

Pengaruh Komposisi Komposit $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YSZ}$ dan Variasi *Feed Rate* terhadap Ketahanan Termal dan Kekuatan Lekat pada $\text{YSZ-Al}_2\text{O}_3/\text{YSZ Double Layer Tbc}$

Parindra Kusriantoko dan Widyastuti

Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

E-mail: wiwid@mat-eng.its.ac.id

Abstrak—TBC (*Thermal Barrier Coating*) dengan $\text{YSZ-Al}_2\text{O}_3/\text{YSZ top coat}$ (TC) dan MgCrAlY sebagai *bond coat* (BC) yang selanjutnya disebut sebagai $\text{YSZ-Al}_2\text{O}_3/\text{YSZ double layer}$ TBC dibuat dengan menggunakan metode *flame spray*. Hasil pelapisan sebelum dan sesudah diuji termal dikarakterisasi menggunakan SEM, EDX dan XRD. Dari hasil penelitian didapatkan bahwa semakin tinggi *powder feed rate* akan berpengaruh pada morfologi permukaan lapisan. *Feed rate* makin rendah menyebabkan struktur yang cenderung kasar dan tidak padat dan cenderung berporos. Lapisan komposit $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YSZ}$ juga sangat berpengaruh pada pertumbuhan TGO (*Thermally Grown Oxide*) setelah dilakukan uji termal, dimana komposisi paling bagus dengan pertumbuhan TGO paling rendah adalah $15\%\text{Al}_2\text{O}_3/8\%\text{YSZ}$. Hasil pengujian TGA menunjukkan semua sampel mulai teroksidasi pada temperatur $1000-1030^\circ\text{C}$ dan didapatkan sampel paling stabil adalah $15\%\text{Al}_2\text{O}_3/8\%\text{YSZ}$ 14 dan 20 gr/min. Dari pengujian XRD sampel yang memiliki fasa yang paling stabil adalah $15\%\text{Al}_2\text{O}_3/8\%\text{YSZ}$ dengan fasa $t\text{-ZrO}_2$ dan $m\text{-ZrO}_2$. Dari pengujian *Thermal Torch* dan *Pull Off* komposisi $15\%\text{Al}_2\text{O}_3/8\%\text{YSZ}$ juga memiliki ketahanan terhadap pengrusakan yang paling baik dan kelekatan yang baik sebesar 10 MPa.

Kata kunci—*Thermal Barrier Coating*, Nosel Roket, $\text{YSZ}/\text{Al}_2\text{O}_3$, *Thermally Grown Oxide*, Kekuatan Lekat

I. PENDAHULUAN

Nosel (*nozzle*) adalah bagian dari roket yang sangat vital, karena pada nosel memiliki temperatur kerja yang tinggi sekitar $800^\circ-2000^\circ\text{C}$ (yang bergantung pada jenis popelan yang digunakan) dan aliran gas yang tinggi, nosel juga berperan sebagai pengendali arah gerak dari suatu roket [1].

Penelitian tentang nosel ini pernah dilakukan oleh LAPAN dengan menggunakan material baja S45C, tetapi mengalami kegagalan dimana komponen material nosel roket terlepas sebelum proses pembakaran popelan berakhir di detik ke 14. Oleh karena itu pada penelitian ini menggunakan material *superalloy* yang dilapisi dengan material keramik (*Thermal Barrier Coating*) untuk menyesuaikan dengan kondisi kerja dari nosel yang bertemperatur yang sangat tinggi.

Pada *coating* digunakan material 8YSZ karena memiliki ketahanan yang baik pada temperatur tinggi termasuk ketahanan terhadap oksidasi. Dengan adanya tambahan lapisan komposit $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YSZ}$ di atas lapisan *bondcoat* membuat ketahanan termalnya semakin baik. C. Ren [2] melakukan penelitian dengan $95\%\text{YSZ} - 5\%\text{Al}_2\text{O}_3$ yang menghasilkan struktur TBC

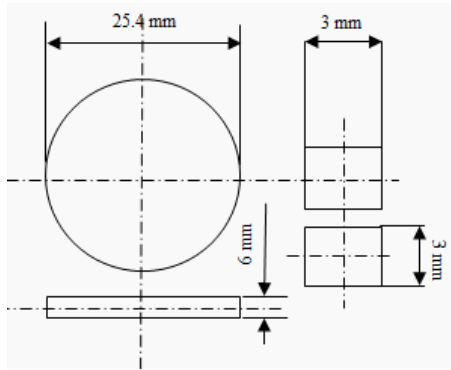
yang lebih tahan terhadap oksidasi. Hal ini karena adanya Al_2O_3 mampu menghalang oksigen yang masuk.

Disamping itu untuk mendapatkan sifat lapisan yang baik perlu parameter *spray* yang baik seperti kecepatan *feed rate* serbuk. Pelapisan dilakukan dengan menggunakan metode *flame spray*, yang tentunya akan membutuhkan parameter *spray* yang tepat. Kecepatan dari *feed rate* serbuk merupakan salah satu parameter yang akan menentukan tingkat pembentukan dari deposisi serbuk pada substrat. Saremi [3] mencoba untuk memvariasikan nilai *feed rate* dari proses *flame spray* memberikan kesimpulan bahwa dengan semakin tingginya *feed rate* akan membuat struktur dari pelapisan semakin padat dan tebal ini akan membantu untuk mencapai tebal yang diharapkan dengan kepadatan yang optimal.

Oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana pengaruh dari komposisi lapisan $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YSZ}$ pada TBC dengan variasi dari komposisi Al_2O_3 dan kecepatan *feed rate* pada saat *spray* terhadap kekuatan lekat dan ketahanan termal (oksidasi dan beban kejut) dari struktur TBC. Dengan tujuan untuk mengetahui berapa presentase berat dari Al_2O_3 pada lapisan $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YSZ}$ dan *feed rate* pada *spray* untuk menghasilkan sifat lapisan yang paling optimal untuk aplikasi pada nosel roket.

II. METODE PENELITIAN

Serbuk 8YSZ (Inframat Advanced Materials, USA) yang digunakan memiliki ukuran partikel $103.35 \pm 14.6\ \mu\text{m}$. Serbuk Al_2O_3 yang digunakan merupakan $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (Merck, Jerman) dengan ukuran butir rata-rata sebesar $110,4 \pm 20,9\ \mu\text{m}$. *Bondcoat* yang digunakan berupa senyawa NiCrAlY (Amdry 962 Sulzer Metco, USA) dengan kandungan $\text{Ni} = \text{bal.}$, $\text{Cr} = 21-23\%$, $\text{Al} = 9-11\%$, $\text{Y} = 0.8-1.2\%$ dan ukuran butir rata-rata $65.57 \pm 12.37\ \mu\text{m}$. Substrat Hastelloy X (Haynes Int., USA) dipotong dengan ukuran $d = 1\ \text{inch}$ dan $t = 6\ \text{mm}$ untuk sampel uji tekan dan *Thermal Torch* sedangkan $3 \times 3 \times 3\ \text{mm}$ untuk sampel uji TGA, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Preparasi dilakukan dengan mencampurkan serbuk 8YSZ dengan Al_2O_3 menggunakan *dry mixing* dengan variasi komposisi Al_2O_3 5%, 15% dan 30%. Proses *grit blasting* pada substrat Hastelloy X dilakukan untuk mengkasarkan permukaan substrat sebelum dilapisi. Proses pelapisan dilakukan dengan metode *flame spray* dengan parameter *spray* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Dimana *feed rate* dari *top coat* divariasikan sebesar 8, 14, dan 20 gr/min. Proses pelapisan diawali dengan melapiskan serbuk *bond coat* pada



Gambar 1. Dimensi Spesimen (a) Uji *Thermal Torch* dan *Pull Off*, (b) Uji TGA

Tabel 1.

Parameter *Spray* yang Digunakan

Lapisan	Arus (A)	Voltage (V)	Feed Rate (g/min)	Jarak (mm)	Tebal (μm)
YSZ	600	75	8 14 20	150	200
YSZ/Al ₂ O ₃	600	75	8 14 20	150	80
Bond coat	600	75	8 14 20	150	100

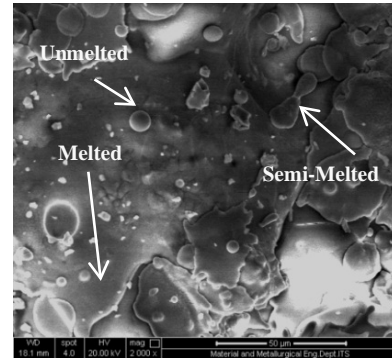
substrat kemudian lapisan Al₂O₃/YSZ dan terakhir lapisan YSZ paling luar.

Setelah selesai dilapisi spesimen dilakukan pengujian *Thermal Torch* dengan busur las *oxyacetylene* selama 35 detik dan diamati kerusakan yang terjadi pada lapisan keramik, *Non-Isothermal Oxidation* dilakukan dengan alat TGA (Thermogravimetri) pada temperatur 1100°C (*heating rate* 10°C/min) untuk mengetahui bagaimana kestabilan dari lapisan. Karakterisasi dilakukan sebelum dan sesudah pengujian termal TGA menggunakan SEM-EDX (*Scanning Electron Microscope*) dan XRD (*X-Ray Diffraction*) untuk mengetahui ukuran daerah TGO dan fasa-fasa yang terbentuk. Pengujian kelekatan dilakukan dengan menggunakan alat *Portable Adhesive Tester type II* untuk mengukur kekuatan lekatan antara pelapis dan substrat.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisa Uji *Scanning Electron Microscope (SEM)* Setelah *Flame Spray*

Gambar 2 menunjukkan morfologi secara umum pada spesimen hasil proses *flame spray*. Dimana ditemui beberapa serbuk dari material *top coat* dengan beberapa kondisi antara lain meleleh (*melted*), meleleh sebagian (*semi melted*) dan tidak meleleh (*unmelted*). Seperti yang dijelaskan pada *ASM Handbook of Thermal Spray* [4] bahwa material serbuk ditembakkan dengan kecepatan sekitar 30 m/s (untuk *flame spray*) menuju permukaan substrat. Kecepatan ini dapat dikategorikan rendah, dibandingkan dengan metode lainnya sehingga ketika proses *spray* serbuk mengalami pendinginan di udara sedikit lebih lama, mengakibatkan serbuk sebagian ada yang tidak meleleh atau semi leleh ketika menyentuh permukaan substrat.



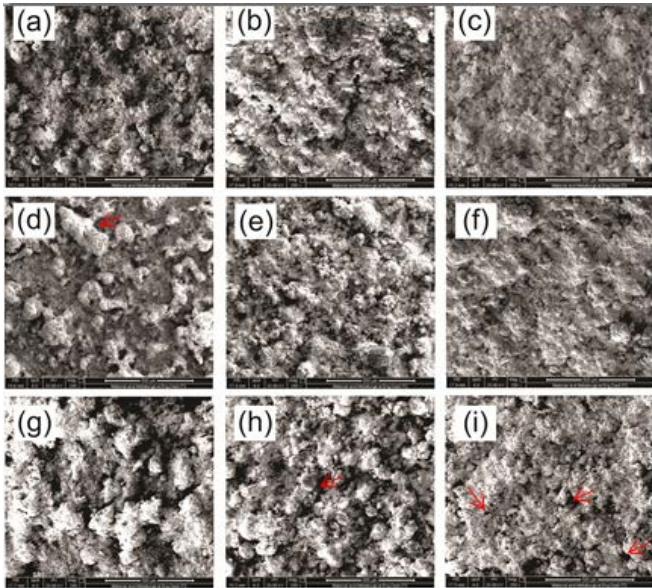
Gambar 2. Hasil Pengujian SEM Permukaan *coating* pada Perbesaran 2000x 5%Al₂O₃/8YSZ, 20 gr/min

Adanya struktur *melted*, *unmelted*, dan *semimelted* disebabkan karena serbuk yang belum sempat meleleh dengan sempurna, sehingga ketika menyentuh permukaan substrat ada beberapa kondisi yang dimungkinkan.

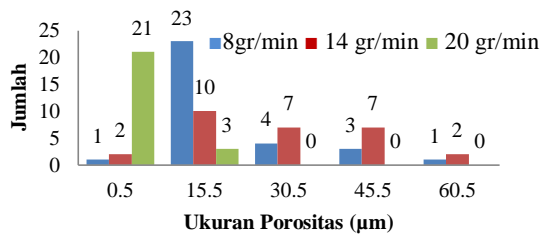
Hasil pengujian SEM pada permukaan sampel setelah proses *flame spray* ditunjukkan pada Gambar 4. Dari Gambar tersebut dapat dilihat bahwa adanya perbedaan *feed rate* pada sampel (dari kanan ke kiri) menyebabkan adanya perubahan pada morfologi permukaan. *Feed rate* yang lebih besar akan cenderung menghasilkan permukaan yang lebih halus dibandingkan dengan *Feed rate* yang rendah. Pada sampel 15% Al₂O₃/8YSZ (Gambar 3 d, e, f) sangat jelas perbedaan kondisi permukaan yang ditimbulkan, dengan kecepatan 8 gr/min, pada permukaan sampel menunjukkan adanya persebaran partikel yang tidak merata sehingga partikel cenderung menggumpal pada satu tempat tertentu. Pada kecepatan 14 gr/min, gumpalan-gumpalan yang ditemui menjadi rapat dan cenderung lebih merata bila dibandingkan dengan sampel sebelumnya. Pada 20 gr/min gumpalan yang ditemui sangat sedikit dan hampir tidak ada.

Rajasekaran, dkk [5] pada penelitiannya mengatakan bahwa dengan kenaikan *powder feed rate* akan meningkatkan laju deposisi dari serbuk sehingga serbuk yang akan terdeposisi lebih banyak dan kompak, menyebabkan porositas akan menurun. Gambar 4 – 6 menunjukkan tingkat distribusi porositas dari tiap sampel. Dapat dilihat bahwa distribusi ukuran porositas menurun seiring dengan naiknya *feed rate*. Sedangkan adanya kenaikan komposisi Al₂O₃ membuat porositas juga menurun namun optimum pada komposisi 15% Al₂O₃ hal ini karena pada komposisi 30% Al₂O₃ nampak porositas yang lebih besar dibandingkan dengan komposisi lainnya. Dari grafik didapatkan kondisi porositas yang paling baik terdapat pada komposisi 15% Al₂O₃ dengan *feed rate* 20 gr/min.

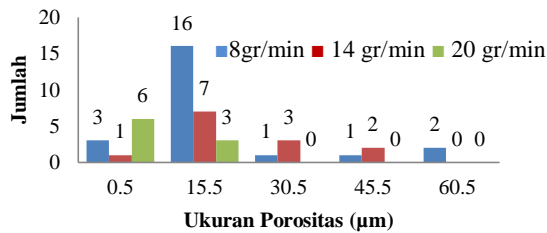
Hasil SEM penampang melintang salah satu sampel setelah *flame spray* ditunjukkan pada Gambar 7, dimana dari gambar penampang terlihat lapisan penyusun dari struktur *coating*. Struktur yang dihasilkan oleh metode *flame spray* memang cenderung kurang teratur dan kasar, hal ini karena temperatur nyala api maksimal yang dihasilkan oleh metode ini sekitar 2700° C [4]. Sehingga menyebabkan serbuk belum sempat meleleh dengan sempurna. Dari gambar juga terlihat lapisan YSZ dan Al₂O₃/YSZ sudah menyatu dan hampir tidak dapat dibedakan.



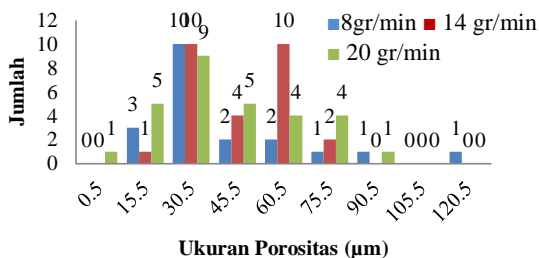
Gambar 3. Hasil SEM Permukaan *coating* pada Perbesaran 250x (a) 5%Al₂O₃/8YSZ, 8 gr/min (b) 5%Al₂O₃/8YSZ, 14 gr/min (c) 5%Al₂O₃/8YSZ, 20 gr/min (d) 15%Al₂O₃/8YSZ, 8 gr/min (e) 15%Al₂O₃/8YSZ, 14 gr/min (f) 15%Al₂O₃/8YSZ, 20 gr/min (g) 30%Al₂O₃/8YSZ, 8 gr/min (h) 30%Al₂O₃/8YSZ, 14 gr/min (i) 30%Al₂O₃/8YSZ, 20 gr/min



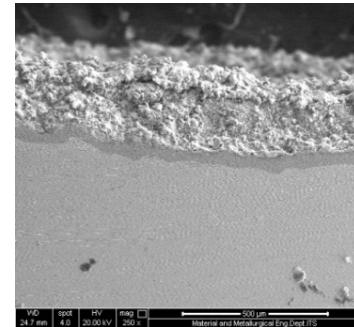
Gambar 4. Grafik Distribusi Porositas pada Sampel dengan Komposisi 5% Al₂O₃



Gambar 5. Grafik Distribusi Porositas pada Sampel dengan Komposisi 15% Al₂O₃



Gambar 6. Grafik Distribusi Porositas pada Sampel dengan Komposisi 30% Al₂O₃

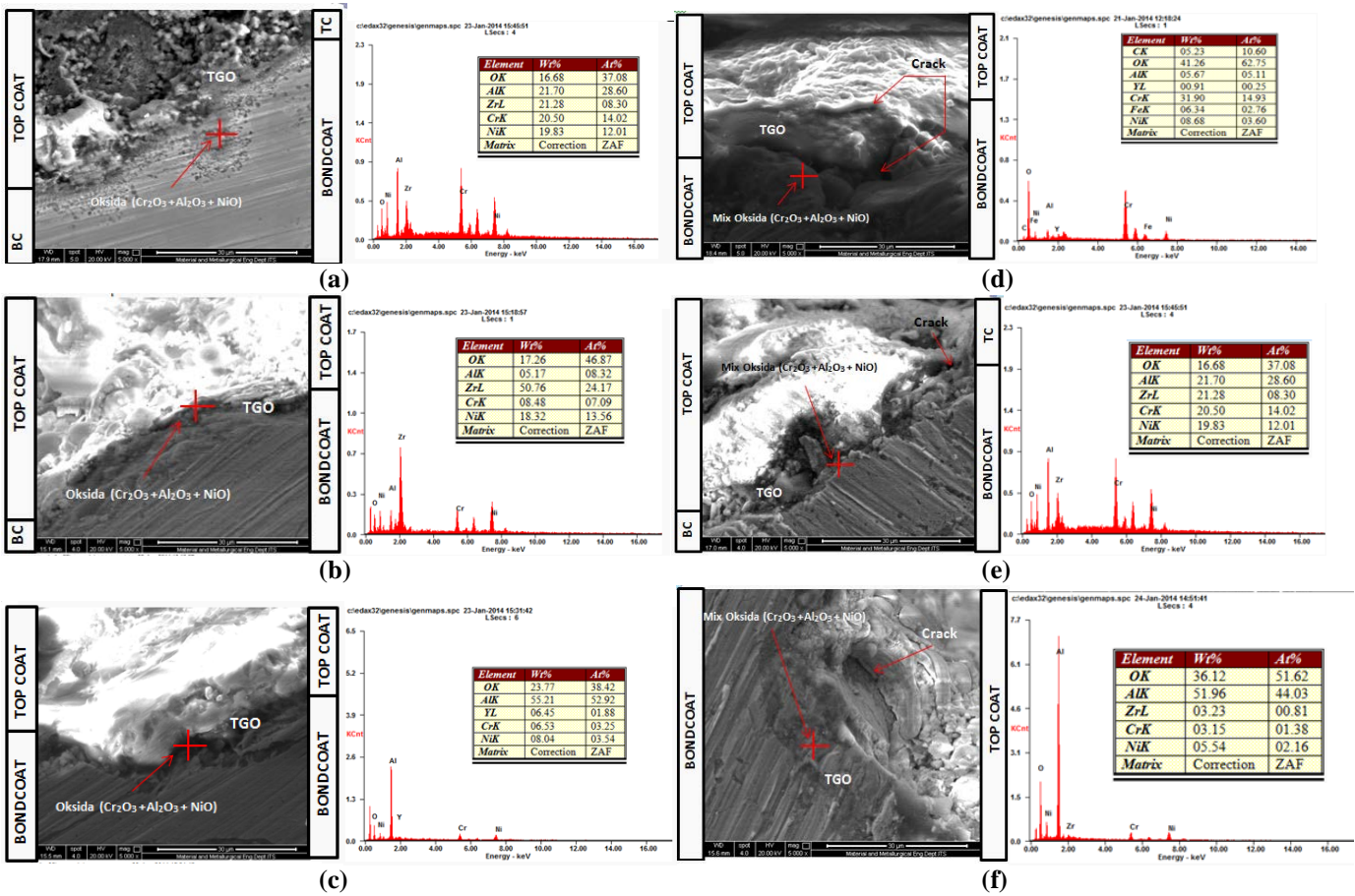


Gambar 7. Hasil SEM Penampang 5%Al₂O₃/8YSZ, 20 gr/min dengan Perbesaran 250x

Pada Gambar 8 (a, b, dan c) menunjukkan hasil SEM perbesaran 5000x dan EDX pada daerah antara TC dan BC untuk komposisi 5%, 15%, dan 30% Al₂O₃/8YSZ setelah proses *Thermal Spray*. Dari hasil SEM dapat diketahui bahwa antara lapisan TC dan BC terdapat suatu daerah yang berwarna gelap, daerah ini dapat diidentifikasi sebagai daerah TGO (*Thermally Grown Oxide*), atau daerah pertumbuhan oksida. Daerah TGO sebenarnya merupakan bagian dari *bondcoat* yang mengalami oksidasi karena adanya perubahan temperatur yang cukup tinggi [6]. Ini terbukti setelah dilakukan EDX pada daerah yang berwarna gelap, dan didapatkan hasil dengan adanya unsur O. Melihat dari hasil EDX oksida terbesar datang dari dari Cr dan Al, hal ini seperti yang dilaporkan oleh Yanjun Li dkk [7] dimana oksida penyusun daerah TGO umumnya terdiri atas beberapa formasi oksida antara lain Al₂O₃, (Cr,Al)₂O₃ + (Co,Ni)(Cr,Al)₂O₄ + NiO yang selanjutnya disebut formasi CSN dan (Cr,Al)₂O₃ + (Co,Ni)(Cr,Al)₂O₄ yang selanjutnya disebut sebagai CS. Tebal daerah TGO pada tiap sampel ini setelah dilakukan pengukuran sekitar 3.17 μm untuk komposisi 5% Al₂O₃, 2.76 μm untuk komposisi 15% Al₂O₃, dan 2.61 μm untuk komposisi 30% Al₂O₃. Jika dibandingkan tiap sampel mengalami perubahan ukuran TGO, dimana TGO menipis seiring dengan naiknya kandungan Al₂O₃. Ini membuktikan bahwa dengan adanya penambahan Al₂O₃ membuat lapisan TGO semakin tipis, seperti halnya yang dilaporkan oleh Mehdi dan Kamran [8], Saremi dkk [3], C. Zhu dkk [9], serta C. Ren dkk [2] pada penelitiannya mengatakan bahwa ketebalan TGO menurun dengan adanya penambahan Al₂O₃. Adanya TGO yang terbentuk pada sampel sebelum dilakukannya uji termal merupakan hasil dari proses *flame spray*.

B. Setelah Uji Termal

Gambar 8 (d, e dan f) menunjukkan daerah TGO dan hasil EDX dari sampel dengan komposisi 5%, 15%, dan 30% Al₂O₃/8YSZ, 20 gr/min setelah uji termal. Bila dibandingkan dengan sebelum dilakukan uji termal, lebar dari TGO mengalami penambahan dengan dan disertai dengan adanya *crack*. Setelah dilakukan pengukuran lebar TGO berubah menjadi 10.12 μm untuk komposisi 5% Al₂O₃, 9.41 μm untuk komposisi 15% Al₂O₃, dan 12.15 μm, dan lebar *crack* secara berurutan 2.425 μm, 2 μm, dan 0.4 μm. Pada penelitian yang dilakukan oleh Jackson dkk [10], bahwa batas kritis dari lebar TGO sebelum TBC mengalami kegagalan adalah 3 – 10 μm. termal sampai 1100°C.



Gambar 8. Hasil SEM-EDX Setelah Proses *flame spray* (a) 5% Al₂O₃/8YSZ, (b) 15% Al₂O₃/8YSZ, (c) 30% Al₂O₃/8YSZ, dan Setelah Uji Termal (d) 5% Al₂O₃/8YSZ, (e) 15% Al₂O₃/8YSZ, (f) 30% Al₂O₃/8YSZ dengan Perbesaran 5000x

Tabel 2. Nilai perbandingan lebar TGO dan ukuran retak sebelum dan sesudah uji termal

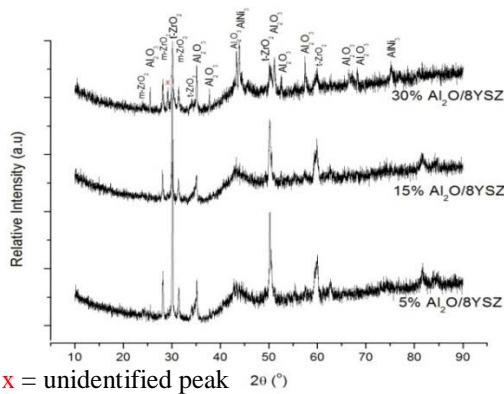
Sampel	Sebelum Uji Termal		Sesudah Uji Termal	
	TGO (µm)	Crack (µm)	TGO (µm)	Crack (µm)
5% Al ₂ O ₃ /8YSZ	3.17	-	10.12	2.425
15% Al ₂ O ₃ /8YSZ	2.76	-	9.41	2.0
30% Al ₂ O ₃ /8YSZ	2.61	-	12.15	0.4

Tabel 2 dapat dilihat bahwa pada komposisi 30% Al₂O₃ lebar TGO seharusnya lebih kecil dari sampel lainnya tapi disini didapatkan nilai yang lebih besar. Bila dilakukan analisa mundur, maka ini dapat dijelaskan bila melihat hasil SEM pada permukaan dari sampel ini dimana nilai porositas yang ada pada permukaan lebih besar dari yang lainnya, sehingga akan memudahkan oksigen untuk masuk dan mengoksidasi daerah TGO. Struktur dari sampel dengan 30% Al₂O₃ pada permukaan didapatkan lebih berporos hal ini kemungkinan disebabkan karena terlalu banyaknya kandungan Al₂O₃ yang dicampurkan pada YSZ, dimana pencampuran yang terjadi tidak merata, disisi lain faktor dari *flame spray* yang terkadang macet dan serbuk susah keluar menyebabkan hasil deposisi yang kurang baik dan menyebabkan banyak porositas.

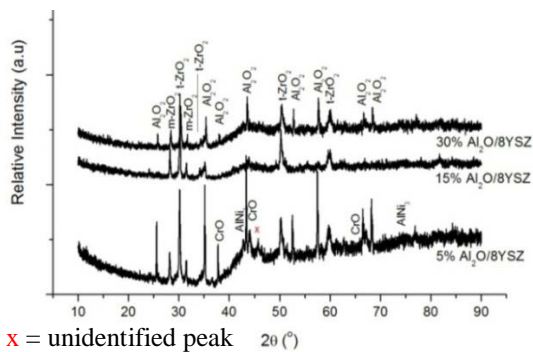
C. Analisa Uji X-Ray Diffraction (XRD)

Komposisi 5% Al₂O₃/8YSZ (Gambar 9) *peak* tertinggi yang muncul teridentifikasi pada 2θ = 30.16°, setelah dilakukan pencocokan dengan kartu pdf, peak ini merujuk pada fasa t-ZrO₂ (zirkonia tetragonal) (*ref code* 01-075-9646) Puncak lain pada 28.14° merupakan puncak milik m-ZrO₂ (zirkonia monoklinik) (*ref code* 00-037-1484). Fasa lain yang terdeteksi adalah Al₂O₃ (01-073-5928), dapat dilihat dengan adanya puncak-puncak 43.37° yang teridentifikasi pada bidang (113), 25.53° (012), 57.53° (116). Adanya fasa Al₂O₃ yang terdeteksi merupakan suatu indikasi bahwa adanya porositas yang menyebabkan Al₂O₃ yang seharusnya berada pada lapisan di bawah YSZ menjadi terdeteksi, anggapan adanya porositas menjadi semakin kuat karena ditemukannya fasa AlNi₃ (01-071-5884) yang merupakan fasa dari *bondcoat*, hal ini dapat dikarenakan kesalahan pada saat proses pelapisan. Dapat dilihat juga bahwa puncak Al₂O₃ semakin naik pada komposisi 30% Al₂O₃/8YSZ, ini menunjukkan bahwa porositas pada komposisi ini cukup tinggi, sehingga ini dapat menjelaskan hasil SEM EDX yang menunjukkan nilai TGO yang tinggi pada komposisi ini.

Setelah dilakukan proses pengujian termal, sampel diuji lagi dengan mesin XRD pada bagian permukaan yang sama. Hasil yang didapatkan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10, dimana secara berturut-turut untuk komposisi 5%



Gambar 9. Pola XRD pada Permukaan Atas Sebelum Uji Termal pada Setiap Komposisi

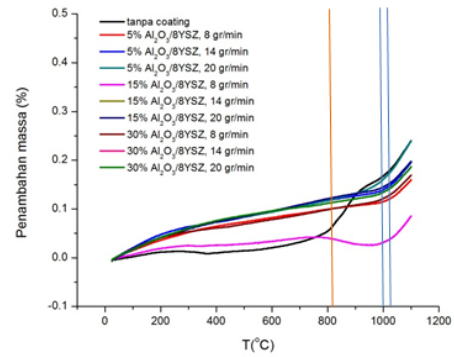


Gambar 10. Pola XRD pada Permukaan Atas Sesudah Uji Termal pada Setiap Komposisi

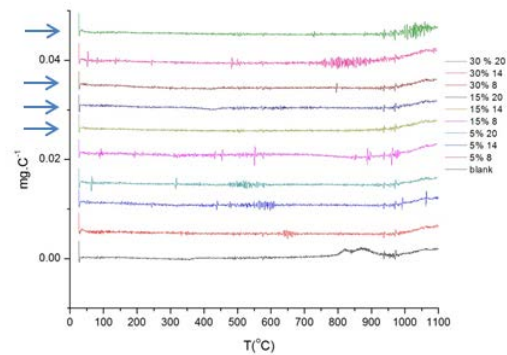
Al₂O₃/8YSZ sampai 30% Al₂O₃/8YSZ. Dari hasil XRD tampak beberapa perubahan pada intensitas dari puncak-puncak seperti t-ZrO₂, dan m-ZrO₂ dibandingkan dengan kondisi sebelum pengujian termal. Dijumpai juga puncak baru seperti pada 5% Al₂O₃/8YSZ muncul puncak yang teridentifikasi sebagai CrO (01-078-0722), ini menunjukkan adanya kerusakan pada permukaan sampel sehingga oksida yang berasal dari kandungan Cr pada *bondcoat* ikut terdifraksi. Dari hasil XRD tersebut bahwa sampel dengan kandungan 15% Al₂O₃/8YSZ tidak memiliki perubahan yang berarti pada puncak-puncaknya, ini menunjukkan bahwa sampel ini merupakan sampel paling stabil.

D. Analisa Pengujian Thermal TGA dan Thermal Torch

Gambar 11 dan 12 merupakan hasil dari pengujian TGA non-isothermal hingga temperatur 1100° C pada tiap sampel ditambah sampel tanpa *coating*. Bila dilihat dari hasil TGA rata-rata sampel mulai menunjukkan perubahan slope yang signifikan terjadi pada rentang temperatur 1000-1030° C, dimana menunjukkan bahwa oksida-oksida mulai mengalami pembentukan dengan kata lain pertumbuhan pada daerah TGO. Dari analisa *Ist Derivative* untuk analisa stabilitas termal dari *coating*. Seperti yang ditunjukkan pada grafik sebelumnya umumnya sampel mempunyai stabilitas yang buruk pada temperatur diatas 1000°C, tapi bila menggunakan analisa *Ist Derivative* ini akan terlihat jelas mana yang lebih stabil dan tidak. Stabil atau tidaknya sampel dapat dilihat dari adanya gerutan-gerutan pada grafik, yang menandakan adanya suatu



Gambar 11. Grafik %m-T (Penambahan Massa-Temperatur)



Gambar 12. Grafik Analisa *Ist Derivative* TGA pada Setiap Sampel

reaksi yang terjadi. Semakin halus garis yang terbentuk maka stabilitas semakin baik. Dari analisa *Ist Derivative* didapatkan sampel yang paling stabil adalah sampel dengan komposisi 15% Al₂O₃/8YSZ, 14 gr/min, dan diikuti oleh sampel 15% Al₂O₃/8YSZ, 20 gr/min; 30% Al₂O₃/8YSZ, 8 gr/min; 30% Al₂O₃/8YSZ, 20 gr/min secara berurutan.

E. Thermal Torch

Untuk mengetahui tingkat kerusakan dan kondisi dari sampel setelah diuji termal las, maka dilakukan penskalaan data kualitatif menjadi suatu ukuran yang bisa dinilai. Tabel 3 menunjukkan tingkat kerusakan dari sampel setelah diuji termal las. Sehingga dapat dilakukan perbandingan kondisi fisik secara kuantitatif dari semua sampel uji.

Dari Tabel 3 diperoleh bahwa sampel yang memiliki ketahanan fisik yang bagus terhadap penetrasi api asetilin adalah 15% Al₂O₃/8YSZ, 8 gr/min dan 15% Al₂O₃/8YSZ, 14 gr/min, dimana sampel hanya mengalami pengurangan ketebalan lapisan yang sedikit. Bila dihubungkan dengan hasil SEM dan pengujian TGA maka ini akan menjelaskan kenapa sampel 15% Al₂O₃/8YSZ memiliki ketahanan termal yang baik, dimana dari segi tingkat porositas lapisan atas yang baik dan tebal dari TGO yang relative rendah dan stabilitas *coating* yang baik.

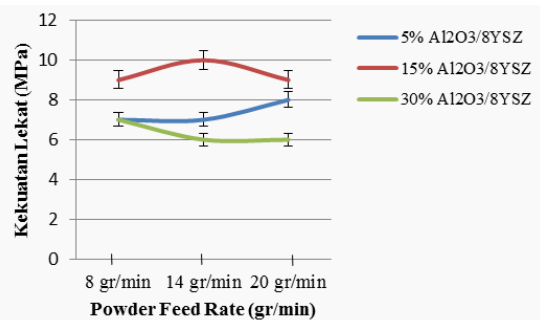
F. Analisa Pengujian Pull Off

Berdasarkan hasil percobaan didapatkan bahwa tren kekuatan lekat naik ketika kandungan Al₂O₃ naik (Gambar 13), hal ini karena Al₂O₃ berfungsi sebagai *oxygen barrier* yang menyebabkan lapisan TGO menjadi tipis sehingga

Tabel 3.

Kondisi dari sampel setelah diuji <i>Thermal Torch</i> dan lama waktu pemanasan	Feed Rate (gr/min)	Waktu (detik)	Kondisi
Tanpa coating	-	21.45	1
8YSZ biasa	-	29.5	1
5% Al ₂ O ₃ /8YSZ	8	32.23	2
	14	33.25	2
	20	32.37	2
15% Al ₂ O ₃ /8YSZ	8	36.17	4
	14	35.67	4
	20	32.99	2
15% Al ₂ O ₃ /8YSZ	8	31.8	3
	14	32.56	3
	20	32.95	2

Ket : 1 = Rusak (cekung dalam, coating hilang), 2 = Cekung (coating menipis), 3 = Cekung dangkal, 4 = Bagus (cekung sangat kecil)



Gambar 13. Grafik Hubungan antara Kelekatan dengan Komposisi Al₂O₃ dan Feed Rate

kekuatan lekat meningkat. Tapi terlihat juga bila kandungan Al₂O₃ meningkat sampai 30% kekuatan lekat mengalami penurunan. Bila kita melihat hasil SEM dari sampel maka ini akan menjelaskan fenomena ini, dimana pada komposisi 30% Al₂O₃, permukaan yang terbentuk cenderung lebih poros, sehingga penetrasi oksigen lebih tinggi.

Hasil dari pengujian lekat jika dibandingkan dengan hasil pengujian Okazaki dkk, [11] maka terdapat perbedaan kekuatan lekat yang cukup signifikan, sekitar 50%, hal ini karena perbedaan metode pelapisan dan pengujian lekat. Okazaki dkk [11] menggunakan metode APS dan mendapatkan kekuatan lekat maksimal 30 MPa.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa:

- Dari hasil SEM didapatkan kesimpulan bahwa semakin naik *feed rate* akan menyebabkan kerapatan permukaan lapisan semakin baik, dimana porositas menjadi menurun seiring dengan naiknya *feed rate*. Perubahan TGO setelah dilakukan uji termal pada tiap komposisi berurutan, 5% Al₂O₃/8YSZ, 15% Al₂O₃/8YSZ, 30% Al₂O₃/8YSZ adalah 10.12 μ m, 9.41 μ m, dan 12.15 μ m. Dengan kata lain komposisi 15% Al₂O₃ memiliki ketahanan termal yang paling baik.
- Berdasarkan pengujian XRD sebelum pengujian termal didapatkan fasa t-ZrO₂, m-ZrO₂ dan Al₂O₃ untuk tiap komposisi, kecuali pada 30% Al₂O₃ terdapat puncak milik AlNi₃ yang menunjukkan permukaan yang berporos. Setelah pengujian termal didapatkan adanya puncak baru pada komposisi 5% dan 30% Al₂O₃ yaitu munculnya

puncak Al₂O₃ lain (hasil oksida BC) dan CrO, tapi pada komposisi 15% Al₂O₃ tidak terdapat adanya fasa baru, yang menunjukkan kestabilan fasanya baik.

- Dari pengujian TGA, semua spesimen menunjukkan perubahan massa yang tajam pada temperatur didapatkan komposisi paling baik dan stabil pada 1000° – 1030°. Dari sini didapatkan bahwa komposisi paling stabil adalah 15% Al₂O₃/8YSZ, 14 gr/min, dan diikuti oleh sampel 15% Al₂O₃/8YSZ, 20 gr/min; 30% Al₂O₃/8YSZ, 8 gr/min; 30% Al₂O₃/8YSZ, 20 gr/min secara berurutan.
- Berdasarkan pengujian *Thermal Torch* didapatkan bahwa sampel yang memiliki tingkat kerusakan paling rendah adalah 15% Al₂O₃/8YSZ, 8gr/min dan 15% Al₂O₃/8YSZ, 14 gr/min.
- Berdasarkan pengujian lekat didapatkan bahwa nilai paling baik terdapat pada komposisi 15% Al₂O₃/8YSZ, 14 gr/min yaitu 10 Mpa. Tapi paling rendah terdapat pada komposisi 30% Al₂O₃/8YSZ, 14 dan 20 gr/min yaitu 6 MPa. Ini menunjukkan komposisi Al₂O₃ untuk menghasilkan kelekatan yang baik maksimal 15% Al₂O₃.

DAFTAR PUSTAKA

- Sutton, George . 2001. Rocket Propulsion Elements 7th ed. Chichester: John Wiley & Sons.
- Ren, C. Y. D. He. D., dan R. Wang. 2010. Al₂O₃/YSZ Composite Coatings Prepared by A Novel Sol-Gel Process And Their High-Temperature Oxidation Resistance. Oxide Metal Journal Springer 74:275-285.
- Saremi, Mohsen, Abbas Afrasiabi, Akira Kobayashi. 2008. Microstructural Analysis of YSZ and YSZ/Al₂O₃ Plasma Sprayed Thermal Barrier Coatings After High Temperature Oxidation. Surface & Coatings Technology 202 3233–3238.
- _____. 2004. ASM Handbook of Thermal Spray. ASM Internasional.
- Rajasekaran, B., G. Mauer, dan R. Vaben. 2011. Enhanced Characteristics of HVOF-sprayed MCrAlY Bond Coats for TBC Applications ASM International JTTEE5 20:1209–1216.
- Padture, N. P., Gell, M. dan Jordan, E. H. 2002. Thermal Barrier Coatings for Gas-turbine Engine Applications. Journal of Science. 296, 280.
- Li, Yanjun, Youtao Xie, Liping Huang, Xuanyong Liu, Xuebin Zheng. 2012. Effect of Physical Vapor Deposited Al₂O₃ Film on TGO Growth in YSZ/CoNiCrAlY Coatings. Ceramics International 38 5113–5121.
- Hasab, Mehdi Ghobeiti dan Kamran Rashnuei. 2012. Comparison of Oxidation Resistance of YSZ And YSZ/Al₂O₃ Coatings on Ni-Based Superalloy. Ceramics International 667.613:621.791.48.
- Zhu, C., A. Javed, P. Li, F. Yang, G.Y. Liang, P. Xiao. 2012. A Study of The Microstructure and Oxidation Behavior of Alumina/Yttria-Stabilized Zirconia (Al₂O₃/YSZ) Thermal Barrier Coatings. Surface & Coatings Technology 212 214–222.
- Jackson, R.D., M.P. Taylor, H.E. Evans, X.H. Li. 2011. Oxidation Study of An EB-PVD MCrAlY Thermal Barrier Coating System. Oxidation of Metals 76.
- Okazaki, Masakazu., Satoshi Yamagishi, Yasuhiro Yamazaki, Kazuhiro Ogawa, Hiroyuki Waki, Masayuki Arai. 2013. Adhesion Strength of Ceramic Top Coat in Thermal Barrier Coatings Subjected to Thermal Cycles: Effects of Thermal Cycle Testing Method and Environment. International Journal of Fatigue 53 33–39.