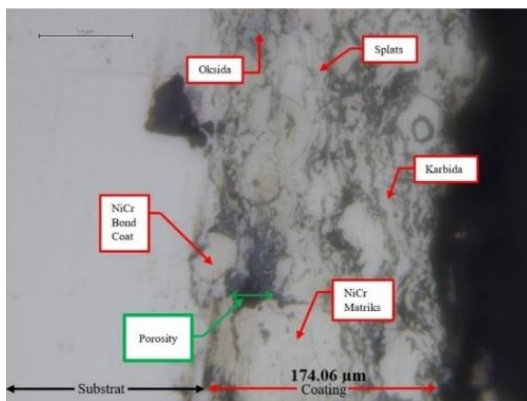
Gambar 4. Hasil mikrograf pada *coating* MMC 3 komponen kondisi awal.



Gambar 5. Mikrograf lapisan yang terbentuk setelah oksidasi siklik pada temperatur 600°C.



Gambar 6. Mikrograf lapisan yang terbentuk setelah oksidasi siklik pada temperatur 700°C.

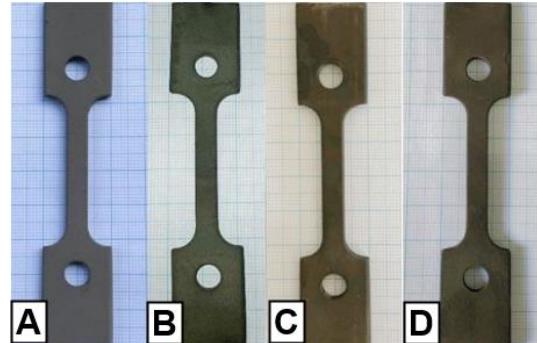


Gambar 7. Mikrograf lapisan yang terbentuk setelah oksidasi siklik pada temperatur 800°C.

Uji Creep

Gambar 8. merupakan perbandingan bentuk fisik pada variasi spesimen uji *creep* yang dilakukan sebelum dan sesudah proses uji *creep*. Gambar tersebut menunjukkan bahwa terjadinya perubahan warna pada spesimen setelah dilakukan proses memiliki warna yang lebih gelap dibandingkan dengan spesimen sebelum proses pengujian *creep*, yang disebabkan adanya reaksi oksidasi dengan logam selama proses pengujian *creep* berlangsung. Pengujian *creep* tidak dilakukan hingga *rupture* dan cukup hanya menetapkan nilai laju mulur pada kondisi *creep* tahap II, yang dilakukan selama 30240 menit atau selama kurang lebih dari 21 hari. Kondisi tahap II dilakukan sebagai penetapan

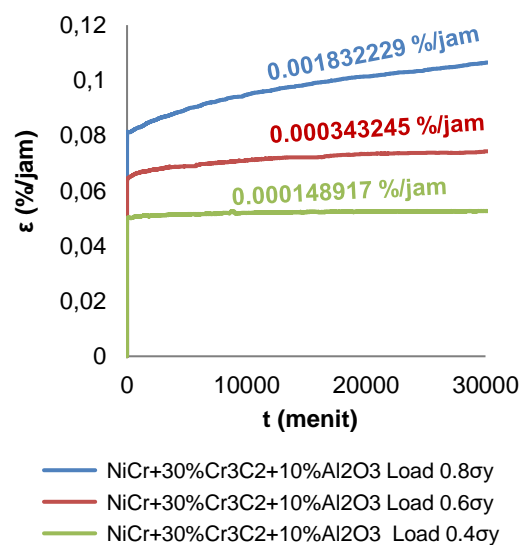
laju mulur karena memiliki kurva yang konstan. Pada kondisi tahap II menjadi dasar penetapan laju mulur.



Gambar 8. Perbandingan pada variasi spesimen uji *creep*

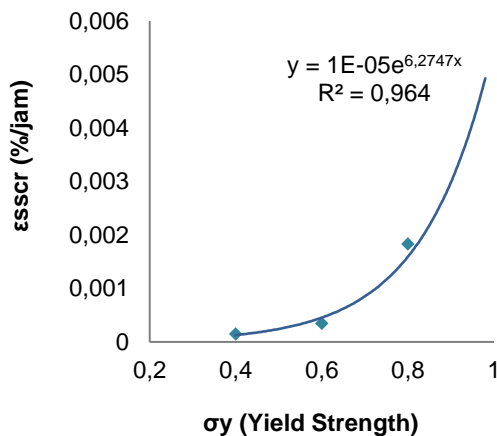
- (a) coating MMC 2 komponen awal
- (b) coating MMC 3 komponen 0,6 σ_y
- (c) coating MMC 2 komponen 0,4 σ_y
- (d) coating MMC 3 komponen 0,4 σ_y .

Berdasarkan analisis kurva variasi *creep* pada coating MMC 3 komponen yang ditunjukkan pada Gambar 9. terdapat tiga kurva yang mengalami kecenderungan kenaikan laju mulur pada pembebanan 0,4 σ_y , 0,6 σ_y dan 0,8 σ_y . Secara berurutan laju mulur dari setiap kondisi adalah sebagai berikut 0,000148917 %/jam, 0,000343245 %/jam, 0,001832229 %/jam.

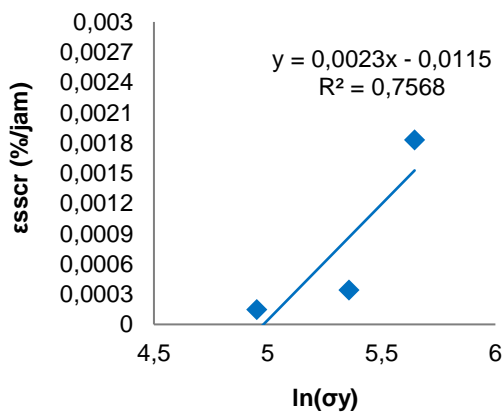


Gambar 9. Kurva variasi *creep* pada coating MMC 3 komponen

Korelasi antara ϵ_{sscr} (*steady state creep rate*) terhadap variasi tegangan ($0,4 \sigma_y$, $0,6 \sigma_y$ dan $0,8 \sigma_y$) pada *coating* MMC 3 komponen menunjukkan korelasi yang berbanding lurus antara kenaikan laju mulur (ϵ_{sscr}) dengan kenaikan tegangan uji yang diterapkan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10. Sedangkan korelasi antara ϵ_{sscr} dan $\ln \sigma_y$ pada *coating* MMC 3 komponen ditunjukkan melalui persamaan garis pada Gambar 11.



Gambar 10. Hubungan ϵ_{sscr} terhadap tegangan σ_{creep} pada *coating* MMC 3 komponen.

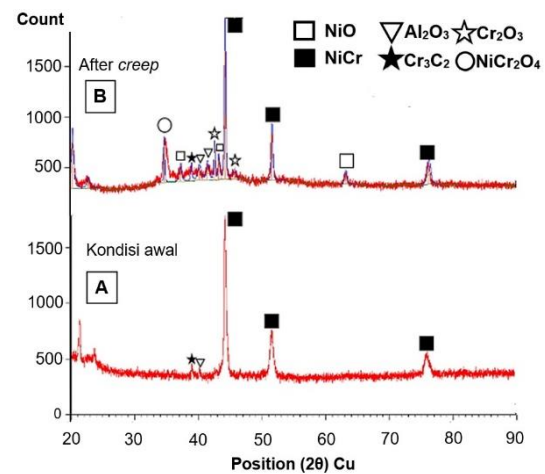


Gambar 11. Persamaan garis ϵ_{sscr} vs $\ln \sigma_y$ pada *coating* MMC 3 komponen.

Analisis data XRD pada *coating* MMC 3 komponen pada Gambar 12 dengan kondisi awal dan kondisi *after creep* menghasilkan pola difraksi untuk mengidentifikasi fasa-fasa dari beberapa *peaks* yang ditunjukkan secara kualitatif. Fasa-fasa baru tersebut antara lain adalah

NiCr yang merupakan *based coating* dengan *peaks* yang paling dominan dari senyawa lainnya dan dihasilkan dari *feedstock*. Cr_3C_2 yang merupakan *reinforcement particle* karbida dan dihasilkan dari *feedstock*. Al_2O_3 yang merupakan senyawa *reinforcement particle* oksida yang dihasilkan dari *feedstock* pada saat deposisi TSC (*Thermal Spray Coating*).

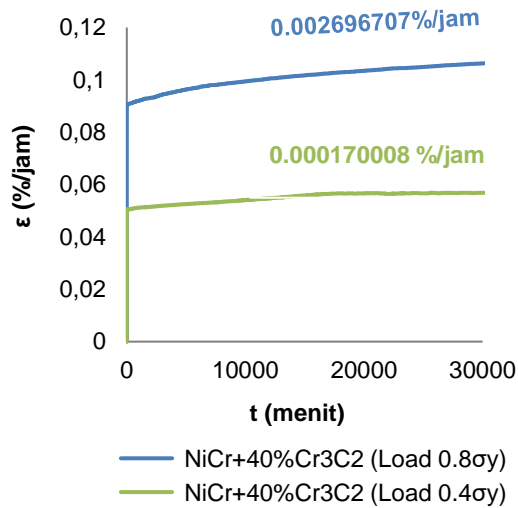
Setelah dilakukan proses uji *creep*, *coating* MMC 3 komponen pola difraksi pada temperatur 550°C memperlihatkan pola yang berbeda dengan kondisi sebelumnya, dimana ditunjukkan pembentukan fasa-fasa baru. *Peaks* baru tersebut menunjukkan oksida berupa NiO yang dihasilkan dari reaksi oksidasi dengan unsur Ni. Cr_2O_3 yang dihasilkan dari hasil reaksi oksidasi dengan unsur Cr. NiCr_2O_4 yang dihasilkan dari hasil reaksi NiO dengan Cr_2O_3 .



Gambar 12. Analisis data XRD pada *Coating* MMC 3 komponen uji *creep* 550°C pada:
(a) kondisi awal
(b) kondisi *after creep*

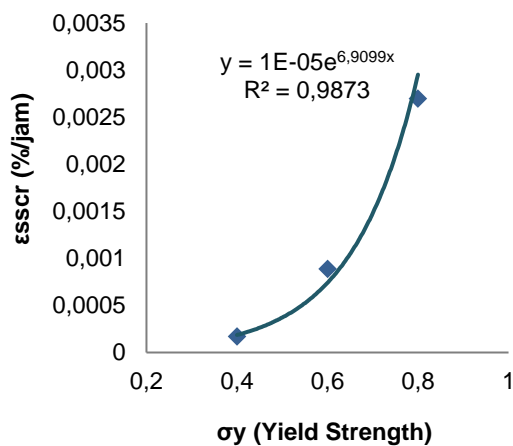
Analisis data pada *coating* MMC 2 komponen yang dilakukan pengujian *creep* dengan pembebanan $0,4$ dan $0,8 \sigma_y$ seperti yang disajikan pada Gambar 13. menghasilkan dua kurva laju mulur (ϵ) terhadap waktu. Pengujian *creep* pada *coating* MMC 2 komponen bertujuan sebagai pembandingan dan melanjutkan hasil penelitian

Waldi, dkk yang dilakukan dengan pembebanan 0,8 σ_y saja. Hasil Laju mulur pada pembebanan 0,4 σ_y dan 0,8 σ_y , secara berurutan adalah 0.000170008 %/jam dan 0.002696707 %/jam.

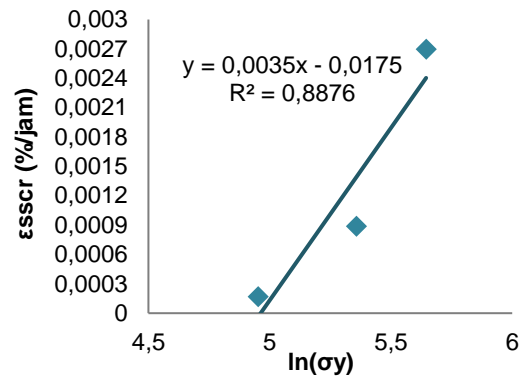


Gambar 13. Kurva variasi *creep* pada *coating* MMC 2 komponen.

Analisis hasil korelasi antara ϵ_{sscr} terhadap variasi tegangan (0,4 σ_y , 0,6 σ_y dan 0,8 σ_y) pada *coating* MMC 2 komponen menghasilkan korelasi yang berbanding lurus antara kenaikan laju mulur (ϵ_{sscr}) dengan kenaikan tegangan (σ_y) seperti yang terlihat pada Gambar 14 dengan tampilan hubungan antara ϵ_{sscr} vs $\ln \sigma_y$ disajikan pada Gambar 15.

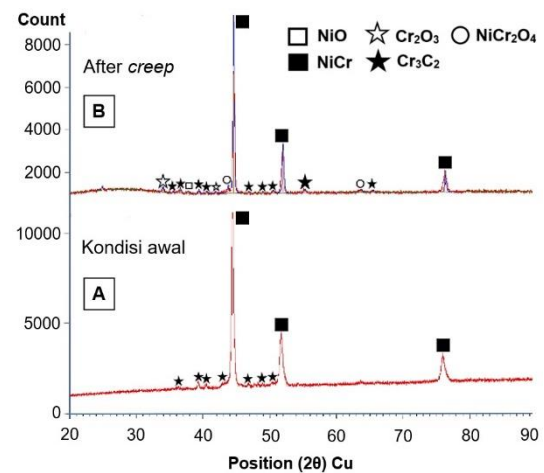


Gambar 14. Hubungan persamaan garis ϵ_{sscr} vs σ_y pada *coating* MMC 2 komponen



Gambar 15. Hubungan persamaan garis ϵ_{sscr} vs $\ln \sigma_y$ pada *coating* MMC 2 komponen.

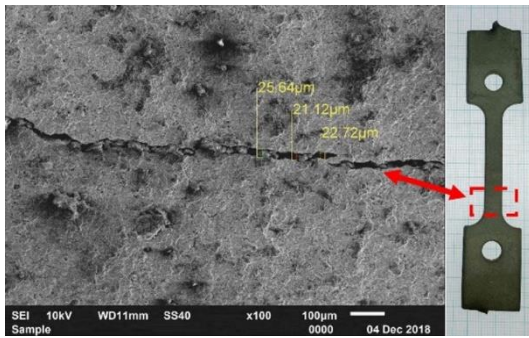
Analisis data XRD pada *coating* MMC 2 komponen pada Gambar 16. dengan kondisi awal dan kondisi *after creep* menghasilkan pola difraksi untuk mengidentifikasi fasa-fasa dari beberapa *peaks* yang ditunjukkan secara kualitatif.



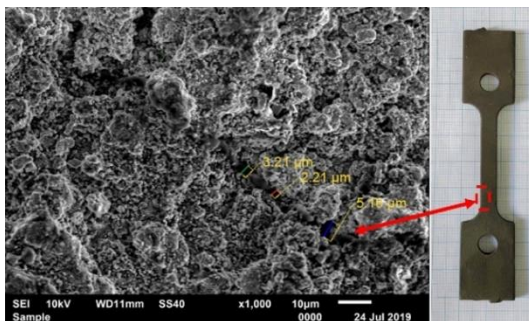
Gambar 13. Analisis data XRD pada *coating* MMC 2 uji *creep* komponen yaitu (a) kondisi awal dan (b) kondisi *after creep*

Struktur Mikro pada Coatings

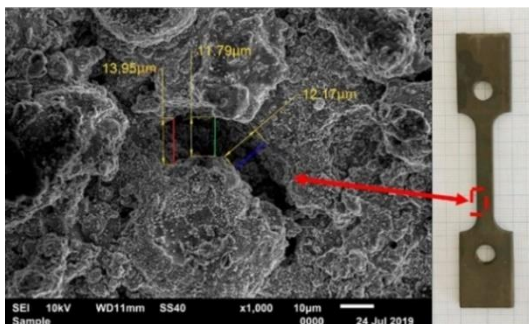
Pengujian SEM (*Scanning Electron Microscopy*) dilakukan pada spesimen sebelum dan setelah proses pengujian *creep* pada *coating* MMC 3 komponen (0,4 dan 0,6 σ_y) dan *coating* MMC 2 komponen 0,4 σ_y dengan hasil yang ditunjukkan pada Gambar 17, 18 dan 19.



Gambar 17. Hasil uji SEM pada *coating* MMC 3 komponen $0.6 \sigma_y$ perbesaran 100x



Gambar 18. Hasil uji SEM pada *coating* MMC 3 komponen $0,4 \sigma_y$ perbesaran 1000x



Gambar 19. Hasil uji SEM pada *coating* MMC 2 komponen $0,4 \sigma_y$ perbesaran 1000x

Dari ketiga hasil data SEM yang dilakukan pengujian *creep*, menunjukkan bahwa terdapat cacat permukaan berupa *crack* pada masing-masing spesimen. *Crack* berasal dari pengujian *creep* yang dilakukan dengan pembebanan statik dan temperatur

tinggi yang diterapkan. Sehingga semakin besar pembebanan statik dan temperatur yang diterapkan maka *crack* yang dihasilkan akan semakin besar.

Jika dilihat dari pembebanan yang diterapkan pada Tabel 3, maka *crack* yang paling besar terdapat pada pembebanan $0.6 \sigma_y$. Sedangkan jika dilihat dari komposisi spesimen *coating* yang digunakan, maka *crack* yang paling besar terdapat pada *coating* MMC 2 komponen, karena pada *coating* MMC 3 komponen terdapat fasa Al_2O_3 yang dapat meningkatkan ketahanan mulur yang lebih baik.

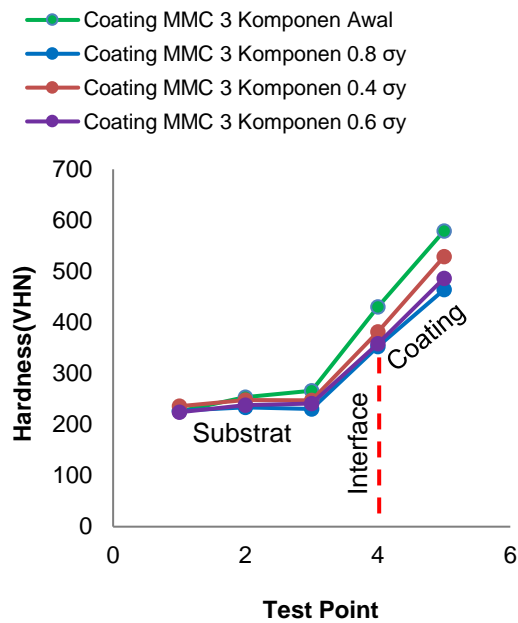
Tabel 3. Perbedaan karakteristik dan hubungan pembebanan statik dan jarak rekahan.

Material	Load	Laju Mulur (%/jam)	Besar Rekahan (μm)
3 Komponen	$0,6 \sigma_y$	0,0003432	23,16
	$0,4 \sigma_y$	0,0001489	3,53
2 Komponen	$0,4 \sigma_y$	0,0001700	12,64

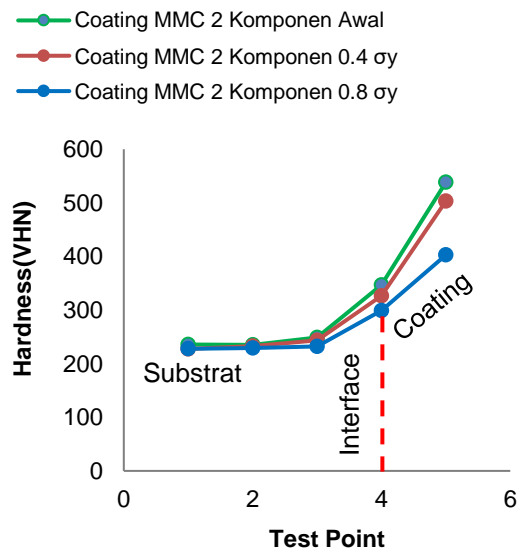
Pembahasan Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan pada spesimen *coating* MMC 3 komponen dan *coating* MMC 2 komponen dengan menggunakan metode *Micro Vickers hardness* dalam satuan HVN (*Hardness Vickers Number*). Pengujian kekerasan dilakukan dengan titik uji pada daerah substrat, *interface* antara substrat dengan *bond coat* dan *top coating* yang menghasilkan visualisasi pada Gambar 20 dan Gambar 21.

Berdasarkan analisis XRD *coating* MMC 3 komponen dan 2 komponen, pembentukan fasa baru oksida NiO , Cr_2O_3 dan $NiCr_2O_4$ menyebabkan penurunan nilai kekerasan pada *coating*. Penurunan nilai kekerasan paling besar terjadi pada nilai pembebanan $0.8 \sigma_y$. Hal ini menunjukkan nilai kekerasan menurun seiring peningkatan nilai pembebanan.



Gambar 20. Hasil kombinasi uji kekerasan *coating* MMC 3 komponen uji *creep*.



Gambar 21. Hasil kombinasi uji kekerasan *coating* MMC 2 komponen uji *creep*.

Perbandingan nilai kekerasan antara *coating* 3 komponen dan 2 komponen menunjukkan bahwa pada *coating* 3 komponen memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan *coating* 2 komponen, hal ini disebabkan adanya fasa Al₂O₃ yang memiliki pengaruh yang besar

pada *coating*. Selain itu, keberadaan fasa tersebut dapat meningkatkan nilai kekerasan di daerah *top coat* yang menyebabkan laju mulur *coating* MMC 3 komponen lebih lambat, dengan kata lain substrat SUS 304 dengan MMC 3 komponen memiliki *creep resistance* yang paling baik.

SIMPULAN

Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa proses oksidasi siklik pada spesimen baja SUS 304 yang berbahan MMC *powder feedstock* berbasis 60%NiCr + 30%Cr₃C₂ + 10%Al₂O₃ yang memiliki resistensi oksidasi yang paling baik terdapat pada temperatur 600°C. Sedangkan pada kondisi 700°C dan 800°C memiliki resistensi yang paling rendah. Hasil observasi fasa oksida pasca-oksidasi siklik pada *coating* MMC 3 komponen temperatur 600°C menunjukkan adanya pembentukan fasa NiO, Al₂O₃ dan Cr₃O₈. Sedangkan oksidasi siklik temperatur 800°C membentuk fasa NiCr₂O₄, NiCrO₄ dan Al₂NiO₄.

Proses pengujian *creep* menunjukkan bahwa spesimen *coating* MMC 3 komponen 0,4 σ_y memiliki laju mulur lebih rendah dibanding MMC 2 komponen yaitu. Maka dapat disimpulkan SUS 304 dengan *coating* MMC 3 komponen (60%NiCr + 30%Cr₃C₂ + 10%Al₂O₃) memiliki sifat *creep resistance* yang paling baik.

Korelasi laju mulur ϵ_{SSCR} terhadap tegangan (0,4, 0,6 dan 0,8 σ_y) menunjukkan kenaikan secara eksponensial seiring kenaikan tegangan. Perubahan sifat fisik dan mekanik paling baik terdapat pada *coating* MMC 3 komponen 0,4 σ_y dengan menghasilkan laju mulur dan nilai kekerasan yang paling rendah..

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis Mengucapkan terima kasih kepada BATAN yang telah mengakomodasi fasilitas dalam penelitian ini serta semua pihak di UNJANI yang telah banyak memberi dukungan terhadap penelitian penulis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Keputusan Menteri ESDM Republik Indonesia No. 5899 K/20/MEM “Pengesahan RUPTL PT PLN (Persero) tahun 2016 s.d 2025”, 2016.
- [2] M. Waldi, E.A. Basuki, E.A; B.Prawara, “Perilaku ketahanan mulur baja SUS 304 dengan lapisan HVOF thermal spray coating berbahan NiCr matrix composite untuk penerapan proteksi pipa ketel uap di Pembangkit Listrik Tenaga Uap”, *Tesis*, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia, 2018.
- [3] M. Huda, dkk, “Peluang aplikasi teknologi pengeringan batubara dan blending batubara di Indonesia ditinjau dari segi ekonomi dan lingkungan”, *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, vol. 8, no. 3, hal. 152–163, 2012.
- [4] A. S. Novrizqa, dkk, “Studi numerik karakteristik pengeringan batubara pada *fluidized bed coal dryer* terhadap pengaruh variasi temperatur *air heater* dengan *tube heater* tersusun *staggered* dan perbandingan *volume chamber* dan volume batubara sebesar 50%”, *Jurnal Teknik POMITS*, vol. 2, no. 1, hal. 56-61, 2013.
- [5] W. A. Prameswari, “Analisa pembentukan slagging dan fouling pembakaran batubara pada boiler B 0201B pabrik 3 unit UBB di PT. Petrokimia Gresik”, *Skripsi*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia, 2017.
- [6] J. R. Davis, “Handbook of Thermal Spray Technology”, 2004.
- [7] L. Pawlowski, *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings (Second Edition)*, John Wiley & Sons, 2008.
- [8] M. D. Aprian, “Perilaku mulur pada suhu 550°C SUS 304 hasil thermal spray coating berbahan MMC 60% NiCr+30%Cr3C2+10%Al2O3 dengan teknik HVOF”, Universitas Jenderal Ahmad Yani, Bandung, Indonesia, 2017.
- [9] A. Contreras, C. Egberto, B. Becerril, M. Salazar, and L. Ruiz, “Metal Matrix Composites,” Springer International Publishing, 2018.
- [10] Y. Nishida, “Introduction to metal matrix composites,” Springer Japan, 2013.
- [11] E. Martides, B. Prawara, H. Ardy, E. Junianto, and B. Priyono, “The influence of particles size and composition variation of NiCr-CrC (20NiCr) metal matrix composites coatings properties on boiler tubes application”, *Materials Science Forum*, vol. 889, pp. 30–35, 2017.
- [12] A. Di Gianfrancesco, “Materials for ultra supercritical and ultra supercritical power plants,” Woodhead Publishing, 2016.
- [13] N. Espallargas, “Future development of thermal spray coatings (First edition), Woodhead Publishing, 2015.
- [14] ASTM C633-13, “Standard test method for adhesion or cohesion strength of thermal spray coatings”, 2017.
- [15] G. E. Dieter, “Mechanical Metallurgy (third edition)”, SI Metric Edition, 1928.
- [16] B. Clyne, *et.al.*, “Creep deformation of metals”, University of Cambridge, 2019.
- [17] ASTM E8/E8M, “Standard test methods for tension testing of metallic materials”, 2016.
- [18] ASTM E139-03.01, “Standard test methods for conducting creep, creep-rupture, and stress-rupture tests of metallic materials”, 2011.
- [19] D. Saber, I. S. Emam, and R. Abdelkarim, “High temperature cyclic oxidation of Ni based superalloys at different temperatures in air”, *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 719, pp. 133–141, 2017.
- [20] A. Cahit, T. Grund, A. Turk, and T. Lampke, “A comparative study of oxidation kinetics and thermal cyclic performance of thermal barrier coatings (TBCs)”, *Surface and Coatings Technology*, vol. 371, pp. 47–67, 2019.