

PENGARUH VARIASI *FEED RATE* DAN JUMLAH SAPUAN KOMPOSIT YSZ- Al_2O_3 TERHADAP KETAHANAN TERMAL DAN KEKUATAN LEKAT PADA YSZ/YSZ- Al_2O_3 *DOUBLE LAYER* TBC UNTUK APLIKASI NOSEL ROKET

Chaizi Nasucha dan Widyastuti

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

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

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

Abstrak—TBC (*Thermal Barrier Coating*) dengan YSZ- Al_2O_3 /YSZ *top coat* (TC) dan MCrAlY sebagai *bond coat* (BC) yang selanjutnya disebut sebagai YSZ- Al_2O_3 /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* menyebabkan serbuk yang terdeposisi semakin banyak mempermudah mencapai ketebalan yang diharapkan dengan kepadatan yang optimal. Semakin banyak jumlah sapuan membuat kompleksitas mikrostruktur semakin tinggi dan menyebabkan kekuatan lekat dan ketahanan termal semakin rendah. Hasil pengujian TGA menunjukkan sampel yang dicoating mulai teroksidasi pada temperature 900 °C, dan dengan analisa 1st Derivative didapatkan sampel paling stabil adalah 17 g/min- 1x. dan dari pengujian Thermal Torch sampel 17 g/min- 1x. memiliki ketahanan terhadap pengerusakan yang baik. Kekuatan lekat paling tinggi juga terdapat pada komposisi 17 g/min- 1x dengan nilai rata-rata 17.17 Mpa.

Kata kunci : TBC, Nosel Roket, Feed rate, YSZ/ Al_2O_3 , TGO, Kekuatan Lekat

I. PENDAHULUAN

Thermal Barrier Coating (TBC) merupakan salah satu jenis dari pelapisan (*coating*) yang digunakan untuk penghalang panas dari lingkungan sehingga struktur menjadi aman terhadap panas. (Sulistijono dan Lukman 2007)[1]. Nosel roket sering mengalami kegagalan karena material yang digunakan tidak mampu menahan temperatur kerja nosel yang tinggi sekitar 800°-1200° C (Lapan, 2012)[2]. Lapisan TBC diaplikasikan pada nosel roket untuk menahan temperatur kerja yang tinggi tersebut.

Parindra (2014) melakukan percobaan pelapisan TBC untuk nosel roket menggunakan metode *flame spray* dengan variasi variabel yang diteliti adalah komposisi dan *feed rate* serbuk komposit YSZ- Al_2O_3 untuk menghasilkan hasil *coating* yang optimum[3]. Pada penelitian tersebut belum didapatkan nilai *feed rate* yang pasti untuk hasil

coating yang optimum. sehingga dilakukan penelitian lebih lanjut.

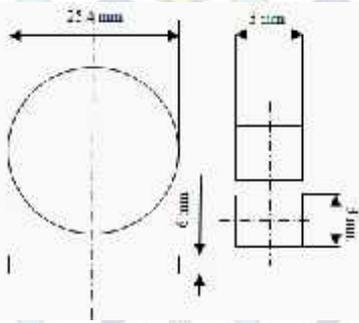
Pada penelitian ini dilakukan perbaikan variabel penelitian *feed rate* dan penambahan variabel baru berupa jumlah sapuan, Saremi melakukan variasi nilai *feed rate* dari proses *flame spray* memberikan kesimpulan bahwa dengan semakin tingginya *feed rate* akan membuat morfologi dari pelapisan semakin *uniform* dan tebal[4]. hal ini akan membantu untuk mencapai tebal yang diharapkan morfologi permukaan yang seragam. Variasi jumlah sapuan diharapkan mampu menutupi dan lapisan yang terbentuk menahan perambatan crack. Junqi Yao (2013) makin banyak jumlah sapuan maka akan makin tahan terhadap oksidasi dan spallation[5].

Oleh karena itu penelitian ini dilakukan untuk mengetahui bagaimana pengaruh jumlah *sapuan* dan *feed rate* lapisan komposit YSZ- Al_2O_3 terhadap kekuatan lekat dan ketahanan termal dari struktur TBC. Dengan tujuan untuk mengetahui jumlah *sapuan* dan *feed rate* pada proses *flame spray* untuk menghasilkan sifat lapisan yang paling optimal.

II. METODE PENELITIAN

Serbuk YSZ (Inframat Advanced Materials, USA) yang digunakan memiliki ukuran partikel 71.88 μm . Serbuk Al_2O_3 yang digunakan merupakan $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (Merck, Jerman) dengan ukuran butir rata-rata sebesar 37.7 μm . *Bondcoat* yang digunakan berupa senyawa NiCrAlY (Amdry 962 Sulzer Metco, USA) dengan kandungan Ni = bal., Cr = 21-23%, Al = 9-11%, Y = 0.8-1.2% dan ukuran butir rata-rata 87.98 μm . Substrat Hastelloy X (Haynes Int., USA) dipotong dengan ukuran $d = 1$ inch dan $t = 6$ mm untuk sampel uji tekan dan *Thermal Torch* sedangkan 3x3x3 mm untuk sampel uji TGA, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Preparasi dilakukan dengan mencampurkan serbuk YSZ dengan Al_2O_3 menggunakan *dry mixing* dengan komposisi Al_2O_3 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 14,17 dan 20 g/min. Proses pelapisan

diawali dengan melapiskan serbuk *bond coat* pada substrat kemudian lapisan YSZ-Al₂O₃ dan terakhir lapisan YSZ paling luar.



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

Tabel 1. Parameter *Spray* yang digunakan

Lapisan	Komposisi	Sapuan	Feed Rate (g/min)			Jarak (mm)	Tebal (μm)
YSZ	-	1	20	20	20	200	230
YSZ-Al ₂ O ₃	30	1 2 3	14	17	20	200	-
<i>Bond coat</i>	-	1	20	20	20	200	120

Setelah selesai dilapisi spesimen dilakukan pengujian kelekatan dilakukan dengan menggunakan alat *Portable Adhesive Tester type II* untuk mengukur kekuatan lekatan antara pelapis dan substrat. Pengujian *Thermal Torch* dengan busur las *oxyacetylene* selama 25 detik dan diamati kerusakan yang terjadi pada lapisan keramik, *Non-Isothermal Oxidation* dilakukan dengan alat TGA (Thermogravimetri) pada temperatur 1000°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.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

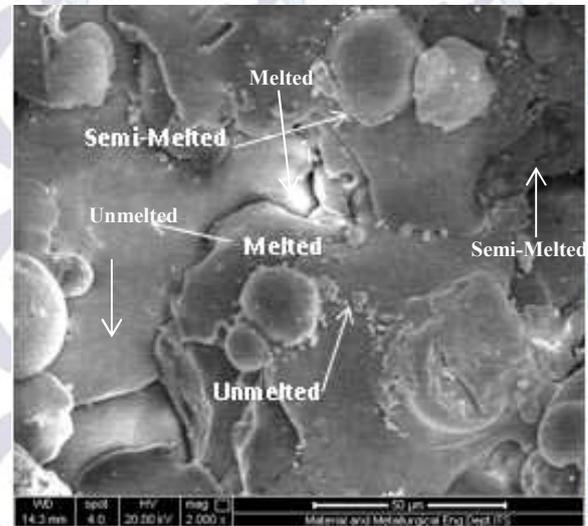
A. Analisa Uji *Scanning Electron Microscope (SEM)*

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* [6] 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.

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.



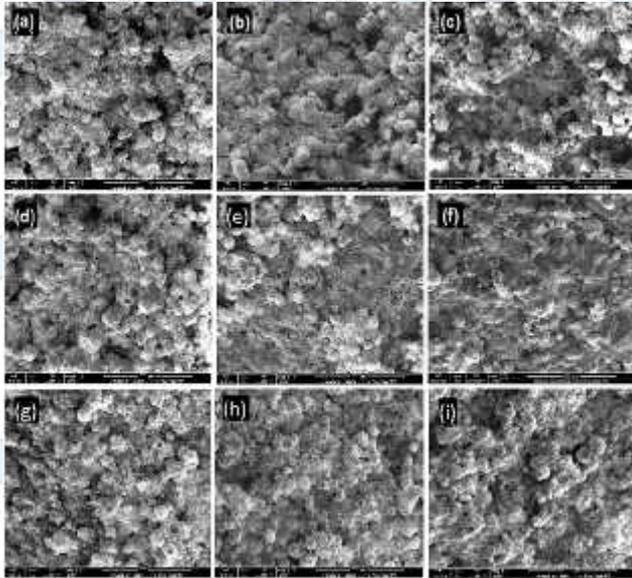
Gambar 2. Hasil pengujian SEM permukaan *coating* pada perbesaran 2000x spesimen 20 g/min-1x

Hasil pengujian SEM pada permukaan sampel setelah proses *flame spray* ditunjukkan pada Gambar 3. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa adanya variasi *Feed rate* (dari atas ke bawah) pada spesimen menunjukkan adanya perbedaan pada morfologi permukaan. Pada spesimen dengan *feed rate* 14 g/min (Gambar 3. a,b,c) terlihat permukaannya cenderung lebih padat sedangkan pada spesimen dengan *feed rate* (Gambar 3. g,h,i) memiliki permukaan yang cenderung berporos dibandingkan dengan spesimen lainnya yang ditunjukkan dari Gambar 4 Grafik hasil perhitungan persentase porositas permukaan *coating*.

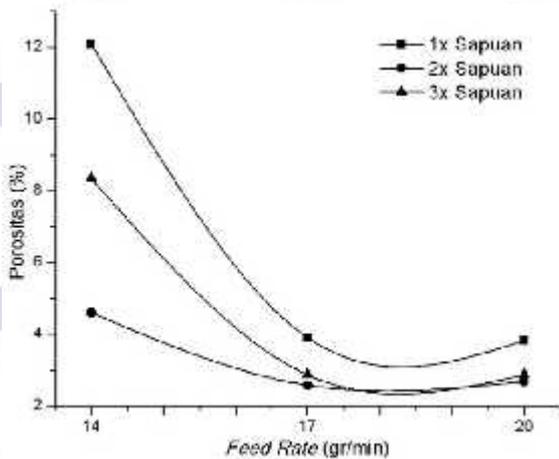
Dari Gambar 4 dapat dilihat bahwa ukuran porositas menurun seiring dengan naiknya *feed rate* sedangkan dengan bertambahnya jumlah sapuan menyebabkan terjadinya penurunan ukuran porositas pada permukaan *coating*. Akan tetapi besar pengurangan porositas akibat penambahan jumlah sapuan tidak terlalu signifikan Hal ini dikarenakan lapisan terluar hasil *coating* adalah lapisan YSZ yang tidak divariasikan pada penelitian ini. Dari Gambar 4 didapatkan kondisi porositas yang paling baik terdapat pada spesimen yang dicoating pada *feed rate* 17 g/min dengan 2x sapuan dengan presentase porositas sebesar 2.58%. Kenaikkan *powder feed rate* akan meningkatkan laju deposisi dari serbuk sehingga serbuk yang akan terdepositasi lebih banyak dan kompak, menyebabkan porositas akan menurun. (Raja sekaran 2011)[7]

Hasil SEM penampang melintang setiap spesimen pada tiap variabel yang digunakan setelah proses *flame spray* ditunjukkan pada Gambar 5, dimana dari gambar penampang terlihat lapisan penyusun dari struktur *coating*.

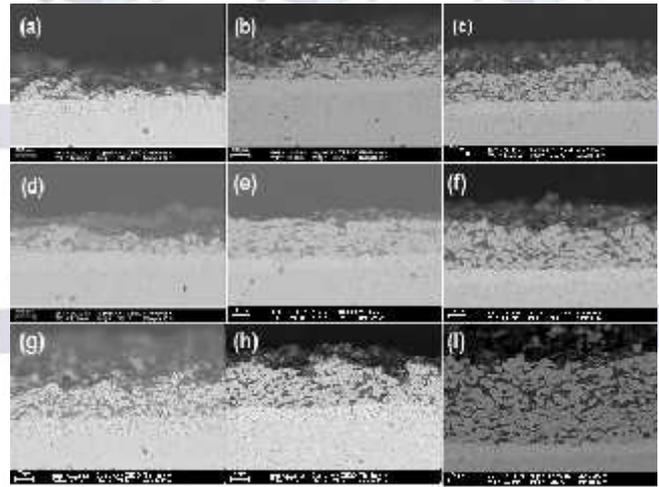
Dapat dilihat bahwa dengan bertambahnya *feed rate* akan menghasilkan tingkat lapisan yang lebih tebal. dengan bertambahnya sapuan juga menghasilkan lapisan coating yang lebih tebal akan tetapi memiliki oksida yang semakin banyak. Dengan banyaknya oksida akan mengurangi sifat adhesi antar lapisan yang menyebabkan lapisan mudah mengalami pengelupasan [6]



Gambar 3 Hasil Pengujian SEM Permukaan *Coating* Pada Perbesaran 250x
 (a) 14 g/min-1x, (b) 14 g/min -2x, (c) 14 g/min 3x
 (d) 17 g/min -1x, (e) 17 g/min-2x, (f) 17 g/min -3x
 (g) 20 g/min -1x, (h) 20 g/min- 2x,(i) 20 g/min- 3x



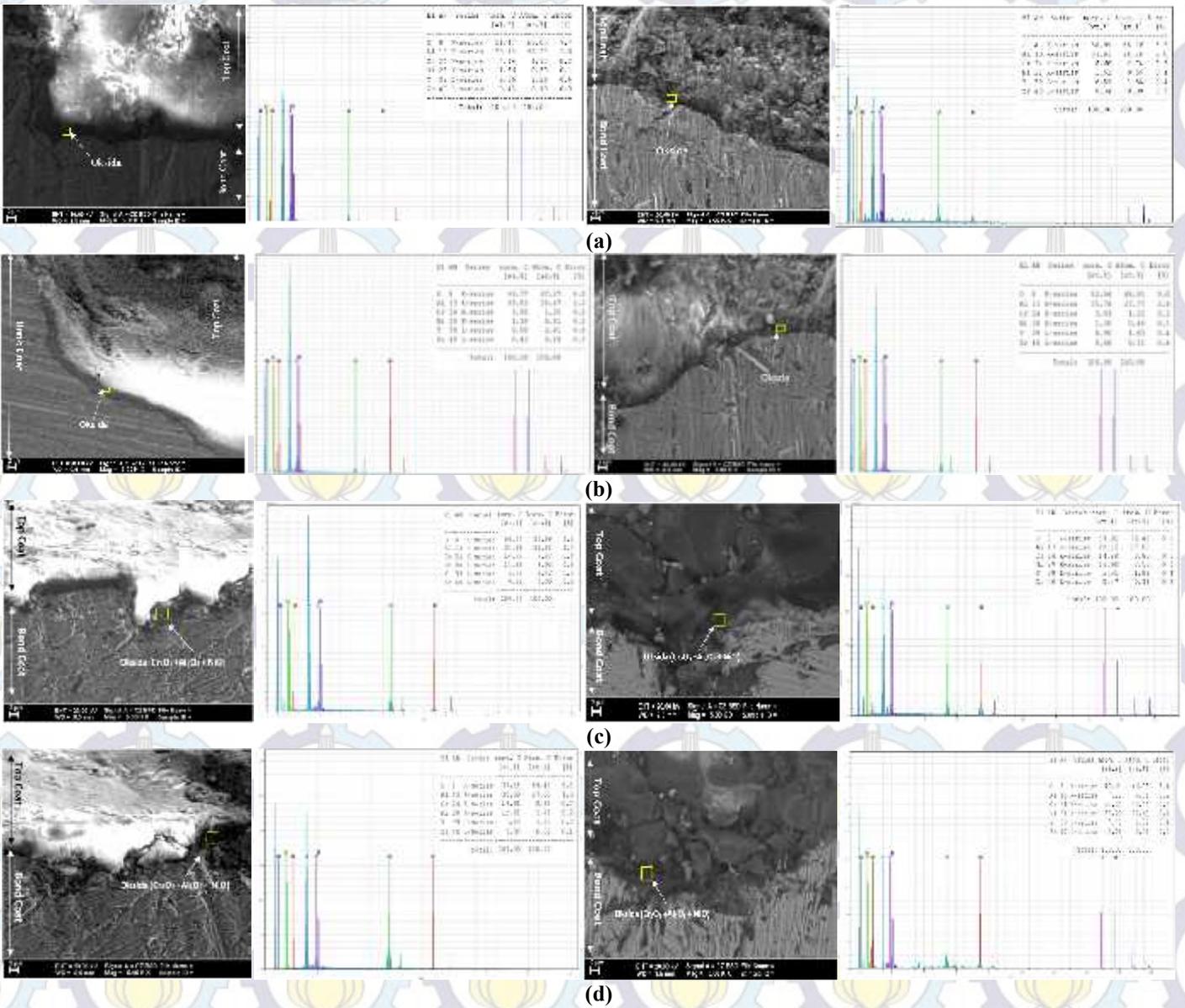
Gambar 4. Grafik Persentase Luasan Porositas Pada Permukaan Hasil *Coating*



Gambar 5 Hasil Pengujian SEM Penampang Pada Perbesaran 250x
 (a) 14 g/min-1x, (b) 14 g/min -2x, (c) 14 g/min 3x
 (d) 17 g/min -1x, (e) 17 g/min-2x, (f) 17 g/min -3x
 (g) 20 g/min -1x, (h) 20 g/min- 2x,(i) 20 g/min- 3x

Pada Gambar 6 (kiri) menunjukkan hasil SEM perbesaran 5000x dan EDX pada daerah antara TC dan BC untuk spesimen dengan *feed rate* 14 g/min-1x, 17 g/min-1x, 20 g/min-1x dan 20 g/min-3x 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 Cr dan Al, hal ini seperti yang dilaporkan oleh Yanjun Li dkk [8] dimana oksida penyusun daerah TGO umumnya terdiri atas beberapa formasi oksida antara lain Al_2O_3 , $(Cr,Al)_2O_3 + (Co,Ni)(Cr,Al)_2O_4 + NiO$ yang selanjutnya disebut formasi CSN dan $(Cr,Al)_2O_3 + (Co,Ni)(Cr,Al)_2O_4$ yang selanjutnya disebut sebagai CS. Tebal daerah TGO pada tiap sampel ini setelah dilakukan pengukuran sekitar 4.20 μm untuk spesimen 14 g/min-1x, 2.62 μm untuk spesimen 17 g/min-1x, dan 4.05 μm untuk spesimen 20 g/min-1x dan 5.72 μm pada spesimen 20 g/min-3x. Jika dibandingkan tiap sampel mengalami perubahan ukuran TGO, dimana TGO menipis seiring dengan turunnya *feed rate spray*. Hal ini membuktikan bahwa dengan naiknya *feed rate* menjadikan lapisan menjadi lebih merata sehingga porositas menurun membuat TGO yang terbentuk semakin tipis karena oksigen semakin susah masuk ke lapisan dibawahnya. Adanya TGO pada sampel sebelum dilakukannya uji termal merupakan hasil dari proses *flame spray*.

Setelah Uji Termal



Gambar 6. Hasil Pengujian SEM-EDX Setelah Proses *flame spray* (kiri) dan setelah Uji Termal dengan Perbesaran 5000x Pada Spesimen (a) 14 g/min-1x, (b) 17 g/min-1x, (c) 20 g/min-1x, (d) 20 g/min-3x

Gambar 6 (kanan) menunjukkan daerah TGO dan hasil EDX dari sampel dengan spesimen dengan *feed rate* 14 g/min-1x, 17 g/min-1x, 20 g/min-1x dan 20 g/min-3x 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 6.01 μm untuk spesimen 14 g/min-1x, 3.29 μm untuk spesimen 17 g/min-1x, 7.87 μm untuk spesimen 20 g/min-1x dan 8.18 μm untuk spesimen 20 g/min-3x, dan lebar *crack* secara berurutan 0 μm , 0 μm , 2.36 μm , dan 2.73 μm . Pada penelitian yang dilakukan oleh Jackson dkk [9], bahwa batas kritis dari lebar TGO sebelum TBC mengalami kegagalan adalah 3 – 10 μm . Adanya retak mikro pada sampel ini menunjukkan bahwa sampel mengalami pertumbuhan oksida pada saat pengujian termal sampai

1000°C. Ini juga dapat dilihat dari hasil EDX pada TGO dimana nilai O naik dari yang sebelumnya.

Dari Tabel 2 dapat dilihat bahwa pada *feed rate* spray 17 g/min-1x tidak terjadi pertambahan TGO sebesar spesimen lainnya. Ini disebabkan karena porositas yang rendah akibat partikel yang terdeposisi merata dan adanya deformasi partikel yang optimal (ASM Handbook of Coating, 2004).

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

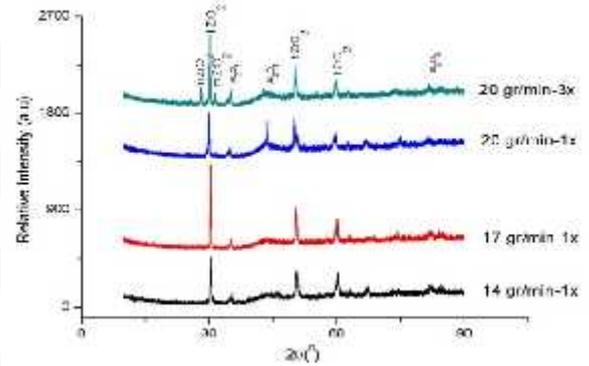
Spesimen	Sebelum Uji Termal		Setelah Uji Termal	
	TGO (μm)	Crack (μm)	TGO (μm)	Crack (μm)
14 g/min-1x	4.20	-	6.01	-
17 g/min-1x	2.62	-	3.29	-
20 g/min-1x	4.05	-	7.87	2.36
20 g/min-3x	5.72	-	8.18	2.73

B. Analisa Uji X-Ray Diffraction (XRD)

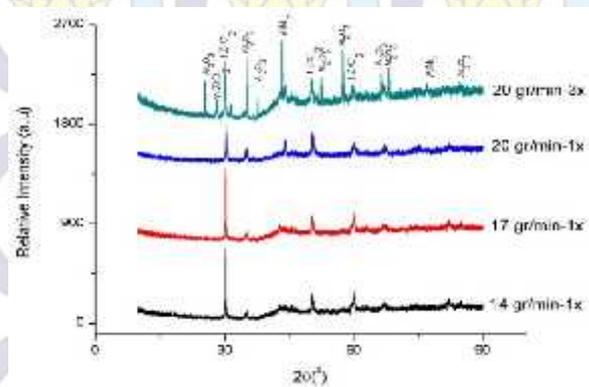
Dari Gambar 7 diketahui bahwa pada spesimen yang dicoating pada *feed rate* 14 g/min-1x teridentifikasi *peak* tertinggi pada $2\theta = 30.19^\circ$, yang merupakan fasa t-ZrO₂ (zirkonia tetragonal) (*ref code* 01-075-9646) dengan bidang kristal (101), puncak $2\theta = 50.14^\circ$ (112), 59.92° (211) berturut-turut juga merupakan *peak* milik fasa t-ZrO₂. Pada pengujian ini juga terdeteksi Al₂O₃ (01-073-5928), dengan munculnya puncak-puncak 35.14° yang teridentifikasi pada bidang (104), 43.44° (113) dan puncak-puncak kecil lainnya. Sedangkan spesimen yang dicoating pada *feed rate* 20 g/min-3x menunjukkan adanya fasa m-ZrO₂ pada *peak* 28.14° (-111) dan 31.45° (111). Dari data ini didapatkan bahwa fase yang terbentuk sesuai dengan kebutuhan *coating* yaitu fase t-ZrO₂. Akan tetapi fase yang terbentuk bukan hanya t-ZrO₂ juga terbentuk fase lainnya seperti m-ZrO₂. Beragamnya *peak* yang terdeteksi menunjukkan beberapa hal yaitu polimorfisme terjadi pada YS (DoITPoMS Cambridge, 2006). Adanya polimorfi ini dapat mengganggu fungsi TBC karena jika terjadi perubahan fase maka menyebabkan perubahan volume yang dapat menimbulkan internal stress. Internal stress merupakan asal mula penyebab retak. *Peak* lain yang terdeteksi adalah Al₂O₃. Hal ini dapat disebabkan karena adanya porositas pada top coat sehingga Al₂O₃ yang ada pada lapisan komposit YSZ-Al₂O₃ menjadi terdeteksi. Anggapan adanya porositas menjadi semakin kuat karena ditemukannya fasa α -Al₂O₃ yang tinggi pada spesimen 20 g/min-1x pada sudut 44.719° , bila dilakukan analisa ini bukan merupakan Al₂O₃ yang sama dengan yang ditemui sebelumnya, ini juga didukung dengan kartu PDF yang berbeda 01-088-0826, sehingga dimungkinkan ini merupakan Al₂O₃ hasil oksidasi dari Al pada *bondcoat* dan teridentifikasi pada saat XRD karena permukaan yang terkelupas menunjukkan nilai TGO yang tinggi pada spesimen ini.

Dari Gambar 8 Didapatkan *peak* t-ZrO₂ masih tetap terbentuk dan juga terbentuk *peak-peak* baru yang terdeteksi sebagai AlNi₃ (01-071-5884) dan α -Al₂O₃ (01-088-0826) yang merupakan hasil oksidasi yang terjadi pada *bondcoat*. Banyaknya fasa Al₂O₃ yang terbentuk setelah uji termal dijelaskan juga oleh Saremi (2007) yang mengatakan bahwa setelah oksidasi pada temperatur 1100°C akan menghasilkan konsentrasi oksigen dan aluminium yang meningkat pada interface *bondcoat* dan *top coat*, hal ini dikarenakan sifat termodinamik yang rendah dari O dan Al sehingga mempermudah terjadinya reaksi pembentukan Al₂O₃.

Dari semua spesimen, spesimen yang dicoating pada *feed rate* 20g/min dengan 3X sapuan memiliki puncak Al₂O₃ paling tinggi, selain itu pada spesimen ini terdeteksi juga *peak* AlNi₃ pada $2\theta = 43.95^\circ$.



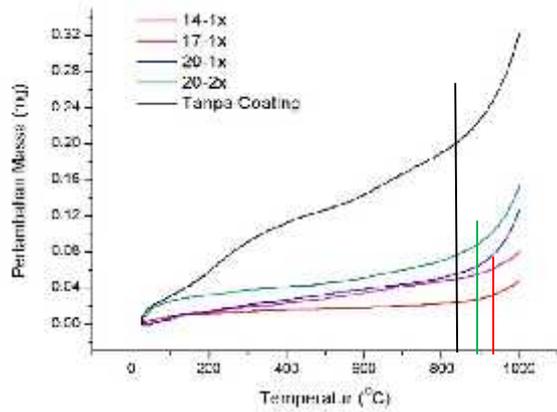
Gambar 7 Hasil Pengujian Xrd Pada Permukaan Atas Sebelum Uji Termal Pada Setiap Spesimen Yang Dicoating Dengan *Feed Rate* Tertentu



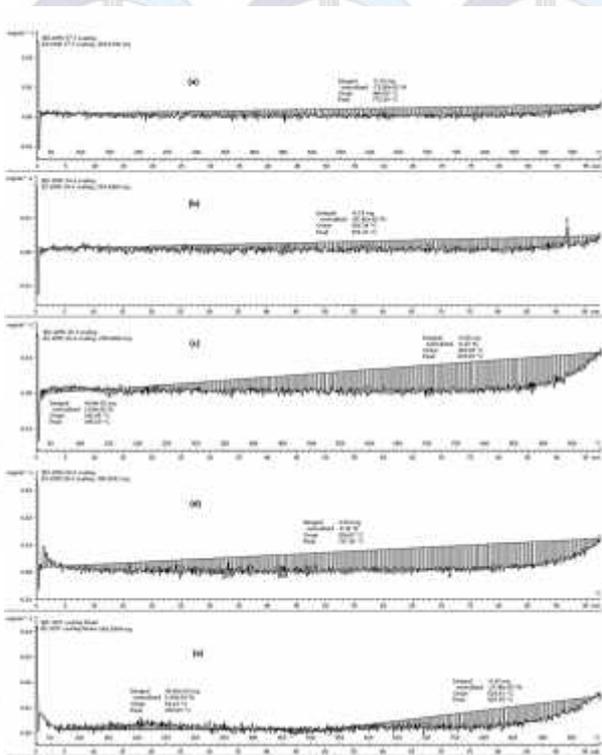
Gambar 8 Hasil Pengujian Xrd Pada Permukaan Atas Sebelum Uji Termal Pada Setiap Spesimen Yang Dicoating Dengan *Feed Rate* Tertentu

C. Analisa Pengujian Thermal TGA dan Thermal Torch Thermal TGA

Gambar 9 dan 10 merupakan hasil dari pengujian TGA non-isothermal hingga temperatur 1000°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 900°C , dimana menunjukkan bahwa oksida-oksida mulai mengalami pembentukan dengan kata lain pertumbuhan pada daerah TGO. Dari analisa *1st Derivative* untuk analisa stabilitas termal dari *coating*. Seperti yang ditunjukkan pada grafik sebelumnya umumnya sampel mempunyai stabilitas yang buruk pada temperatur diatas 900°C , tapi bila menggunakan analisa *1st 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 reaksi yang terjadi. Semakin halus garis yang terbentuk maka stabilitas semakin baik. Dari analisa *1st Derivative* didapatkan sampel yang paling stabil adalah sampel dengan *feed rate* 17 g/min -1x sapuan.



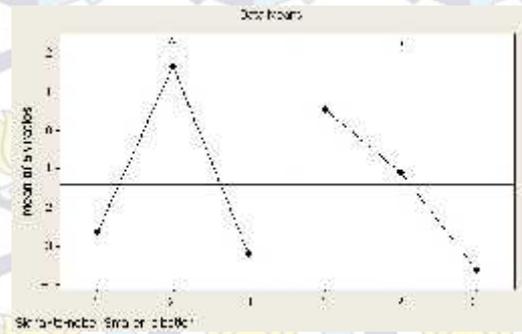
Gambar 9. Grafik %m-T (Penambahan massa-Temperatur)



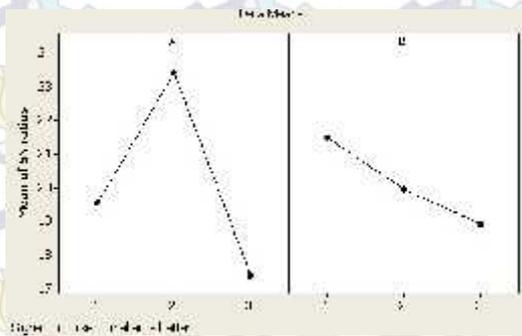
Gambar 10. Grafik Analisa 1st derivative TGA pada tiap sampel

Thermal Torch

Untuk mengetahui tingkat kerusakan dan kondisi dari sampel setelah diuji termal las, maka dilakukan pengujian kerusakan dengan pendekatan massa dan volum. Spesimen dengan massa yang paling banyak berkurang dan spesimen yang paling banyak terisi aquades merupakan spesimen yang paling rusak. Untuk mempermudah menentukan sampel mana yang paling baik dan paling rusak serta variabel mana yang paling berpengaruh maka digunakan alat bantu berupa analisa statistik metode Taguchi dengan menentukan S/N ratio.



Gambar 11 Grafik Hubungan antara ketahanan termal dengan *feed rate* dan Sapuan berdasarkan pendekatan massa menggunakan software minitab



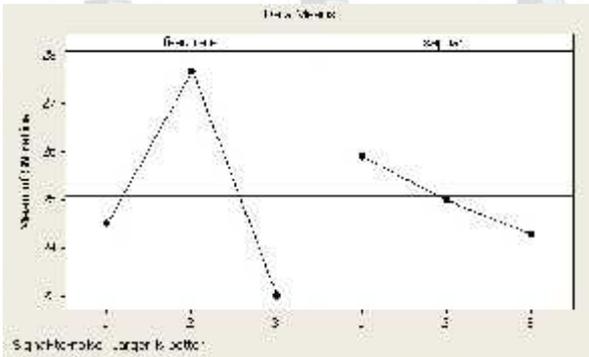
Gambar 12 Grafik Hubungan antara ketahanan termal dengan *feed rate* dan Sapuan berdasarkan pendekatan massa menggunakan software minitab

Dari Gambar 11-12 diperoleh bahwa sampel yang memiliki ketahanan fisik yang bagus terhadap penetrasi api asetilin adalah 17 g/min-1x dimana sampel hanya mengalami pengurangan ketebalan lapisan yang sedikit. Bila dihubungkan dengan hasil SEM dan pengujian TGA maka ini akan menjelaskan kenapa sampel 17 g/min-1x 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.

D. Analisa Pengujian Pull Off

Pada pengujian *pull off* didapatkan tren nilai kekuatan lekat naik dengan naiknya *feed rate* dan optimum pada *feed rate* 17 g/min. Rajasekaran (2011) menjelaskan oksidasi akan menurun dengan naiknya *feed rate* dari serbuk, hal ini diperkirakan bahwa *feed rate* yang besar pada proses spraying mengurangi specific heat yang diterima dari setiap partikel serbuk. sehingga kemungkinan terbentuknya oksida kecil. Dengan menurunnya oksida kekuatan lekat akan lebih baik. Kekuatan lekat turun pada 20 g/min, menurut Vardelle (1992) mengatakan bahwa dengan naiknya *powder feed rate* maka kecepatan partikel serbuk menurun. Impact yang terjadi pada partikel serbuk menurun, ikatan menurun, kekuatan lekat nya juga menurun.[10] Pengaruh parameter sapuan terhadap kekuatan lekat tren menunjukkan bahwa Kekuatan lekat menurun dengan meningkatnya sapuan yang diberikan. nilai kekuatan lekat baik pada 1x sapuan. *ASM*

Handbook of Thermal Spray (2004) dijelaskan bahwa sebagian besar kegagalan terjadi pada interface coating hal ini dikarenakan adanya diskontinyu terbesar pada sistem material. terlihat juga pada gambar SEM bahwa meningkatnya sapuan oksidasi yang terjadi semakin banyak. oksida oksida ini menurunkan kekuatan lekat *coating*.



Gambar 13 Grafik Hubungan antara Kelekat dengan jarak spray dan jumlah sapuan menggunakan software minitab

Pada spesimen yang dicoating pada *feed rate* 14 g/min menghasilkan nilai kekuatan lekat yang lebih rendah dibandingkan dengan *feed rate* 17 g/min. Hal ini dikarenakan *feed rate* semakin sedikit dengan sumber gas pembawa serbuk yang sama akan mengakibatkan serbuk memiliki kecepatan yang lebih tinggi sehingga menabrak substrat dengan impact yang tinggi memungkinkan terjadinya stress. Dan juga ketika menumbuk substrat dengan kecepatan lebih tinggi mengakibatkan temperatur tumbukan yang lebih tinggi pula. Menurut Okazaki dkk (2012) menjelaskan bahwa *thermal stress* merupakan variabel utama yang mempengaruhi kekuatan lekat spesimen. Tegangan ini bisa didapatkan ketika selesai dilakukan *flame spray* karena spesimen mendapat pengaruh panas pada saat proses *spraying*.

Untuk variabel sapuan, dari didapatkan bahwa tren nilai kekuatan lekat paling tinggi jika dilakukan *pass* 1x dan nilai kekuatan lekat yang paling rendah pada variasi sapuan 3x. Berdasarkan *ASM Handbook of Thermal Spray* (2004) menjelaskan bahwa sebagian besar kegagalan terjadi pada interface *coating*. Hal ini dikarenakan adanya diskontinyu terbesar pada sistem material. Adanya *diskontinyu* dapat disebabkan karena makin banyak lapisan yang terbentuk maka mikrostruktur yang terbentuk akan semakin beragam, mikrostruktur disini dapat berupa oksida dan porositas yang dapat dilihat dari gambar penampang melintang pada Gambar 5. Hal ini dibahas oleh Rajasekaran (2011) yang membahas bahwa dengan menjadikan lapisan menjadi *single layer* menjadikan berkurangnya kompleksitas mikrostruktur dan cacat antar layer.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa:

1. *Feed rate* komposit YSZ-Al₂O₃ berpengaruh terhadap sifat kelekatan dan ketahanan termal dari YSZ/YSZ-Al₂O₃ *double layer* TBC. Semakin tinggi *feed rate* berpengaruh pada kekuatan lekat dan ketahanan termal semakin baik dan optimum pada *feed rate* 17 g/min. Hal ini dikarenakan dengan naiknya *feed rate* serbuk yang terdepositasi semakin banyak yang menghasilkan persebaran serbuk yang merata dan tebal yang optimum.
2. Jumlah sapuan komposit YSZ-Al₂O₃ memberikan pengaruh terhadap sifat kelekatan dan ketahanan termal dari YSZ/ YSZ-Al₂O₃ *double layer* TBC. Semakin banyak jumlah sapuan, kekuatan lekat dan ketahanan termal semakin turun. Hal ini dikarenakan kompleksitas mikrostruktur yang tinggi pada lapisan *multi-pass* yang dihasilkan.
3. Pengaruh dari *feed rate* dan jumlah sapuan pada lapisan komposit YSZ-Al₂O₃ terhadap struktur mikro yang dihasilkan sebelum dan setelah pengujian termal adalah perubahan TGO. Semakin tinggi *feed rate* dan semakin sedikit jumlah sapuan komposit YSZ-Al₂O₃ maka tebal TGO yang dihasilkan semakin tipis dan optimum pada 17 g/min-1x. Hal ini dikarenakan porositas yang menjadi lebih rendah dengan berkurangnya jarak spray dan kompleksitas mikrostruktur yang rendah pada *single-pass coating*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sulistijono dan Lukman Noerochiem. 2007. Reayasa Smart Material untuk Perintang Panas Pada Komponen Turbin Gas Modern. Laporan Penelitian LPPM ITS
- [2] 2012. **Lapan Masih Kembangkan Roket RX 550.** [URL:http://militer-review.web.id](http://militer-review.web.id)
- [3] Parindra. 2014. Pengaruh Variasi Komposisi Komposit YSZ-Al₂O₃ Dan Feed Rate Terhadap Kekuatan Lekat Dan Ketahanan Termal YSZ/YSZ- Al₂O₃ Double Layer Pada Aplikasi Nosel Roket. ITS: Surabaya
- [4] 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
- [5] Yunqi Yao.2013. "Influence of Al₂O₃/YSZ micro-laminated coatings on high temperature oxidation and spallation resistance of MCrAlY alloys"
- [6] _____. 2004. **ASM Handbook of Thermal Spray.** ASM Internasional
- [7] 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. DOI: 10.1007/s11666-011-9668-3.
- [8] 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.
- [9] Jackson, R.D., M.P. Taylor, H.E. Evans, X.H. Li. 2011. Oxidation Study of An EBPVD MCrAlY Thermal Barrier Coating System. **Oxidation of Metals** 76.
- [10] Baudry, C., Vardelle, A., Mariaux, G., Delalondre, C. and Meillot, E. (1992). Threedimensional and time-dependent model of the dynamic behavior of the arc in plasma spray torch, in Proceedings of the International Thermal Spray Conference '04, CD-Rom, ISBN 3-87155-792-7, DVS-Verlag, Düsseldorf, Germany.