

# Pengaruh Fraksi $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{Y}_2\text{O}_3$ / $\text{SiO}_2$ dan Feed Rate Serbuk Terhadap Kekuatan Lekat dan Ketahanan Termal Lapisan pada Substrat Hastelloy dengan Metode Flame Spray untuk Aplikasi Nosel Roket

Abd. Gafur 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**—Nosel roket merupakan bagian roket yang mengatur laju, masa, arah dan tekanan fluida yang keluar dari ruang bakar. Nosel harus dapat menahan energi kinetik dan panas dari fluida yang berasal dari ruang bakar. Material yang digunakan pada penelitian ini adalah serbuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{Y}_2\text{O}_3$ / $\text{SiO}_2$  yang memiliki nilai konduktifitas panas rendah. Material tersebut dilapiskan kepada substrat hastelloy® x menggunakan metode flame spray dengan memvariasikan *feed rate* 6, 12 dan 18 gram/menit. Dengan memvariasikan jumlah komposisi ittria 3, 5 dan 7 % pada  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{Y}_2\text{O}_3$ / $\text{SiO}_2$ . Lalu dilakukan torch termal pada temperatur 1400 °C dengan waktu maksimal 30 detik agar dapat dilihat ketahanan termal. Dilakukan pengujian termo gravimetrik (TGA) untuk mengalisa kestabilan material pelapis setelah pemanasan dan dilakukan termal ekspos untuk mengetahui perubahan struktur mikro pada lapisan setelah diberi pembebanan termal secara kontinyu. Untuk menunjang penelitian ini dilakukan beberapa pengujian yang meliputi pengujian SEM, pengujian XRD, dan pengujian Pull off. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada semua spesimen yang paling stabil pada temperatur tinggi terjadi pada komposisi 80% $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 13% $\text{SiO}_2$ , 7% $\text{Y}_2\text{O}_3$  dan feed rate 18 gram/menit. Nilai kekuatan lekat yang paling optimal adalah 8 MPa didapatkan pada komposisi 80% $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 13% $\text{SiO}_2$ , 7% $\text{Y}_2\text{O}_3$  dan feed rate 6 gram/menit. Fasa yang stabil pada saat sebelum dan setelah pemanasan adalah kyanite dan  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

**Kata Kunci**—flame spray, hastelloy® x, kyanite, nosel,  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$

## I. PENDAHULUAN

Perkembangan pesat di bidang pertahanan dan keamanan membutuhkan perhatian dari berbagai disiplin ilmu. Termasuk pemilihan material yang tepat dan rekayasa material tersebut sebagai penyokong. Roket merupakan salah satu alat yang digunakan dalam bidang pertahanan dan keamanan. Penelitian tentang roket dilakukan oleh Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) untuk mendapat kinerja roket yang efisien. Roket terdiri dari beberapa bagian yaitu nose cone, tabung dan nose yang memiliki dua puluh tiga persen berat bahan bakar, tiga puluh tiga persen berat struktur dan empat puluh empat persen berat muatan LAPAN, 2004 [1] sedangkan menurut M.Rycroft, 1990[2] sembilan puluh satu persen berat bahan bakar, tiga persen berat struktur dan enam persen berat muatan.

Hastelloy merupakan paduan nikel, kromium, besi, molibdenum. Menurut penelitian yang dilakukan oleh J. A. Haynes, 2001 [3], material ini memiliki ketahanan oksidasi,

kemampuan fabrikasi, konduktifitas termal tinggi dan ketahanan terhadap korosi.

Keramik merupakan material yang stabil pada temperatur tinggi. Salah satu jenis keramik yang biasa digunakan sebagai material thermal barrier coating (TBC) adalah  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{Y}_2\text{O}_3$ / $\text{SiO}_2$  [5]. Dimana  $\text{Al}_2\text{O}_3$  stabil pada temperatur tinggi memiliki konduktifitas termal rendah dan koefisien termal rendah dan memiliki kekerasan yang tinggi sedangkan  $\text{Y}_2\text{O}_3$  memiliki kekerasan yang tinggi, ketangguhan yang memadai serta konduktifitas termal rendah [4].

Pada penelitian kali ini akan dilakukan penggantian substrat S45C dengan Hastelloy® X yang dilapisi dengan keramik  $\text{Al}_2\text{O}_3$  atau  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{Y}_2\text{O}_3$ / $\text{SiO}_2$  sehingga didapat pelapisan yang memiliki kekuatan lekat memadai dan stabil pada temperatur tinggi[5].

## II. URAIAN PENELITIAN

### A. Preparasi Bahan

Proses flame spray dimulai dengan preparasi serbuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{Y}_2\text{O}_3$ . Agar didapat ukuran dibawah 100  $\mu\text{m}$  dilakukan proses *milling* dan *shieving*. Kemudian dilakukan pencampuran 80% $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 17% $\text{SiO}_2$  dan 3%  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , 80% $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 15% $\text{SiO}_2$ , 5%  $\text{Y}_2\text{O}_3$  dan 80% $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 13% $\text{SiO}_2$ , 7%  $\text{Y}_2\text{O}_3$  dengan menggunakan mesin *planetary ball mill* pada kecepatan 350rpm selama 1 jam. Pada substrat Hastelloy® X dilakukan pemotongan menjadi bentuk plat dengan dimensi 6x6x6 mm untuk pengujian SEM, TGA, dan XRD dan pemotongan dengan diameter 25,4 mm untuk pengujian Pull of Test dan Torch Termal [5].

### B. Proses Percobaan

Setelah dilakukan pemotongan semua spesimen digrit *blasting* untuk membentuk kontur kekasaran pada permukaan substrat kemudian dilakukan pelapisan *bondcoat* NiCrAlY untuk meningkatkan kekuatan lekatan lapisan[6]. Proses *flame spray* dilakukan pada substrat yang telah dilapisi *bondcoat* dan serbuk topcoat dengan fraksi 80% $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 17% $\text{SiO}_2$  dan 3%  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , 80% $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 15% $\text{SiO}_2$ , 5%  $\text{Y}_2\text{O}_3$  dan 80% $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 13% $\text{SiO}_2$ , pada tekanan oxygen 30  $\text{kg}/\text{cm}^2$  dan tekanan acetylene 35  $\text{kg}/\text{cm}^2$  dengan feed rate 6, 12 dan 18 gram/menit.

### C. Pengujian Sampel

Setelah dilakukan pelapisan pada spesimen dilakukan pengujian termal torch pada temperatur 1400°C dengan

waktu maksimal 30 detik agar dapat dilakukan perbandingan fraksi 80%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 17%SiO<sub>2</sub> dan 3%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 80%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 15%SiO<sub>2</sub>, 5%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan 80%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 13%SiO<sub>2</sub>, 7%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> serta variasi feed rate 6, 12 dan 18 gram/menit terhadap ketahanan termal. Dilakukan pengujian termal ekspos untuk mengetahui struktur mikro, perubahan fase dan pertumbuhan oksida pada lapisan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> setelah pembebanan termal secara kontinu. Pengujian dilakukan dengan menggunakan *Vertical Furnace* dengan temperatur 1100° C dan *holding time* 5 jam kemudian didinginkan secara perlahan menuju temperatur kamar. Kecepatan naiknya temperatur yang digunakan sebesar 100° C/min[5].

Setelah termal ekspos dikarakterisasi dengan SEM untuk mengetahui morfologi dan XRD untuk perubahan fasa sebelum dan sesudah termal. Dilakukan pengujian *Thermo Gravimetric Analysis (TGA)* bertujuan untuk mengetahui perubahan massa dan kesetabilan temperatur pada lapisan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> setelah termal. Dilakukan Pengujian Termal Torch bertujuan untuk melihat ketahanan lapisan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> terhadap beban termal torch. Pengujian menggunakan *oxy acetylene* (las karbit) dengan temperatur mencapai 1400° C dengan waktu maksimal 30 detik pada proses pemanasan terpusat pada satu titik dan dikarakterisasi secara visual. Pengujian *Pull Off* dilakukan untuk mengukur kekuatan lekatan antara pelapis dan substrat pada setiap fraksi Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> dan variasi feed rate.

### III. HASIL DAN DISKUSI

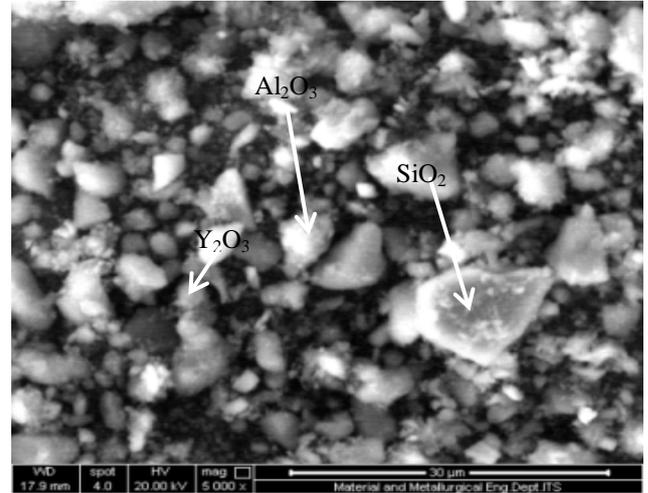
#### A. Karakteristik Serbuk Pelapis Setelah Mixing

Morfologi dari permukaan serbuk Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan SiO<sub>2</sub> setelah dilakukan proses *mixing* tampak pada Gambar 1. Pada hasil uji SEM tersebut terlihat partikel dengan ukuran butir yang paling besar terukur sebesar 92-149µm berbentuk *polygonal* merupakan partikel Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan partikel yang memiliki ukuran butir lebih kecil terukur sebesar 31-78µm berbentuk agregat adalah SiO<sub>2</sub> dan ukuran butir yang paling kecil terukur sebesar 5-18µm berbentuk angular adalah Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Gambar 2 menunjukkan unsur setelah EDAX yaitu unsur O, Al, Si, dan Y yang menandakan bahwa setelah mixing terdapat campuran senyawa Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> dan Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

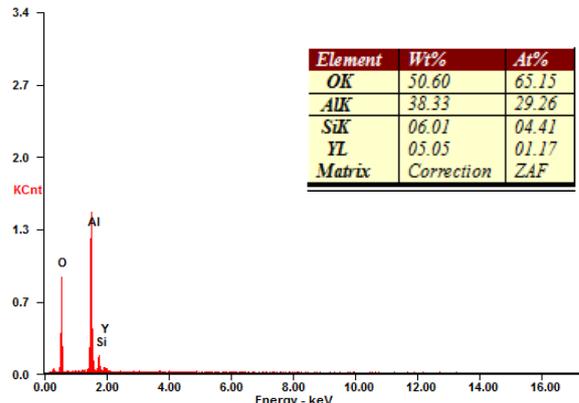
Untuk mendukung data SEM dilakukan pengujian XRD seperti Gambar 3. Pada analisa XRD menggunakan *software Match* serta identifikasi manual dengan kartu PDF dari *software PCPDF* teridentifikasi back ground yang menunjukkan fasa  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dengan bentuk kristal kubik dengan bidang (2 0 0) pada 2theta 45,912 dan bidang (2 2 0) pada 2theta 66,953. Pada 2theta 29,173 teridentifikasi fasa Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dengan bentuk kristal kubik dengan bidang (2 2 2), pada 2theta 48,494 dengan bidang (4 4 0) dan pada 2theta 33,763 dengan bidang (4 0 0). Intensitas itria paling tinggi terjadi pada komposisi 7% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Fasa SiO<sub>2</sub> teridentifikasi pada 2theta 26,600 sesuai dengan struktur kristal heksagonal pada bidang (1 1 0), pada 2theta 20,818 terbentuk bidang (1 1 0). Pada serbuk teridentifikasi fasa  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, dan SiO<sub>2</sub>.

#### B. Mikrostruktur Permukaan Top Setelah Proses Flame Spray

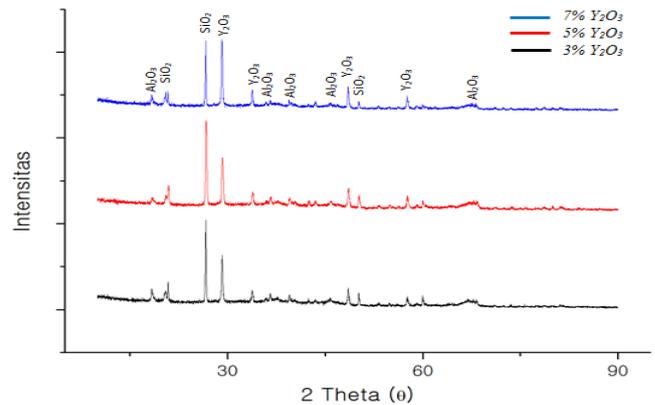
Morfologi dari lapisan ini tidak merata dan terdapat porositas terlihat seperti Gambar 4. Pada serbuk Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> saat proses *flame spray* mengalami pemanasan pada temperatur 3800°C. Namun karena proses yang



Gambar 1. Hasil SEM serbuk pelapis setelah dicampur.



Gambar 2. Hasil analisa EDAX serbuk pelapis setelah dicampur

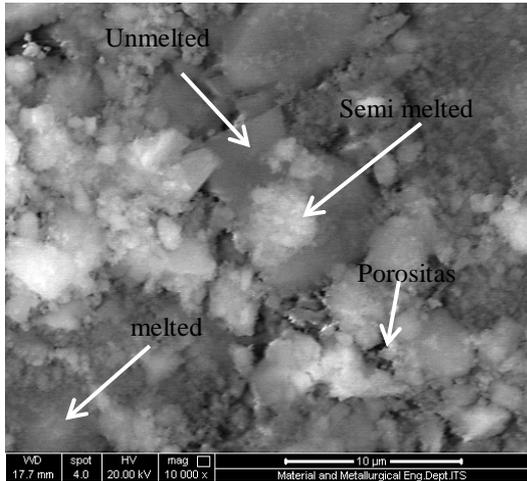


Gambar 3. Grafik hasil pengujian XRD setelah mixing

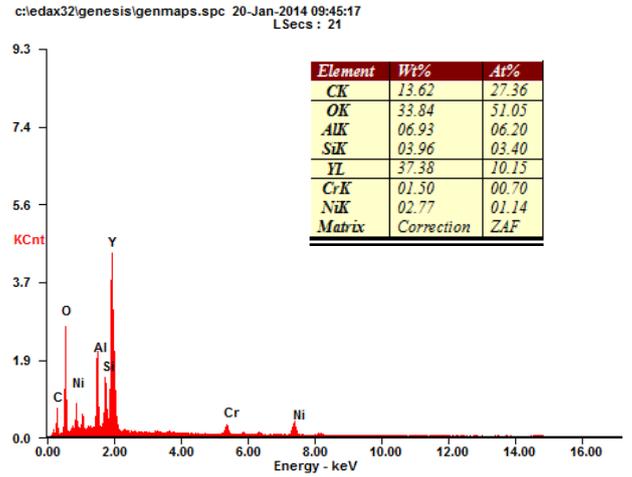
terjadi terlalu cepat menyebabkan serbuk berada pada keadaan *meltd*, *semimeltd* dan *unmeltd*. Partikel serbuk yang berada pada keadaan *meltd* dan *semimeltd* mengalami penyatuan dengan partikel lain. Sesuai penelitian yang dilakukan oleh W.R Chen, 2004 [4], dimana dalam penelitiannya dijelaskan bahwa didaerah *interface* antara *top coat* dan *bond coat* akan timbul porositas sebagai hasil dari proses penyemprotan dan termal.

#### C. Mikrostruktur Penampang antara Topcoat dan Bondcoat setelah Flame Spray dan Termal Ekspos

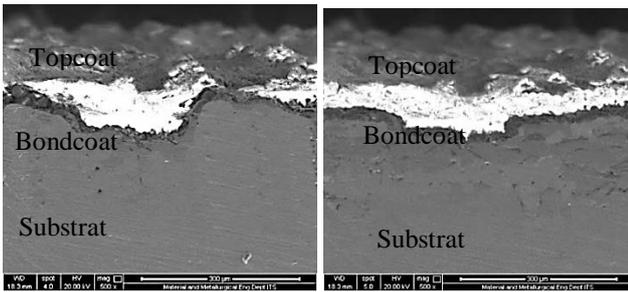
Pada penelitian ini diamati struktur mikro antara bondcoat dan topcoat setelah flame spray dan termal ekspos dengan menggunakan SEM terlihat seperti Gambar 5a dan b. Pertumbuhan oksida setelah termal ekspos ditandai dengan tingginya unsur Al antara topcoat dan bondcoat. Pada



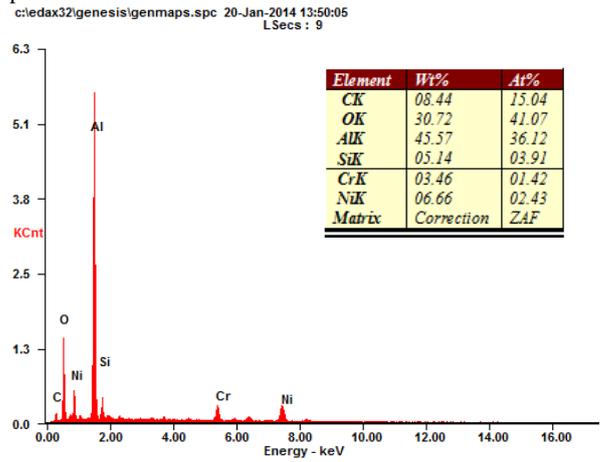
Gambar 4. Hasil Pengujian SEM permukaan lapisan setelah proses flame spray



Gambar 7. Hasil pengujian EDAX penampang sebelum termal ekspos



Gambar 5. Hasil pengujian SEM Penampang (a) sebelum termal ekspos (b) setelah termal ekspos



Gambar 8. Hasil pengujian EDAX penampang setelah termal ekspos



Gambar 6. Hasil pengujian SEM Penampang antara bondcoat dan topcoat

Gambar 6 hasil uji SEM antara boncoat dan opcoat sesudah termal ekspos terdapat unsur Al,Cr,Ni, dan O setelah EDAX. Unsur Al semakin tinggi nilainya dari 19,93% menjadi 45,57% tampak seperti Gambar 7.

Hal ini menunjukkan bahwa setelah termal ekspos terjadi pertumbuhan oksida antara topcoat dan bondcoat. Sehingga pada lapisan bondcoat terbentuk lapisan pasif  $Al_2O_3$  yang menghambat terbentuknya oksida lanjutan pada substrat terlihat hasil EDAX seperti Gambar 7 dan 8. Lapisan pasif  $Al_2O_3$  meningkatkan adhesif strength antara bondcoat dan topcoat sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Yanjun Li,2012 [6,7]. menyatakan bahwa oksida pada lapisan topcoat setelah perlakuan termal akan terdifusi ke bondcoat membentuk lapisan pasif antara bondcoat dan topcoat.

Sedangkan komposisi 80%  $Al_2O_3$ , 13%  $SiO_2$ , 7%  $Y_2O_3$  terdapat unsur Al dan Y yang sangat tinggi antara topcoat dan bondcoat setelah uji EDAX. Hal ini menunjukkan bahwa setelah termal spray akan terbentuk lapisan tipis yttrium aluminium okside (YAG)  $Y_3Al_5O_{12}$  antara topcoat dan bondcoat hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Y. J. Su,2004 [7] lapisan menghambat terjadinya difusi oksida lebih lanjut dan meningkatkan ikatan antara boncoat dan topcoat. Lapisan oksida yang tidak diinginkan yang berbentuk oksida klaster yaitu campuran oksida ( $Al_2O_3 + Cr_2O_3 + NiO$ ) karena oksida klaster ini mendorong terjadinya microcrack sehingga menyebabkan spesimen ini mudah rusak apabila dibebani termal [9].

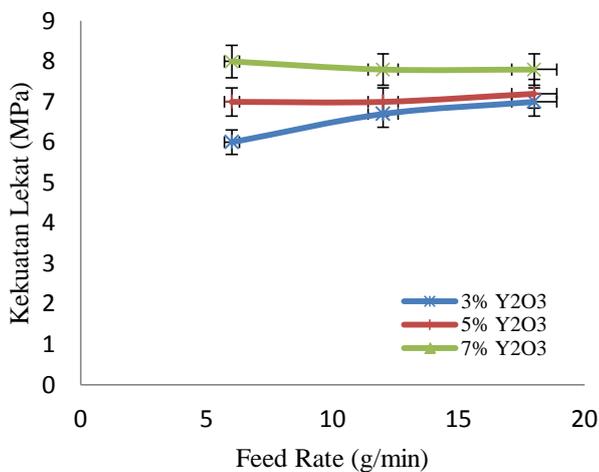
**D. Pengaruh Fraksi  $Al_2O_3$ - $Y_2O_3$ / $SiO_2$  Terhadap Ketahanan Termal**

Pada hasil uji TGA (termo gravimetric analysis) pada spesimen Hastelloy<sup>(R)</sup>X tanpa bondcoat dan topcoat terjadi ketidak stabilan mulai pada temperatur 850°C. Ketidak stabilan ini terjadi karena pertambahan massa, pertambahan massa ini disebabkan Hastelloy<sup>(R)</sup>X sudah teroksidasi secara besar-besaran terlihat seperti pada Gambar 9. Setelah Hastelloy<sup>(R)</sup>X dilapisi dengan bondcoat dan topcoat terjadi ketidak stabilan mulai pada temperatur 1000°C karena topcoat mulai teroksidasi secara besar-besaran sehingga menyebabkan pertambahan massa yang signifikan pada kurva. Pada semua fraksi  $Al_2O_3$ - $Y_2O_3$ / $SiO_2$  terjadi perubahan massa secara signifikan mulai pada temperatur 1000°C.



Tabel 1.  
Hasil pengujian pull off setelah flame spray

Komposisi % $Y_2O_3/SiO_2$ $Al_2O_3$		Feed Rate (g/min)	Hasil Pengujian <i>Pull Off</i> <i>Test Type II</i> (Mpa)
$Y_2O_3$ (%)	$SiO_2$ (%)		
3	17	6	6
		12	6,7
		18	7
5	15	6	7
		12	7
		18	7,2
7	13	6	8
		12	7,8
		18	7,8



Gambar 13. Grafik hasil uji pull off

0). Pada 2theta 29,173 teridentifikasi fasa  $Y_2O_3$  dengan struktur kubik bidang (2 2 2). Pada 2theta 26,594 teridentifikasi fasa  $SiO_2$  struktur kristal heksagonal pada bidang (1 0 1). Semua spesimen terbentuk fasa  $Y_4Al_2O_9$  pada 2theta 29,600 dengan struktur kristal monoklinik. Fasa ini stabil pada temperatur tinggi dan mulai terbentuk diatas temperatur 1000 °C dengan holding time 5 jam Rayisa Voytovych, 2003 [5].

Pengujian dilakukan dengan menempelkan pin pada permukaan *top coat* dengan perekat epoxy. Kemudian dilakukan penarikan dengan alat uji hingga pin terlepas dari spesimen. Angka terukur pada alat uji menunjukkan kekuatan lekat antara substrat dan coating seperti pada Tabel 1.

F. Hasil Pengujian Kekuatan Lekatan Setelah Proses Flame Spray

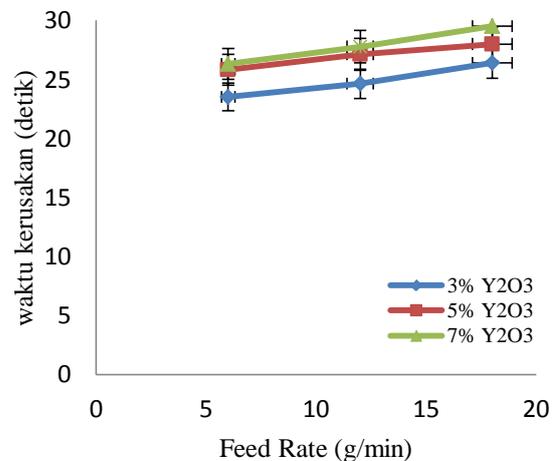
Berdasarkan hasil uji pull off test pada Gambar 13 didapatkan hasil kekuatan maksimal terjadi pada komposisi 80%  $Al_2O_3$ -7%  $Y_2O_3$ /13%  $SiO_2$  dengan kecepatan feed rate 6gram/min. Semakin tinggi kecepatan feed ratenya maka kekuatan lekatnya semakin menurun pada komposisi yang sama. Pada kecepatan 6gram/menit mampu menahan beban tarik sebesar 6Mpa karena pada spesimen berdasarkan hasil uji SEM tingkat porositasnya sangat tinggi, tingkat porositas juga dipengaruhi fraksi massa dari Ittria dan Silika [5,8].

Tabel 2.  
Hasil pengujian termal torch setelah flame spray

Komposisi % $Y_2O_3/SiO_2$ pada $Al_2O_3$		Feed Rate (g/min)	Hasil Pengujian <i>Thermal Torch</i> (detik)	Kondisi Spesimen
$Y_2O_3$ (%)	$SiO_2$ (%)			
3	17	6	23,53	1
		12	24,64	2
		18	26,41	3
5	15	6	25,82	3
		12	27,12	3
		18	28,01	4
7	13	6	26,31	4
		12	27,78	4
		18	29,53	4

Keterangan :

1 = Rusak 2 = Cekung dalam 3 = Cekung dangkal 4 = Baik



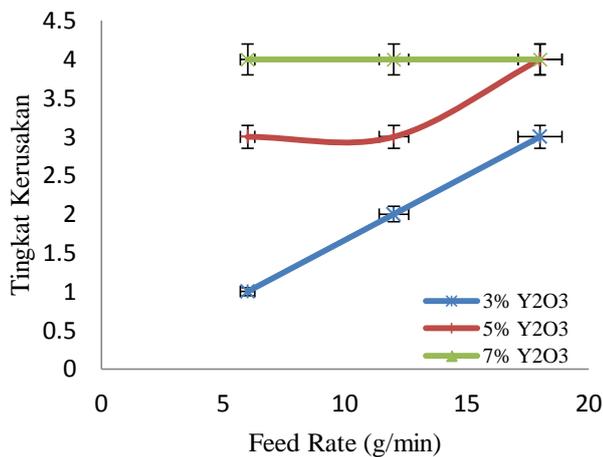
Gambar 14. Grafik hasil uji Termal feed rate terhadap waktu kerusakan

G. Hasil Pengujian Termal Torch

Pengujian ini bertujuan untuk melihat ketahanan lapisan  $Al_2O_3$ - $Y_2O_3/SiO_2$  terhadap beban termal torch. Pengujian menggunakan oxy acetylene (las karbit) dengan temperatur mencapai 1400° C dengan waktu maksimal 30 detik pada proses pemanasan terpusat pada satu titik setelah itu diamati hasilnya secara visual seperti pada tabel 2.

Berdasarkan hasil uji termal torch pada Gambar 14 spesimen mengalami kerusakan pada komposisi 3%  $Y_2O_3$ , 17%  $SiO_2$ , dan 80%  $Al_2O_3$  dengan feed rate 6 gram/menit. Hal ini terjadi karena banyak porositas pada topcoat dan banyaknya oksida klaster yang terbentuk sehingga mempercepat penjalaran microcrack antara bondcoat dan topcoat dan substrat tidak mampu menerima beban termal dalam waktu 23,53 detik [9,10].

Pada Gambar 15 didapatkan hasil semakin tinggi feed ratenya maka kerusakan pada spesimen semakin kecil dan waktu untuk terjadinya perubahan bentuk pada permukaan pada komposisi 3%  $Y_2O_3$  dengan kecepatan 12 gram/menit dibutuhkan waktu 24,64 detik, perubahan pada permukaan topcoat ini setelah uji termal torch terlihat cekung dalam sedangkan pada feedrate 6 gram/menit terjadi kerusakan yang sangat fatal karena pada topcoat banyak oksida yang terjebak sehingga menyebabkan spesimen ini rusak. Sedangkan semakin tingginya komposisi yttria maka spesimen semakin tahan terhadap termal torch.



Gambar 15. Grafik hubungan feed rate terhadap tingkat kerusakan

#### IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Berdasarkan hasil pengujian SEM didapatkan tingkat porositas paling rendah pada komposisi 80% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 13% SiO<sub>2</sub>, 7% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, dan feed rate 18 gram/menit.
2. Pertumbuhan oksida setelah uji termal yang paling baik terdapat pada 80% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 13% SiO<sub>2</sub>, 7% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, dan 80% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 15% SiO<sub>2</sub>, 5% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.
3. Berdasarkan analisa uji termo gravimetrik (TGA) terjadi perubahan massa pada temperatur 1000°C dan analisa derivative TGA spesimen yang paling stabil terjadi pada komposisi 80% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 13% SiO<sub>2</sub>, 7% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.
4. Berdasarkan hasil XRD teridentifikasi fasa setelah dilakukan *spraying* didapatkan fasa  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan fasa *kyanite* Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> berbentuk kristalin pada setiap spesimen.
5. Setelah dilakukan pemanasan pada temperatur 1100 °C diholding selama 5 jam teridentifikasi fasa  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, *andalusite* Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> dan Y<sub>4</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>9</sub>.
6. Berdasarkan hasil uji pull off kekuatan paling tinggi terjadi pada feedrate 6 gram/menit dengan komposisi 80% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 13% SiO<sub>2</sub>, 7% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.
7. Berdasarkan hasil uji termal torch, spesimen yang paling mampu menahan termal torch terjadi pada komposisi 80% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 13% SiO<sub>2</sub>, 7% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dengan kecepatan feedrate 18 gram/menit.

#### UCAPAN TRIMA KASIH

“Penulis AB.G. mengucapkan terima kasih kepada Insentif Sinergi Nasional (Insinas) Lembaga Antariksa dan Penerbangan Nasional (LAPAN), ITS and Kementerian Nasional Riset dan Teknologi (KNRT) tahun 2013 yang telah memberikan dana penelitian pada penulis, dosen pembimbing Dr.Widyastuti,S.Si., M.Si. atas dukungan dan motivasi beserta kedua orang tua tercinta yang telah membuat penulis semangat mengerjakan penelitian ini”.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sugondo, Bondan T.S. and Arindam “Pelapisan Permukaan Dalam Nosel Roket RKK 100 dengan Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub>-NiCr HVOF-Optimasi Kekuatan Lekat Melalui Variasi Kekasaran Permukaan”, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional., Jakarta, (2010).
- [2] M. Rycroft., Petraco, N and DeForest. P. “Trajectory Reconstructions I: Trace Evidence in Flight”. *Journal of Forensic Sci.* Vol.35 (1990,May), 1284-1296.
- [3] J. A Haynes, J. M. Ferber and I. G. Wright..” Effects of platinum incorporation on isothermal oxidation behavior of chemically vapour deposition coating, metall, and mater. Trans. A, vol.32A (2001,Jul) 1727-1741.
- [4] W. R. Chen, Cao, Q..X, and Y. Wang, “Ceramic Materials for Thermal Barrier Coating”, *Material Science Forum*, Vol. 251-254 (2004), 965-970.
- [5] Rayisa,Voytovych, Nicoletta Popescu-Pogrion, Christina Scheu, Ulrike Ta’ffner,Manfred Ru’hle,” Abnormal Grain Growth In Alumina-Synergistic Effects Of Yttria And Silica”. *Technische Universitat Darmstadt, Germany* (2003).
- [6] J. A Thompson,Y. C. Tusk, R. C. Reed, D. S. Rickerby, and T. W. Clyne: The effect of heat-treatment on the stiffness of zirconia topcoat in plasma sprayed TBCs, *Acta Mater.*, Vol. 49 (2003), 1565-1575
- [7] Y. J. Su, R. W.Trice., K. T. Faber, H. Wang and W. D. Porter, ” Thermal Conductivity, Phase Stability, and Oxidation Resistance of Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (YAG)/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> (YSZ) Thermal-Barrier Coatings”. *Department of Materials Science and Engineering, Northwestern University,USA* (2004).
- [8] Yanjun Li, Youtao Xie a, Liping huang, Xuanyong Liu and Xuebin Zheng, ” Effect of physical vapor deposited Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film on TGO growth in YSZ/CoNiCrAlY coatings”. *Key Laboratory of Inorganic Coating Materials, Shanghai Institute of Ceramics,China* (2012).
- [9] Peter,Mechnich, Wolfgang and Braug, “Air plasma-sprayed Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> ceramic matrix composites”. *Institute of Materials Research, Cologne, Germany* (2013).
- [10]David, R. W, R. C. Reed.,and T. W. Clyne, ”Thermodynamic Properties of Mullite, Andalusite, Kyanite and Sillimanite”.*Departement Geological Science Harvard University, Cambridge*, Vol. 21(1965), 125-216.