



TUGAS AKHIR - TL141584

**PENGARUH KOMPOSISI DAN VARIASI JUMLAH  
SAPUAN KOMPOSIT YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  TERHADAP  
KETAHANAN TERMAL DAN KEKUATAN LEKAT  
PADA YSZ/YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  *DOUBLE LAYER TBC*  
UNTUK APLIKASI NOSEL ROKET**

RATNA TRI AGUSTINA  
NRP. 2711100036

Dosen Pembimbing  
Dr. Widyastuti, S.Si, M.Si

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2015

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



FINAL PROJECT - TL141584

**THE EFFECTS OF COMPOSITIONS AND PASS  
VARIATIONS OF YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  COMPOSITE ON  
THERMAL RESISTANCE AND ADHESION  
STRENGTH OF YSZ/YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  DOUBLE LAYER  
FOR ROCKET NOZZLE APPLICATION**

RATNA TRI AGUSTINA  
NRP. 2711100036

Advisor  
Dr. Widyastuti, S.Si, M.Si

DEPARTMENT OF MATERIALS AND METALURGICAL ENGINEERING  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya  
2015

*Halaman ini sengaja di kosongkan*



---

**PENGARUH KOMPOSISI DAN VARIASI JUMLAH  
SAPUAN KOMPOSIT YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  TERHADAP  
KETAHANAN TERMAL DAN KEKUATAN LEKAT  
PADA YSZ/YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  *DOUBLE LAYER TBC* UNTUK  
APLIKASI NOSEL ROKET**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada

Bidang Studi Material Inovatif  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**RATNA TRI AGUSTINA**  
NRP. 2711 100 036

Disetujui oleh Tim Pembimbing Tugas Akhir :

Dr. Widyastuti S.Si, M.Si ..... (Pembimbing I)



**SURABAYA**  
**JANUARI 2015**

**PENGARUH KOMPOSISI DAN VARIASI 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**

**Nama Mahasiswa** : Ratna Tri Agustina  
**NRP** : 2711100036  
**Jurusan** : Teknik Material dan Metalurgi  
**Dosen Pembimbing** : Dr. Widyastuti S.Si, M.Si

**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 digunakan sebagai aplikasi material perintang panas pada dinding dalam nosel roket. Pelapisan dilakukan dengan variasi komposisi  $Al_2O_3$  dan jumlah sapuan pada lapisan komposit  $Al_2O_3$ -YSZ. Hipotesis dari penelitian ini adalah semakin tinggi komposisi  $Al_2O_3$  pada lapisan komposit  $Al_2O_3$  membuat lapisan coating memiliki properties yang lebih baik dan TGO(Thermally Grown Oxide) yang terbentuk semakin tipis. Pada jumlah sapuan, semakin banyak jumlah sapuan akan meningkatkan ketahanan oksida dan ketahanan terhadap spallation semakin baik.*

*Pada penelitian ini bond coat dan top coat dilapiskan dengan menggunakan metode flame spray. Pada lapisan komposit YSZ- $Al_2O_3$  dilapiskan dengan variasi komposisi  $Al_2O_3$  15, 30, 45 wt% terhadap YSZ dan variasi jumlah sapuan komposit YSZ- $Al_2O_3$  1, 2 dan 3x sapuan. Jarak spray ditahan konstan pada 200 mm dan feed rate 20 g/min. Kemudian dilakukan pengujian termal, pull*

*off test dan SEM-EDX, XRD. Pengujian termal yang dilakukan yaitu Thermal Torch Test dan Uji Termal TGA.*

*Dari hasil penelitian didapatkan bahwa semakin banyak jumlah sapan membuat kompleksitas mikrostruktur semakin tinggi dan menyebabkan kekuatan lekat dan ketahanan termal semakin rendah. Hal ini berkebalikan dengan hipotesis awal. Lapisan komposit YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> juga sangat berpengaruh pada pertumbuhan TGO setelah dilakukan uji termal, Komposisi optimum dengan pertumbuhan TGO yang paling rendah adalah pada YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% Hasil pengujian TGA menunjukknn semua sampel yang dcoating mulai teroksidasi pada temperatur 900 °C, tetapi dengan analisa 1<sup>st</sup> Derivative didapatkan sampel paling stabil adalah YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% - 1x. Dari pengujian Thermal Torch sampel YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% - 1x memiliki ketahanan terhadap pengrusakan yang baik. Kekuatan lekat paling tinggi juga terdapat pada komposisi YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% - 1x dengan nilai rata-rata 15.35 Mpa.*

**Kata kunci: TBC, Nosel Roket, YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TGO, Kekuatan Lekat**



**THE EFFECTS OF COMPOSITION AND PASS  
VARIATIONS OF YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  COMPOSITE ON  
THERMAL RESISTANCE AND ADHESION  
STRENGTH OF YSZ/YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  DOUBLE LAYER  
TBC FOR ROCKET NOZZLE APPLICATION**

**Name** : Ratna Tri Agustina  
**NRP** : 2711100036  
**Department** : Materials and Metallurgical Engineering  
**Advisor** : Dr. Widyastuti S.Si, M.Si

**Abstract**

*TBC (Thermal Barrier Coating) with YSZ/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ -YSZ top coat (TC) and MCrAlY as bond coat (BC,) mark as YSZ/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ -YSZ double layer TBC, was used as a material for thermal barrier on the inside wall of rocket nozzle. Coating was done by varying the composition of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and the amount of pass on the composite layer of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -YSZ. Early hypothesis of this study was the higher the composition of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  on the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  composite layer would make the coating layer owned better properties and the TGO formed was thinning. Bigger amount of pass would increase the oxide resistance and better its resistance to spallation..*

*In this research, the bond coat and top coat were coated by using flame spray method. The YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  composite layer was coated by varying composition of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  at 15, 30, 45 wt% and various amounts of pass of YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  composite of 1, 2 and 3x pass. The distance of spray was held constant at 200 mm and feed rate of 20 g/min. Next, thermal tests, Pull off tests, SEM-EDX and XRD were conducted. Thermal tests*

being conducted were thermal torch tests and TGA thermal testing.

From this research, we obtained that if more pass were done, it would make the complexity of the microstructure higher and make the adhesiveness and the thermal resistance lower. The results were in the opposite of the early hypothesis. The YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite layer was also influential to the growth of TGO (Thermally Grown oxide) after thermal testing. The optimum composition obtained with the lowest TGO growth was when the YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> was at 30%. TGA testing results indicated that all the coated samples begun oxidized at 900 °C but using the 1<sup>st</sup> derivative analysis, the most stable sample was YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% - 1x. From the thermal torch test, the sample YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% - 1x was having good resistance toward disfiguration. The highest adhesiveness was also owned by sample with composition of YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% - 1x with average value of adhesiveness at 15.35 Mpa.

**Keywords: TBC, Rocket Nozzle, YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TGO, Adhesion Strength**

## KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, karena Rahmat dan Hidayat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir yang berjudul **“Pengaruh Komposisi dan Variasi Jumlah Sapan Komposit YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  Terhadap Ketahanan Termal dan Kekuatan Lekat Pada YSZ/YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  Double Layer TBC Untuk Aplikasi Nosel Roket”**.

Adapun laporan ini disusun dan diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan studi di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri (FTI), Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada :

- Allah SWT, atas Rahmat dan kasih sayang-Nya sehingga saya dapat mendapat hidayah untuk tetap tegak menjadi hamba-Nya dan semoga saya selalu dipilih *agar* mudah mengamalkan agama-Nya yang sempurna
- Bapak-Ibu, almarhum orang tua tercinta, atas jasa-jasanya yang tak terhingga dalam mendidik dan membesarkan saya, juga kedua kakak saya yang selalu memberikan dukungan moril maupun materil.
- Kepada Dr. Widyastuti S.Si, M.Si sebagai dosen pembimbing yang sangat saya hormati. Terima kasih atas segala bimbingan, masukan, dan saran yang ibu berikan.
- Kepada Dr. Sungging Pintowantoro, S.T., MT selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi.
- Kepada Dr. Eng. Hosta Ardhyananta, ST, M.Sc, Mas Irfan P. Hidayat, ST.,M.Sc.,Ph.D, dan Haryati Purwaningsih, S.Si,M.Si selaku dosen penguji yang sangat saya hormati. Terima kasih atas segala masukan, pertanyaan dan pencerahan yang diberikan kepada saya.
- Bapak-bapak dan Ibu-ibu dosen Jurusan Teknik Material dan Metalurgi yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu.



- Bapak Larasanto, Mas Deni, Muklas dan Mas Aris PT. Cipta Agung atas kerjasamanya dalam pengerjaan proses *spraying*.
- Staf Laboratorium Fisika Material Jurusan teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS Mas Ridho.
- Staf Laboratorium Karakterisasi Material Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS Mbak Iis.
- Staf Laboratorium Energi ITS.
- Rekan Satu Bimbingan Kelompok Tugas Akhir Rokaya dan Chaizi Nasucha.
- Rekan-rekan Laboratorium Fisika Material Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS
- Dan juga kepada Seluruh Teman-teman seperjuanganku MT-13, terima kasih karena sudah menjadi teman – teman terbaik dalam hidupku.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh karena adanya keterbatasan kemampuan penulis. Namund emikian, penulis dapat mewujudkan laporan ini secara lengkap berkat adanya perhatian, bimbingan, dan petunjuk dari berbagai pihak.

Pastinya dalam penulisan laporan ini masih terdapat kekurangan dan kesalahan. Untuk itu, saran dan kritik yang konstruktif sangat diharapkan.

Demikian penulis berharap semoga laporan ini dapat memberikan manfaat yang sebesar-besarnya khususnyabagi sesama mahasiswa yang menggeluti bidang material inovatif. Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Surabaya, Januari 2015

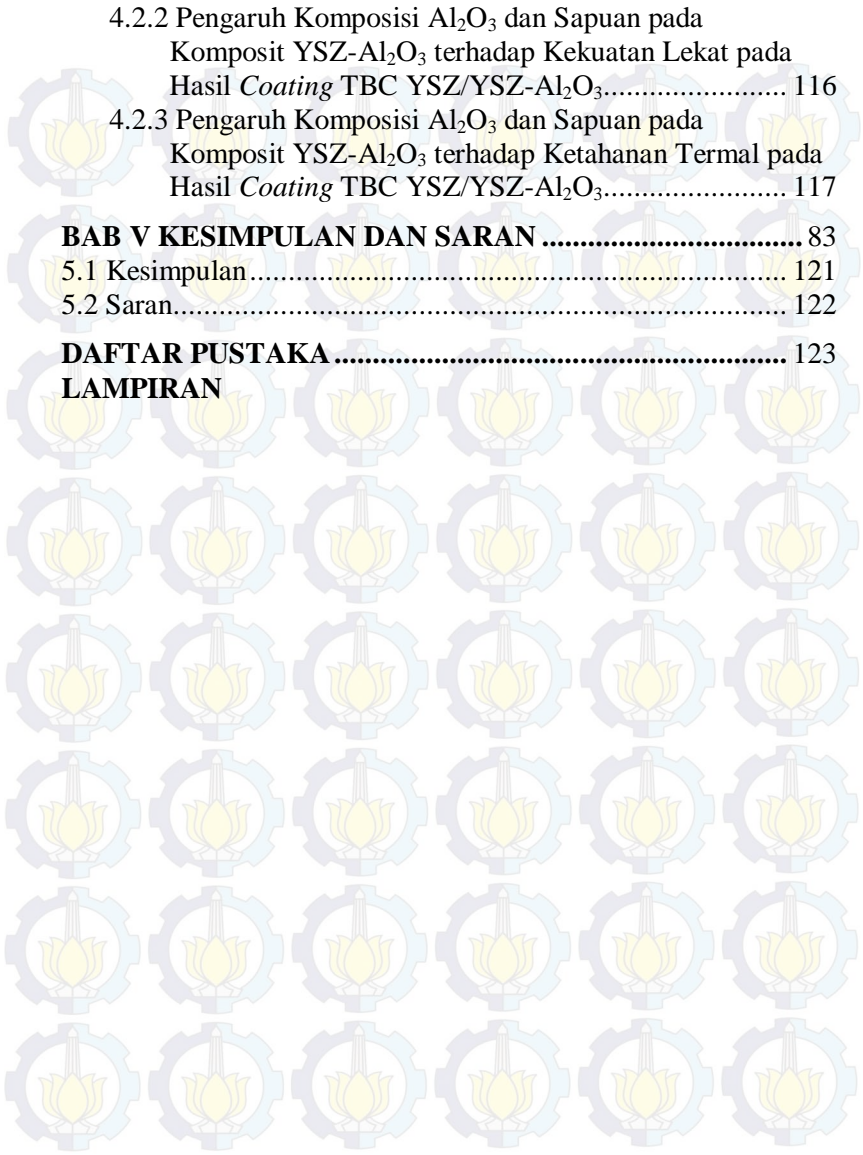
Penulis

## DAFTAR ISI

	Hal
Halaman Judul .....	i
Lembar Pengesahan .....	v
Abstrak .....	vii
Abstract .....	ix
Kata Pengantar.....	xi
Daftar Isi.....	xiii
Daftar Gambar .....	xvii
Daftar Tabel.....	xxiii
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Tujuan Penelitian .....	3
1.5 Manfaat Penelitian .....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>5</b>
2.1 Nosel Roket .....	5
2.2 <i>Coating</i> .....	7
2.3 <i>Thermal Barrier Coating</i> .....	9
2.4 Metode <i>Thermal Spray</i> .....	11
2.5 Metode <i>Flame Spray</i> .....	15
2.6 <i>Superalloy</i> Hastelloy® X.....	17
2.7 YSZ ( <i>Yttria Stabilized Zirconia</i> ).....	18
2.8 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	20
2.9 Komposit Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	21
2.10 <i>Bond Coat</i> MCrAlY .....	32
2.11 TGO ( <i>Thermally Grown Oxide</i> ).....	33
2.12 Adhesivitas dari Struktur TBC.....	34
2.13 Kajian Penelitian Sebelumnya .....	36
2.14 Perhitungan Ketebalan Lapisan <i>Coating</i> Ditinjau dari Transfer Panas .....	38
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>41</b>
3.1 Bahan Penelitian .....	41



3.2	Alat Penelitian .....	43
3.3	Diagram Alir Penelitian .....	53
3.4	Rancangan Penelitian .....	55
3.5	Tahapan-tahapan Penelitian .....	56
3.5.1	Preparasi Spesimen Hastelloy® X .....	56
3.5.2	Preparasi <i>Bond Coat</i> MCrAlY .....	56
3.5.3	Preparasi Keramik YSZ ( <i>Top Coat</i> ) .....	57
3.5.4	Preparasi Komposit YSZ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	57
3.5.5	Proses Pelapisan Melalui <i>Flame Spray</i> .....	58
3.5.6	Pengujian .....	59
<b>BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN .....</b>		<b>65</b>
4.1	Analisa Data .....	65
4.1.1	Karakterisasi Serbuk .....	65
4.1.2	Hasil Preparasi Substrat .....	72
4.1.3	Hasil Proses Pelapisan .....	74
4.1.4	Hasil Pengujian Kekuatan Lekat .....	75
4.1.4.1	Analisa Kuantitatif Metode Taguchi .....	75
4.1.4.2	Analisa Kuantitatif Metode Taguchi dengan Minitab .....	79
4.1.5	Hasil Pengujian <i>Thermal Torch Oxyacetylene</i> .....	82
4.1.5.1	Analisa Kuantitatif Metode Taguchi .....	82
4.1.5.2	Analisa Kuantitatif metode Taguchi dengan Minitab .....	86
4.1.6	Hasil Pengujian TGA ( <i>Thermogravimetri</i> ) .....	90
4.1.7	Hasil Pengujian XRD .....	95
4.1.7.1	Hasil Pengujian XRD Sebelum Uji Termal ...	95
4.1.7.2	Hasil pengujian XRD Setelah Uji Termal .....	96
4.1.8	Hasil Pengujian SEM .....	98
4.1.8.1	Hasil Pengujian SEM Sebelum Uji Termal ...	99
4.1.8.2	Hasil Pengujian SEM Setelah Uji Termal ...	109
4.2	Pembahasan .....	113
4.2.1	Pengaruh Komposisi Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> dan Sapuan pada Komposit YSZ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> terhadap Porositas pada Hasil <i>Coating</i> TBC YSZ/YSZ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	115



4.2.2 Pengaruh Komposisi $Al_2O_3$ dan Sapuan pada Komposit YSZ- $Al_2O_3$ terhadap Kekuatan Lekat pada Hasil <i>Coating</i> TBC YSZ/YSZ- $Al_2O_3$ .....	116
4.2.3 Pengaruh Komposisi $Al_2O_3$ dan Sapuan pada Komposit YSZ- $Al_2O_3$ terhadap Ketahanan Termal pada Hasil <i>Coating</i> TBC YSZ/YSZ- $Al_2O_3$ .....	117
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>83</b>
5.1 Kesimpulan.....	121
5.2 Saran.....	122
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>123</b>
<b>LAMPIRAN</b>	



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Karakterisasi Umum Metode <i>Coating</i> .....	8
Tabel 2.2 Perbandingan Properti Beberapa Teknik <i>Thermal Spray</i> .....	15
Tabel 2.3 Komposisi Hastelloy <sup>®</sup> X .....	17
Tabel 2.4 Properti dari Hastelloy <sup>®</sup> X .....	18
Tabel 2.5 Properti dari Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	21
Tabel 2.6 Kajian Penelitian Sebelumnya .....	22
Tabel 3.1 Rancangan Penelitian .....	55
Tabel 3.2 Parameter <i>Spray</i> yang Digunakan .....	58
Tabel 4.1 Nilai Kelekatan dari Setiap Sampel.....	77
Tabel 4.2 Variabel dan Level Penelitian .....	78
Tabel 4.3 ANOVA Kekuatan Lekat.....	80
Tabel 4.4 Nilai Ketahanan Termal dengan Metode Pendekatan Massa Hasil Uji <i>Thermal Torch Oxyacetylene</i> .....	84
Tabel 4.5 Nilai Ketahanan Termal dengan Metode Pendekatan Volume Hasil Uji <i>Thermal Torch Oxyacetylene</i> .....	84
Tabel 4.6 ANOVA Ketahanan Termal berdasarkan Pendekatan Massa .....	88
Tabel 4.7 ANOVA Ketahanan Termal berdasarkan Pendekatan Volume.....	88
Tabel 4.8 Perbandingan Tebal TGO dan Ukuran Retak Sebelum dan Sesudah Uji Termal .....	113





*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Nosel Roket .....	6
Gambar 2.2 Distribusi Temperatur pada <i>Thermal Barrier Coating</i> .....	9
Gambar 2.3 Skematik <i>Thermal Barrier Coating</i> .....	10
Gambar 2.4 Klasifikasi Proses Spray Termal .....	11
Gambar 2.5 Skema Proses <i>Thermal Spray</i> .....	13
Gambar 2.6 <i>Coating Thermal Spray</i> .....	13
Gambar 2.7 Parameter dan Variabel Proses <i>Thermal Spray</i> .....	22
Gambar 2.8 Skematik Sistem <i>Powder Flame Spray</i> .....	16
Gambar 2.9 Diagram Fase YSZ .....	20
Gambar 2.10 Hasil Pelapisan	
(a) YSZ,	
(b) YSZ/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	22
Gambar 2.11 Penampang Melintang	
(a) YSZ,	
(b) YSZ/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	23
Gambar 2.12 Penampang Melintang TBC dengan Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	24
Gambar 2.13 Laju Pertumbuhan TGO .....	24
Gambar 2.14 Penampang Melintang Daerah TGO pada TBC .....	25
Gambar 2.15 Perbandingan Tebal TGO .....	25
Gambar 2.16 Penampang Melintang TBC dengan YSZ/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	26
Gambar 2.17 Kinetika Oksidasi Tiap Sampel .....	26
Gambar 2.18 Kurva <i>Weight Loss</i> Tiap Sampel .....	27
Gambar 2.19 Penampang Melintang TBC .....	27
Gambar 2.20 <i>Coating</i> Spesimen Uji .....	28
Gambar 2.21 Perbandingan Kekuatan Lekat .....	29
Gambar 2.22 Perbandingan Tebal TGO .....	29
Gambar 2.23 Ilustrasi <i>Coating</i> Spesimen pada Penelitian .....	30
Gambar 2.24 Perbandingan Tebal TGO .....	30
Gambar 2.25 Perbandingan <i>Tensile Strength</i> .....	31
Gambar 2.26 Ilustrasi <i>Failure</i> TBC Akibat TGO .....	34

Gambar 2.27 <i>Portable Adhesion Tester</i> .....	35
Gambar 2.28 Skema Proses Transfer Panas dari Struktur <i>Double Layer TBC</i> .....	38
Gambar 3.1 Spesimen Hastelloy® X (a) Uji <i>Thermal Torch</i> dan <i>Pull Off</i> (b) Uji TGA ( <i>Thermografimetri</i> ) .....	41
Gambar 3.2 Serbuk YSZ .....	42
Gambar 3.3 Serbuk Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	42
Gambar 3.4 Serbuk Amdry 962 .....	43
Gambar 3.5 Serbuk <i>Brown Al-Oxide Cf 16</i> .....	43
Gambar 3.6 Neraca Digital Analitik .....	44
Gambar 3.7 Alat <i>Siever Shaker</i> .....	45
Gambar 3.8 Planetary Ball Mill Restch PM 400 .....	46
Gambar 3.9 <i>Dryer</i> .....	46
Gambar 3.10 Alat <i>Sand Blasting</i> .....	47
Gambar 3.11 Alat <i>Flame Spray</i> .....	47
Gambar 3.12 Peralatan Las <i>Oxy Acetylene</i> .....	48
Gambar 3.13 SEM FEI S50 .....	49
Gambar 3.14 XRD X'Pert PAN analytical .....	49
Gambar 3.15 <i>Thermogravimetry</i> .....	50
Gambar 3.16 Termometer IR .....	50
Gambar 3.17 Alat <i>Pull Off</i> .....	51
Gambar 3.18 <i>Roughness Meter</i> .....	52
Gambar 3.19 Alat-alat Pendukung .....	52
Gambar 3.20 Diagram Alir .....	54
Gambar 3.21 Proses Pelapisan dengan <i>Thermal Spray</i> (a) Proses Pelapisan Spesimen Uji <i>Pull Off</i> dan <i>Thermal Torch</i> , (b) Proses Pelapisan Spesimen Uji TGA ( <i>Thermogravimetry</i> ) .....	59
Gambar 3.22 Proses Uji <i>Thermal Torch Oxyacetylene</i> .....	60
Gambar 4.1 Hasil Pengujian SEM Serbuk 8YSZ dengan Perbesaran 500x .....	65
Gambar 4.2 (a) Hasil EDX dari serbuk 8YSZ (b) Hasil XRD dari serbuk 8YSZ .....	66

Gambar 4.3 Hasil Pengujian SEM Serbuk $Al_2O_3$ dengan Perbesaran 500x .....	68
Gambar 4.4 (a) Hasil EDX Dari Serbuk $Al_2O_3$ (b) Hasil XRD Dari Serbuk $Al_2O_3$ .....	69
Gambar 4.5 Hasil Pengujian SEM Serbuk NiCrAlY dengan Perbesaran 500x .....	70
Gambar 4.6 (a) Hasil EDX dari Serbuk NiCrAlY (b) Hasil XRD dari Serbuk NiCrAlY .....	71
Gambar 4.7 Hasil Pengujian SEM Serbuk Pasir Alumina dengan Perbesaran 500x .....	72
Gambar 4.8 Spesimen Hastelloy <sup>®</sup> X Setelah Dipotong (a) Spesimen Uji <i>Pull Off</i> dan <i>Thermal Torch</i> (b) Spesimen Uji TGA ( <i>Thermogravimetry</i> ) .....	73
Gambar 4.9 Spesimen Hastelloy <sup>®</sup> X Setelah Dipotong (a) Sebelum <i>Sand Blasting</i> , (b) Setelah <i>Sand Blasting</i> .....	73
Gambar 4.9 Proses pelapisan dengan <i>Thermal Spray</i> .....	73
Gambar 4.10 Permukaan Spesimen Setelah Dilapisi (a) <i>Bond coat</i> NiCrAlY, (b) Dilapisi YSZ- $Al_2O_3$ , (c) YSZ .....	74
Gambar 4.11 Penampang Melintang Spesimen Setelah Dilapisi <i>Bond coat</i> NiCrAlY + YSZ- $Al_2O_3$ + YSZ .....	75
Gambar 4.12 Sampel Sesudah Pengujian <i>Pull Off</i> .....	76
Gambar 4.13 Grafik Pengaruh antara Kekuatan Lekat dengan Komposisi Dan Sapuan <i>Output Software Minitab</i> 80	
Gambar 4.14 Gambar Sampel sesudah Pengujian <i>Thermal Torch Oxyacetylene</i> .....	83
Gambar 4.15 Grafik Hubungan antara Ketahanan Termal dengan Komposisi dan Sapuan berdasarkan Pendekatan Massa menggunakan <i>Software Minitab</i> .....	86
Gambar 4.16 Grafik Hubungan antara Ketahanan Termal dengan Komposisi dan Sapuan berdasarkan	

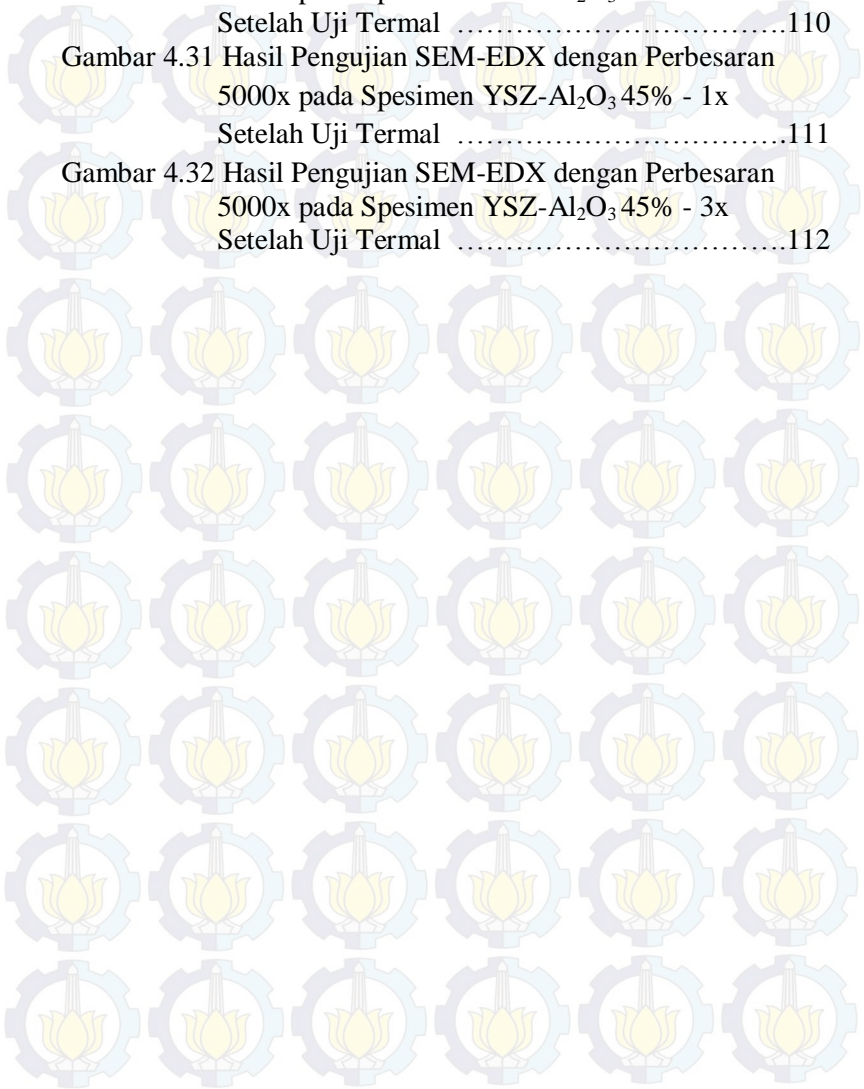


Pendekatan Volume menggunakan <i>Software</i> Minitab .....	87
Gambar 4.17 Pengaruh Temperatur terhadap Penambahan Massa .....	91
Gambar 4.18 Grafik Analisa $I^{st}$ Derivative TGA .....	94
Gambar 4.19 Hasil Pengujian XRD Pada Permukaan Atas Sebelum Uji Termal Pada Setiap Komposisi .....	95
Gambar 4.20 Hasil Pengujian XRD Pada Permukaan Atas Setelah Uji Termal Pada Setiap Komposisi .....	97
Gambar 4.21 Hasil Pengujian SEM Permukaan <i>Coating</i> Perbesaran 2000x .....	99
Gambar 4.22 Hasil Pengujian SEM Permukaan <i>Coating</i> pada Perbesaran 250x .....	100
Gambar 4.23 Grafik Presentase Luasan Porositas pada Permukaan Hasil <i>Coating</i> tiap Sampel.....	101
Gambar 4.24 Hasil Pengujian SEM Penampang Melintang pada Perbesaran 250x .....	102
Gambar 4.25 Hasil Pengujian SEM-EDX dengan Perbesaran 5000x pada Spesimen YSZ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 30% - 1x Setelah Proses <i>Flame Spray</i> .....	104
Gambar 4.26 Hasil Pengujian SEM-EDX dengan Perbesaran 5000x pada Spesimen YSZ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 15% - 1x Setelah Proses <i>Flame Spray</i> .....	105
Gambar 4.27 Hasil Pengujian SEM-EDX dengan Perbesaran 5000x pada Spesimen YSZ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 45% - 1x Setelah Proses <i>Flame Spray</i> .....	106
Gambar 4.28 Hasil Pengujian SEM-EDX dengan Perbesaran 5000x pada Spesimen YSZ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 45% - 3x Setelah Proses <i>Flame Spray</i> .....	107
Gambar 4.29 Hasil Pengujian SEM-EDX dengan Perbesaran 5000x pada Spesimen YSZ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 30% - 1x Setelah Uji Termal .....	109

Gambar 4.30 Hasil Pengujian SEM-EDX dengan Perbesaran  
5000x pada Spesimen YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15% - 1x  
Setelah Uji Termal .....110

Gambar 4.31 Hasil Pengujian SEM-EDX dengan Perbesaran  
5000x pada Spesimen YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 1x  
Setelah Uji Termal .....111

Gambar 4.32 Hasil Pengujian SEM-EDX dengan Perbesaran  
5000x pada Spesimen YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 3x  
Setelah Uji Termal .....112





*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Nosel roket (*nozzle*) adalah bagian yang berfungsi sebagai pengatur keluaran fluida keluar roket dan berperan penting dalam mengatur gaya dorong roket (*thrust*) (Sugondo dkk, 2010). Temperatur kerja nosel 800 – 1200 °C (yang bergantung pada jenis propelan yang digunakan). Sebagai material yang dapat digunakan dalam aplikasi nosel roket ini adalah *superalloy* yang dilapisi dengan material keramik (*Thermal Barrier Coating - TBC*). TBC banyak berfungsi untuk mengurangi transfer panas pada material. Namun TBC ini memiliki kekurangan yaitu dekohesi dari *bond coat* yang disebabkan oleh oksidasi dan pembentukan TGO (*Thermally Grown Oxide*).

Parindra (2014) melakukan penelitian dengan memvariasikan komposisi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  komposit YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  (5, 15, 30 wt%) dan *feed rate* (8, 14, 20 g/min) dengan metode *flame spray*. Hasil yang diperoleh adalah kekuatan lekat dan ketahanan termal yang paling baik terjadi pada sampel dengan komposisi komposit YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  15%. Lazuardi (2014) dengan metode yang sama melakukan penelitian dengan memvariasikan komposisi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  komposit YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  (5, 15, 30 wt%) dan jarak *spray* (150, 200, 250 mm). Hasil yang diperoleh adalah nilai kelekatan rata-rata paling tinggi pada sampel dengan komposisi komposit YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  30% dan nilai oksidasi paling rendah pada sampel dengan komposisi komposit YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  30%. Dari kedua hasil tersebut masih belum dapat dipastikan komposisi komposit YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  yang optimum pada metode ini.

Oleh karena itu penelitian ini mencoba memvariasikan komposisi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pada komposit YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  (15, 30, 45 wt%)

---





untuk menapatkan hasil yang optimum dengan menggunakan metode *flame spray*. Saremi (2012) melakukan percobaan dengan memvariasikan komposisi berat dari alumina dengan metode APS dan menarik kesimpulan bahwa semakin tinggi komposisi berat dari alumina membuat hasil *coating* memiliki properties yang lebih baik. TGO yang terbentuk semakin tipis. Selain itu penelitian ini juga memvariasikan jumlah sapuan komposit YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Pada tahun 2013 Jungi Yao melakukan percobaan dengan memvariasikan jumlah layer  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pada komposit YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  dengan metode APS dan mengambil kesimpulan bahwa semakin banyak layer ketahanan oksida dan ketahanan terhadap *spallation* semakin baik. Tujuan penelitian ini untuk menganalisa komposisi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dan sapuan komposit YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  terhadap kekuatan lekat dan ketahanan termal untuk menghasilkan sifat lapisan yang paling optimal dengan menggunakan metode *flame spray*.

## 1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka rumusan masalah dalam penelitian ini antara lain:

1. Bagaimana pengaruh komposisi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pada lapisan komposit YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  terhadap sifat kelekatan dan ketahanan termal dari YSZ/YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  *double layer* TBC?
2. Bagaimana pengaruh jumlah sapuan komposit YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  terhadap sifat kelekatan dan ketahanan termal dari YSZ/YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  *double layer* TBC?
3. Bagaimana pengaruh dari komposisi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dan jumlah sapuan pada lapisan komposit YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  terhadap struktur mikro yang dihasilkan sebelum dan setelah pengujian termal?



### 1.3 Batasan Masalah

Untuk mendapatkan hasil akhir yang baik dan sesuai dengan yang diinginkan serta tidak menyimpang dari permasalahan yang ditinjau, maka batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pencampuran serbuk keramik dianggap homogen.
2. Unsur pengotor dan faktor lingkungan dianggap tidak berpengaruh.

### 1.4 Tujuan Penelitian

1. Menganalisa pengaruh komposisi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pada lapisan komposit YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  terhadap sifat kelekatan dan ketahanan termal dari YSZ/YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  *double layer* TBC.
2. Menganalisa pengaruh jumlah sapuan komposit YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  terhadap sifat kelekatan dan ketahanan termal dari YSZ/YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  *double layer* TBC.
3. Menganalisa pengaruh dari komposisi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dan jumlah sapuan pada lapisan komposit YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  terhadap struktur mikro yang dihasilkan sebelum dan setelah pengujian termal.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan lapisan komposit keramik pada nosel roket yang memiliki sifat kelekatan yang baik dan stabil terhadap temperatur tinggi. Selain itu, penelitian ini juga dapat digunakan sebagai referensi penelitian selanjutnya untuk terus memajukan dunia penerbangan antariksa nasional demi menunjang bidang pertahanan dan keamanan bangsa.





## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Nosel Roket

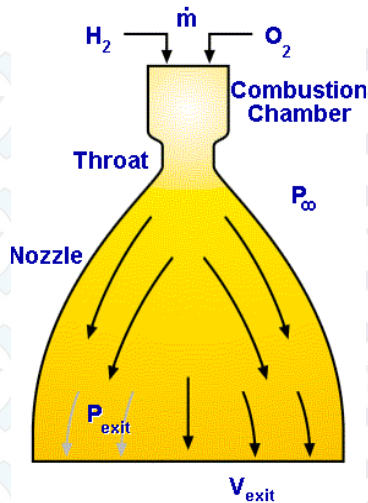
Nosel roket (*nozzle*) adalah bagian yang berfungsi sebagai pengatur keluaran fluida keluar roket dan berperan penting dalam mengatur gaya dorong roket (*thrust*) serta besar tekanan dalam ruang bakar yang diharapkan (Sugondo dkk, 2010). Nosel adalah bagian dari roket yang sangat vital, karena pada nosel memiliki temperatur kerja yang tinggi sekitar 800 – 2000 °C (yang bergantung pada jenis propelan yang digunakan) dan aliran gas yang tinggi, nosel juga berperan sebagai pengendali arah gerak dari suatu roket (George, 2001).

Di samping tahan terhadap temperatur tinggi nosel harus memiliki densitas yang rendah agar menjadi ringan dan memiliki *ultimate tensile strength* yang tinggi (Siahaan, 2010). Sedangkan menurut penelitian LAPAN (2007) bahwa bagian nosel roket ketika digunakan mampu menerima beban termal pada kisaran suhu sekitar 2000 °C dan tekanan sekitar 0,70-10 MPa. Kendala yang sering terjadi dalam pengembangan motor roket secara umum adalah keterbatasan material yang sesuai dengan optimasi kriteria rancangan struktur yang diinginkan (Edhtwan, 2008).

Pada nosel terdapat bagian yang berbentuk cekung (*converging section*) yang menyatu dengan ruang bakar sehingga menghasilkan fluida bertekanan tinggi dan bagian cembung (*diverging section*) sebagai tempat keluarnya fluida menuju lingkungan, serta leher (*throat*) yang berfungsi untuk mengatur kecepatan dari dorongan (George, 2001).

---





**Gambar 2.1** Nosel Roket (Rycroft, 2010)

Salah satu material yang digunakan untuk nosel adalah material paduan super (*superalloy*), grafit, paduan Titanium, dan pemberian *coating* pada substrat logam (*Thermal Barrier Coating*). LAPAN melakukan percobaan dengan membandingkan pengaruh tiga jenis material yang berbeda yaitu S45C yang dimiliki LAPAN, *Steel 17-7PH*, dan *Titanium 8-1-1* terhadap berat nosel dan efisiensi produksi roket RX-250. Dari percobaan tersebut Nosel RX-250 yang terbuat dari Titanium akan dapat menghemat berat sebanyak 79% dari berat nosel yang dimiliki Lapan. Dan nosel RX-250 yang terbuat dari *Steel 17-7 PH* dapat menghemat berat sebanyak 62% dari berat nosel dari Lapan. Namun harga titanium dan *steel 17-7 PH* yang tinggi dan sifatnya yang sulit dibentuk menjadi kendala dalam produksi (Robertus dkk, 2008 dan Triharjo dan Ginting, 2009).



Penelitian lain dilakukan oleh Sugondo dkk (2010) yang melakukan pelapisan nosel bahan baja S45C dengan Boron Karbida, menghasilkan kesimpulan nosel dapat bertahan pada temperatur di bawah temperatur 1200 °C selama kurang lebih 30 menit. Pada tahun 2010 pula Sauman, dkk juga melakukan penelitian tentang penurunan berat nosel dengan menggunakan campuran alumina dan zirkonia, namun kekuatan yang didapat masih lebih rendah dibandingkan nosel dengan bahan baja.

## 2.2 Coating

*Coating* atau pelapisan merupakan salah satu teknik perlakuan permukaan (*surface treatment*). Teknologi pelapisan ini dikembangkan untuk menunjang performa dari suatu komponen dengan mengaplikasikannya untuk tujuan tertentu tanpa mengganggu fungsi dari material substrat. Objek dari *coating* (substrat) berupa solid, karena *coating* diaplikasikan untuk memproteksi permukaan (*surface*) ketika permukaan tersebut berinteraksi dengan lingkungannya atau untuk tujuan lainnya seperti estetika.

Secara teknik, *coating* merupakan solusi untuk memproteksi permukaan dari keausan (*wear*), korosi (*corrosion*), degradasi termal, dan fenomena permukaan lainnya. Coating yang baik adalah yang mempunyai sifat *good adhesion*, *substrat compatibility*, dan *low porosity*. Selain itu, proses coating juga harus menyesuaikan dengan kondisi substrat seperti temperatur dan geometri. (ASM Handbook of Thermal Spray, 2004)

Ada beberapa metode untuk *mengcoating* yaitu *electro/electroless plating*, *thermal spray*, *Chemical Vapor Deposition* (CVD), dan *Physical Vapor Deposition* (PVD). Karakteristik umum dari metode-metode tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.1.

---



Tabel 2.1 Karakterisasi Umum Metode *Coating* (ASM Handbook of Thermal Spray, 2004)

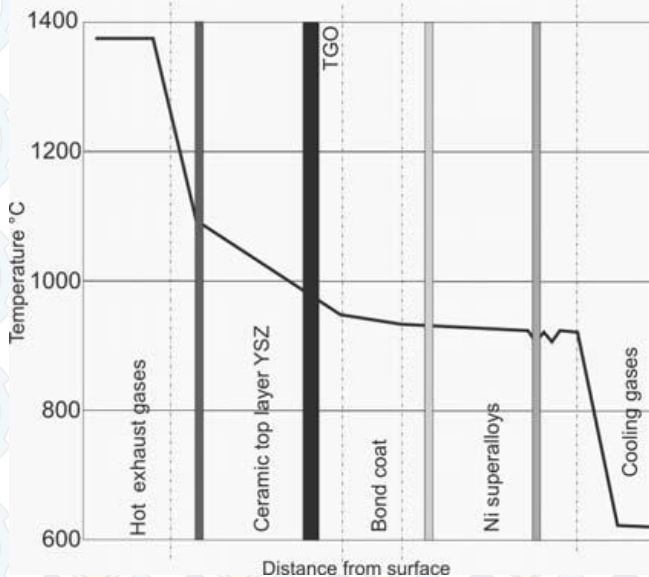
Karakteristik	<i>Electro/ electroless plating</i>	Termal spray	CVD	PVD
Biaya pemeliharaan	rendah	rendah – sedang	sedang	sedang – tinggi
Biaya operasi	rendah	rendah – sedang	rendah – sedang	sedang – tinggi
Lingkungan saat proses	<i>aqueous solution</i>	<i>atmospheric – soft vacuum</i>	<i>atmospheric – medium vacuum</i>	<i>hard vacuum</i>
Geometri <i>coating</i>	<i>omnidirectional</i>	<i>line of sight</i>	<i>omnidirectional</i>	<i>line of sight</i>
Ketebalan <i>coating</i>	sedang – tebal 10 $\mu\text{m}$ -mm	tebal 50 $\mu\text{m}$ -cm	tipis – tebal 0.1 $\mu\text{m}$ -mm	Sangat tipis – sedang
Temperatur substrat	rendah	rendah – sedang	sedang – tinggi	rendah
<i>Adherence</i>	<i>mechanical bond</i> kurang baik – <i>chemical bond</i> sangat baik	<i>mechanical bond</i> baik	<i>chemical bond</i> sangat baik – <i>diffusion bond</i> sangat baik	<i>mechanical bond</i> kurang baik – <i>chemical bond</i> baik
<i>Surface finish</i>	cukup kasar – <i>glossy</i>	kasar – halus	halus – <i>glossy</i>	halus – <i>high glossy</i>



Material coating	logam	powder/ wire, polimer, logam/ keramik	logam, keramik, polimer	metal, keramik, polimer
------------------	-------	---	-------------------------------	-------------------------------

### 2.3 Thermal Barrier Coating

Thermal barrier coating (TBC) digunakan untuk mereduksi temperatur permukaan dari suatu komponen/substrat atau dengan kata lain sebagai termal insulator. Sulistijono mengatakan bahwa dengan ketebalan 1-200  $\mu\text{m}$  dapat menurunkan temperatur sampai 200  $^{\circ}\text{C}$ .



**Gambar 2.2** Distribusi Temperatur pada *Thermal Barrier Coating* (G.Moskal, 2009)





Biasanya, TBC terdiri dari empat layer, yaitu:

- Zona keramik luar (*top coat*) dengan konduktivitas termal yang rendah  
Telah banyak diteliti bahwa *top coat* dapat mereduksi laju pertumbuhan oksida dalam meskipun daam jumlah yang kecil. *Top coat* memberikan resistasi terhadap penetrasi oksigen dan menurunkan tekanan parsial pada *top coat/bond coat interface* (Saremi, 2014).
- *Bond coat* atau lapisan difusi
- Lapisan oksida penghalang TGO (*Thermally Grown Oxides*)
- *Superalloy* sebagai substrat

(G.Moskal, 2009)

Materials	Coating	Function	
$ZrO_2 + (6-8\%)Y_2O_3$ $Al_2O_3$ MCrAlY (20%Cr-12%Al) or Ni-aluminides	Ceramic top coat	Thermal insulation	TBC
	TGO	Oxidation barrier	
	Bond coat	Bonding of TBC, oxidation protection	
Ni superalloys (8%Cr-5%Al)	Substrate	Thermo-mechanical loading	

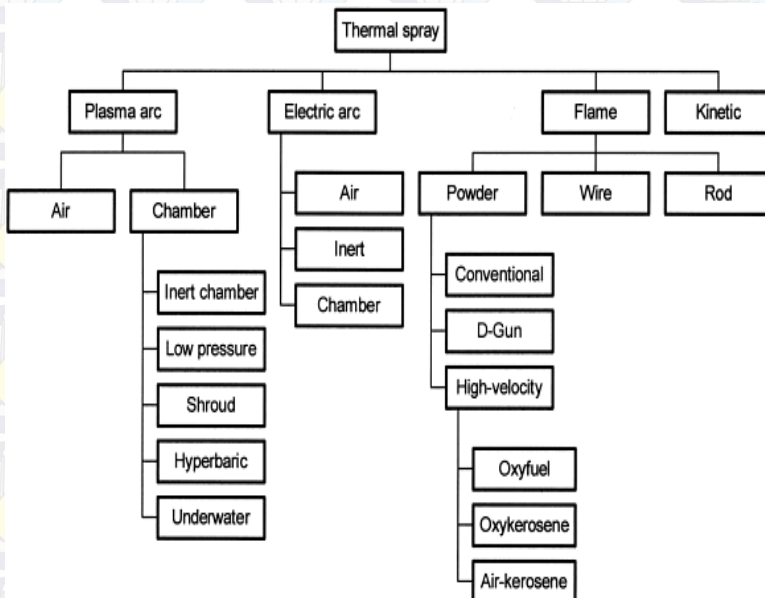
**Gambar 2.3.** Skematik *Thermal Barrier Coating* (G.Moskal, 2009)

Kelemahan utama dari TBC adalah dekohesi pada *bond coat* yang disebabkan oksidasi dan formasi dari *Thermally Grown Oxide* (TGO) (Keyvani, 2010).



## 2.4 Metode *Thermal Spray*

*Thermal spray* adalah istilah umum untuk suatu grup dari proses pelapisan yang digunakan untuk melapiskan suatu material logam atau non logam pada suatu substrat dalam keadaan leleh atau semi leleh. Proses ini dikelompokkan menjadi 3 kelompok besar yaitu: *flame spray*, *electric arc spray*, dan *plasma spray*. (ASM Handbook of Thermal Spray, 2004).



**Gambar 2.4** Klasifikasi Proses Spray Termal (ASM Handbook of Thermal Spray, 2004)

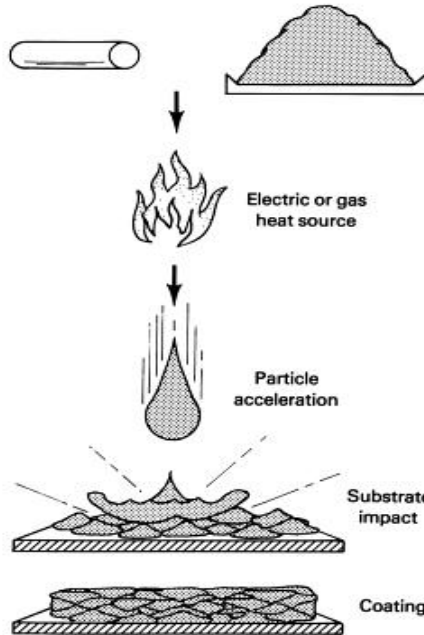
Keuntungan dari metode *thermal spray* ini adalah hampir semua material dapat didepositkan menjadi *coating* seperti logam, paduan, karbida, keramik oksida dan non oksida, *refractory metals*, plastik, *cermets*, dan komposit yang terdiri dari logam,



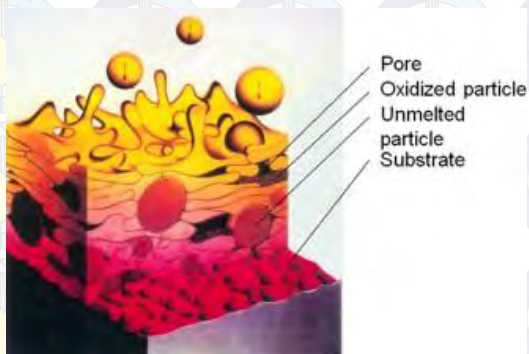
keramik, dan plastik. Tebal *coating* yang dihasilkan bervariasi yaitu dari 50  $\mu\text{m}$  sampai 6.5 mm (ASM *Handbook of Thermal Spray*, 2004).

Proses *spray* termal termasuk *nonatomistic* yaitu proses ini tidak mendepositkan material dalam bentuk ion, atom, maupun molekul pada permukaan substrat melainkan dalam bentuk *liquid droplets* (tetesan) atau semi leleh atau partikel solid. Termal *spray* ini termasuk proses “*line of-sight*”, yaitu proyeksi aliran dari *droplets* didepositkan hanya pada permukaan yang secara langsung searah dengan aliran *spray* (ASM *Handbook of Thermal Spray*, 2004).

Dalam termal *spray*, material dapat berupa serbuk, kawat, atau batang dapat dimasukkan ke dalam *flame* yang dihasilkan oleh *spray gun*, di mana material akan meleleh dan disemprot secara cepat menuju substrat yang akan dilapisi. Energi panas dan kinetik dari nyala api dapat diproduksi dengan pembakaran campuran bahan bakar gas dan oksigen, atau dengan menggunakan sumber daya listrik. Serbuk partikel ditembakkan ke substrat dengan kecepatan 50 sampai  $>1000$  m/s. Dengan kecepatan dan temperatur partikel yang tinggi membual partikel yang menempel berbentuk pipih dan tipis (biasa disebut “*splats*”). Ketebalan dari *splats* ini umumnya berkisar 1 – 20  $\mu\text{m}$ , dan setiap tetesan yang menempel tersebut membeku dengan kecepatan yang tinggi ( $>10^6$  K/s untuk logam) untuk membentuk struktur yang halus dan seragam (ASM *Handbook of Thermal Spray*, 2004). Skema proses ini dapat dilihat pada Gambar 2.5.



**Gambar 2.5** Skema Proses *Thermal Spray* (ASM Handbook of Thermal Spray, 2004)

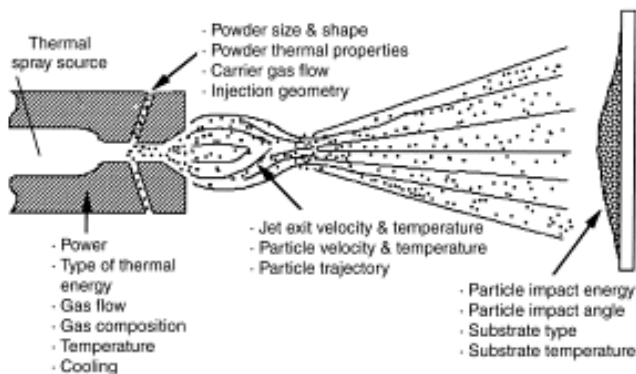


**Gambar 2.6** *Coating Thermal Spray* (ASM Handbook of Thermal Spray, 2004)





Struktur yang dihasilkan dari thermal spray ini adalah lamellar dan karakteristik hasil *coating* ini dapat dilihat pada Gambar 2.6. Dari gambar tersebut terlihat adanya oksida yang ikut masuk. Oksida ini dihasilkan karena adanya interaksi antara partikel dan lingkungan selama proses deposisi. Selain itu terlihat juga adanya porositas. Porositas ini menyebabkan kohesi dari hasil *coating* buruk dan memungkinkan tingginya laju keausan dan korosi. Porositas umumnya dikaitkan dengan banyaknya partikel yang tidak meleleh pada hasil *coating* (ASM Handbook of Thermal Spray, 2004). Kombinasi parameter sangat berpengaruh dalam menentukan kualitas *coating*.



**Gambar 2.7** Parameter dan Variabel Proses *Thermal Spray*

Perbandingan dari macam-macam teknik pelapisan ditunjukkan dengan Tabel 2.2:



**Tabel 2.2** Perbandingan Properti Beberapa Teknik *Thermal Spray*  
(ASM Handbook of Thermal Spray, 2004).

	Flame spray	HVOF	Air Plasma	Vacuum Plasma
<b>Jet</b>				
Temperatur <i>jet</i> , K	3500	5500	15000	12000
Kecepatan <i>jet</i> , m/s	50-100	500-1200	300-1000	200-600
<b>Particle feed</b>				
Temperatur partikel (max), °C	2500	3300	>3800	>3800
Kecepatan partikel, m/s	50-100	200-1000	200-800	200-600
Material <i>feed rate</i> , g/min	30-50	15-50	50-150	25-150
<b>Deposit/coating</b>				
Densitas (%)	85-90	>95	90-95	90-99
Kekuatan lekat, Mpa	7-25	68	<68	>68
Oksida	Tinggi	Sedang	Sedang	Tidak ada

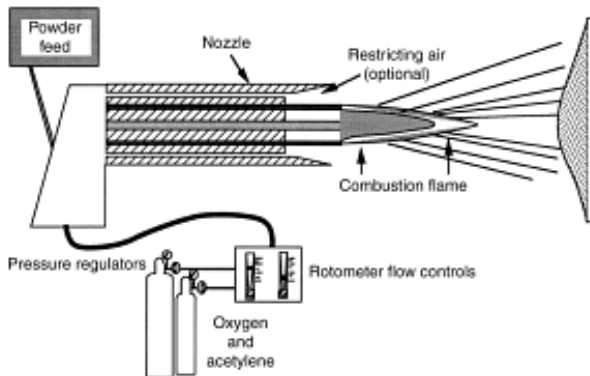
## 2.5 Metode *Flame Spray*

*Flame spray* adalah metode spray termal yang mampu mendepositkan berbagai macam material, mulai dari polimer, keramik, dan logam tahan api. Metode ini menggunakan energi kimia dari pembakaran bahan bakar gas untuk menghasilkan panas. Bahan bakar yang paling banyak digunakan yaitu *oxyacetylene* dengan menggunakan asetilen sebagai bahan bakar



utama dan oksigen. Serbuk, kawat, atau batang dimasukkan secara aksial melalui bagian belakang nosel, kemudian didistribusikan ke arah *flame* pada keluaran nosel. Material bahan baku (*feedstock*) kemudian meleleh. *Droplets* dengan cepat didepositkan ke permukaan substrat oleh aliran gas dan udara.

Pada penelitian ini menggunakan *feed* berupa serbuk (*flame powder*). Kecepatan partikel dari metode ini relatif rendah ( $<100$  m/s), dan kekuatan lekat dari hasil depositnya lebih rendah dari proses *higher velocity* (ASM Handbook of Thermal Spray, 2004).



**Gambar 2.8** Skematik Sistem *Powder Flame Spray*  
(ASM Handbook of Thermal Spray, 2004)

Proses *flame spray* menggunakan energi ikatan kimia dari bahan bakar gas. Pada proses pembakaran, energi melting dan ekspansi dari jet flame dihasilkan dari banyaknya pemecahan ikatan molekuler dalam gas bahan bakar per waktu. Semakin banyak ikatan molekuler yang pecah semakin tinggi laju aliran gas (ASM Handbook of Thermal Spray, 2004). Powder masukan dalam *flame spray* memiliki ukuran 5-100  $\mu\text{m}$ . Ketebalan *coating* yang dapat dihasilkan dari metode ini adalah 100-2500  $\mu\text{m}$ .



Untuk mencegah *residual stress* temperatur permukaan substrat harus dijaga 373-473 K (Powloski, 2008).

## 2.6 Superalloy Hastelloy<sup>®</sup> X

*Superalloy* merupakan paduan logam yang bisa digunakan pada temperatur tinggi. Penamaan *superalloy* dikarenakan mempunyai kekuatan, ketahanan *creep*, kekuatan *stress-rupture*, dan ketahanan dan ketahanan oksida yang luar biasa pada temperatur tinggi (Sulistijono dan Lukman, 2007).

Ada banyak sekali macam paduan nikel yang diaplikasikan pada temperatur tinggi. Salah satunya adalah Hastelloy<sup>®</sup> X. Hastelloy<sup>®</sup> X merupakan paduan dengan kombinasi yang baik antara ketahanan terhadap oksidasi, mudah difabrikasi dan kekuatan pada temperatur tinggi yang baik. Paduan ini juga memiliki ketahanan terhadap *stress corrosion cracking* yang baik. Paduan X menunjukkan keuletan yang baik setelah diekspos yang berkepanjangan pada temperatur sekitar 1200, 1400, 1600°F (650, 760, dan 870°C) selama 16000 jam (Haynes int. book, 1997).

Paduan super ini biasanya digunakan pada ruang pembakaran gas turbin, peralatan luar angkasa, dan beberapa di bidang perminyakan. Komposisi dari paduan Hastelloy<sup>®</sup> X dan beberapa properti material ini ditunjukkan pada Tabel 2.3 dan Tabel 2.4.

**Tabel 2.3** Komposisi Hastelloy<sup>®</sup> X (Haynes Int. book, 1997)

Ni	Cr	Fe	Mo	Co	W	C	Mn	Si	B
47 <sup>a</sup>	22	18	9	1.5	0.6	0.1	1*	1*	0.008

<sup>a</sup>As balance

\*maksimum





**Tabel 2.4** Properti dari Hastelloy® X  
(Haynes Internasional, 1997)

Properti	Temperatur (°C)	Nilai
Titik Leleh	-	1260-1355°C
Resistivitas Elektrik	22	118.36 microhm.cm
Konduktifitas Termal	21	9.1 W/m.K
	200	14.1 W/m.K
	927	27.2 W/m.K
Panas Spesifik	Room	486 J/Kg.K
	538	544 J/Kg.K
	1093	858 J/Kg.K
Koefisien Termal Ekspansi	25-100	$13.0 \times 10^{-6}$ m/m.°C
	25-400	$14.2 \times 10^{-6}$ m/m.°C
	25-700	$15.6 \times 10^{-6}$ m/m.°C

### 2.7 YSZ (*Yttria Stabilized Zirconia*)

Keramik *Yttria Stabilized Zirconia* (YSZ) diaplikasikan pada thermal Barrier Coating (TBC) sebagai termal insulator. Zirkonia pada tekanan ambien terdapat tiga bentuk polimorfi: monoklinik pada temperatur kamar, tetragonal pada temperatur yang lebih tinggi, dan kubik pada temperature yang lebih tinggi lagi (Ilavsky, 2000).



Teknik transformasi zirkonia bergantung bergantung pada stabilisasi bentuk tetragonal temperatur tinggi (t) sehingga akhirnya akan menghasilkan zirkonia yang bersifat metastabil pada temperatur ruang. Stabilisasi parsial atau menyeluruh



dicapai dengan penambahan oksida tertentu ( $Y_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $CaO$ ) pada zirkonia (Sulistijono dan Lukman, 2007).

Keramik zirkonia yang terstabilisasi dikelompokkan menjadi 3 yaitu TZP (*Tetragonal Zirconia Polymorphy*), PSZ (*Partially Stabilized Zirconia*), dan CSZ (*Cubic Stabilized Zirconia*). TZP disebut polikristal zirkonia tetragonal yang mengandung oksida paling sedikit sekitar 2-4 mol%  $Y_2O_3$ . Pembentukan dari serbuk PSZ dilakukan dengan proses sinter dan densifikasi pada rentang temperatur fase tetragonal, sehingga ketika melalui pendinginan sampai temperatur kamar akan menghasilkan kristal tetragonal tunggal yang halus. PSZ merupakan zirkonia dengan stabilisasi sebagian pada fasa tetragonal umumnya pada kadar oksida 7-15 mol%  $Y_2O_3$ , ini menghasilkan struktur tetragonal yang terdistribusi pada matriks kubik. CSZ berada pada komposisi  $Y_2O_3 > 15$  mol%, dengan fase secara keseluruhan kubik.

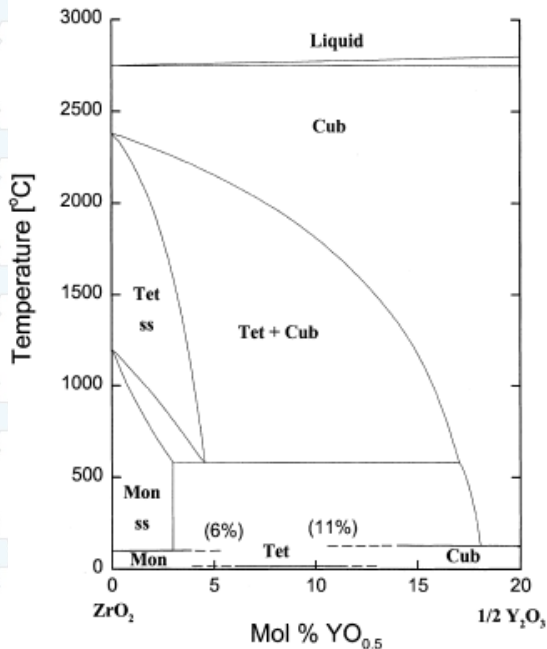
$ZrO_2$  yang distabilkan oleh  $Y_2O_3$  (YSZ - *Yttria stabilized Zirconia*) merupakan salah satu material yang mempunyai konduktivitas termal yang rendah yaitu sekitar 2.3 W/mK dan koefisien termal ekspansi  $11 \times 10^{-6}/^{\circ}C$  yang dapat menurunkan *thermal stress* (G. Moskal, 2009).

Material ini memiliki sifat:

- Temperatur melting yang tinggi 2700 °C
  - Merupakan salah satu keramik dengan konduktivitas termal paling rendah, mampu menurunkan temperatur permukaan material dasar, menaikkan temperatur operasi, mereduksi ketebalan lapisan keramik
  - Koefisien ekspansi termal yang tinggi, mereduksi *stress* akibat perbedaan termal ekspansi antara logam dasar dan *coating* keramik
  - Densitas rendah 6,4 g/cm<sup>3</sup>, sehingga massa yang dibutuhkan tidak terlalu banyak
-



- Modulus elastisitas rendah  $E=50$  GPa, mereduksi termal *stress*
- Kekerasan yang tinggi 14 GPa, membuat YSZ menjadi material yang memiliki ketahanan terhadap erosi dan *impact* (Moskal, 2010)



**Gambar 2.9** Diagram Fase YSZ (Ilavsky,2000)

## 2.8 $Al_2O_3$

$Al_2O_3$  atau alumina adalah salah satu keramik yang digunakan untuk aplikasi pada temperatur tinggi. Alumina memiliki struktur yang keras, abrasif, inert, *wear* resistan yang baik, dan penahan korosi yang sangat baik. Penelitian akhir-akhir ini tentang  $Al_2O_3$



banyak digunakan sebagai *oxygen barrier* (penahan oksigen) pada sistem TBC YSZ/MCrAlY (Karaoglanli, 2011). Selain itu, penambahan alumina ke dalam lapisan YSZ dapat kekerasan dan kekuatan ikatan (X. Q. Cao, et al, 2004).

Qinghe (2009) meneliti tentang pengaruh penambahan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  terhadap termal stabilitas pada YSZ TBC, didapatkan hasil bahwa penambahan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  meningkatkan ketahanan sintering dari YSZ TBC, hal ini terlihat setelah sintering pada  $1100\text{ }^\circ\text{C}$  selama 300 jam. Komposit YSZ-Alumina yang dicampurkan secara *Mechanical Alloying* (MA) setelah diteliti oleh Yinzhang sun dkk (2011) mampu menghasilkan struktur fasa tetragonal yang equilibrium dan konstan, sehingga akan menaikkan *life time* dari TBC sistem.

**Tabel 2.5** Properti dari  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (*Advance Material Data Sheet*, 2013)

Properti	Nilai
Densitas	$3.95\text{ g/cm}^3$
Modulus Elastisitas	380 GPa
Vickers Hardness	18.1 GPa
CTE	$1 \times 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}$
Konduktivitas Thermal	30 W/m-K
<i>Thermal Shock Resistance</i>	$\Delta T_c = 200$

## 2.9 Komposit $\text{Al}_2\text{O}_3$

Mehdi dalam penelitiannya membandingkan *coating* YSZ dan *coating* komposit YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  di tahun 2012 menarik kesimpulan bahwa *coating* dengan menggunakan komposit YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  memiliki resistansi terhadap oksida yang lebih baik. *Thermally Grown Oxides* (TGO) yang terbentuk lebih tipis dari



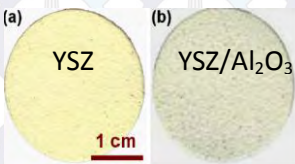


TGO pada coating YSZ. Untuk meningkatkan properti dari pelapisan YSZ, penambahan lapisan komposit YSZ-alumina telah banyak diteliti. Lapisan ini memiliki difusifitas yang rendah terhadap  $O_2$  (Saremi, 2012).

Kekuatan ikatan yang terbentuk mengidentifikasi bahwa *coating* YSZ+ $Al_2O_3$  lebih tinggi daripada YSZ. Selain itu, porositas yang terjadi lebih kecil karena bagian yang menjadi porositas diisi oleh serbuk alumina (Keyvani, 2010).

Berikut beberapa penelitian tentang pengaruh *coating* komposit YSZ- $Al_2O_3$  pada *Thermal Barrier Coating*:

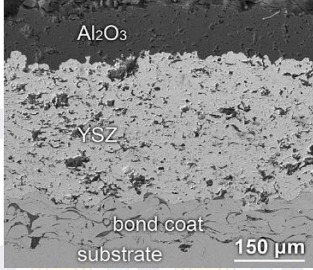
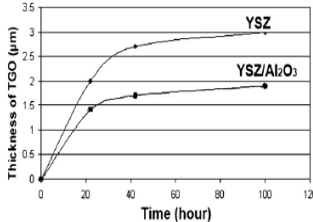
**Tabel 2.6** Kajian Penelitian Sebelumnya

Peneliti	Metode	Hasil
Mehdi Ghobeiti Hasab dan Kamran Rasnuei (2012)	Membandingkan YSZ TBC dengan 50vol% YSZ/ $Al_2O_3$ TBC, untuk melihat TGO dan ketahanan oksidasi kedua struktur	Menghasilkan bahwa YSZ/ $Al_2O_3$ memiliki kelebihan: <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Tebal TGO semakin tipis,</b></li> <li>- BC NiCrAlY yang teroksidasi lebih sedikit,</li> <li>- Ketahanan Oksidasi yang tinggi.</li> </ul>  <p style="text-align: center;"><b>Gambar 2.10</b> Hasil Pelapisan (a) YSZ, (b) YSZ/<math>Al_2O_3</math></p>

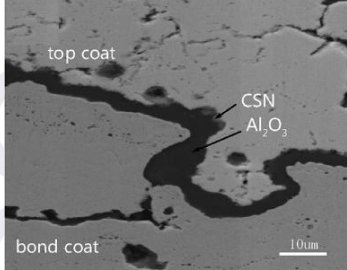
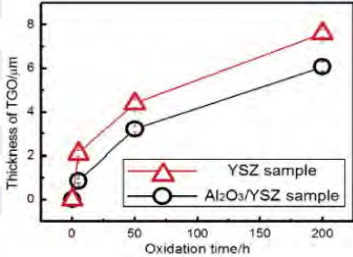


		 <p><b>Gambar 2.11</b> Penampang Melintang (a) YSZ, (b) YSZ/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></p>
Qinghe Yu, Chungen Zhou, Huiyan Zhang, Feng Zhao (2010)	13% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -8YSZ, Variasi Waktu Temperatur Treatment 25 jam, 100 jam dan 300 jam pada 1100° C.	Porositas dari <i>coating</i> menurun dari 23.8% menjadi 18% (pada treatment 100 jam). Porositas yang menurun menyebabkan kontaminasi oksigen yang masuk ke dalam <i>coating</i> menjadi menurun juga, ini akan <b>meminimalkan lapisan TGO</b> .
Mohsen Saremi, Abbas Afrasiabi, Akira Kobayashi (2008)	Melapiskan Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> pada struktur YSZ TBC (di atas TC), Membandingkan ketahanan oksidasi dan struktur mikro (dilihat dari ketebalan TGO) dengan YSZ TBC konvensional setelah pengujian termal 1100 °C selama 22, 42 dan 100 jam.	<b>Ketebalan lapisan TGO pada Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/YSZ lebih kecil</b> daripada YSZ TBC konvensional. Struktur kluster oksida pada Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /YSZ menurun dari YSZ TBC konvensional. Sehingga disimpulkan adanya lapisan Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> diatas YSZ TC mengurangi penetrasi Oksigen dari lingkungan.



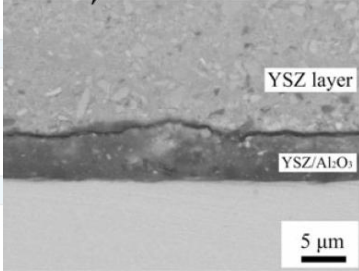
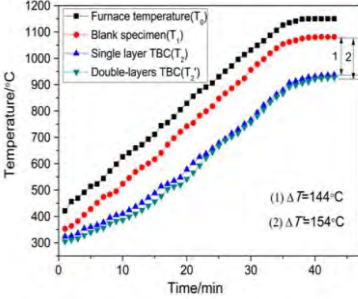
		 <p><b>Gambar 2.12</b> Penampang Melintang TBC dengan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></p>  <p><b>Gambar 2.13</b> Laju Pertumbuhan TGO</p>
<p>YanJun Li, Youtao Xie, Liping huang, Xuanyong Liu, Xuebin Zheng (2012)</p>	<p>Melapiskan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pada struktur YSZ (diantara TC/BC). Melihat pengaruhnya terhadap pertumbuhan TGO dan <i>Residual Stress</i> setelah <i>Thermal test</i> pada 1100 °C selama 30 menit dan berulang 137 <i>cycle</i>.</p>	<p>Pada YSZ/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> lapisan TGO banyak terdiri atas Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan kluster Oksida sangat sedikit dijumpai beda halnya dengan YSZ TBC konvensional yang memiliki banyak Kluster Oksida. <b>TGO menjadi lebih dense.</b> <i>Residual Stress</i> pada YSZ/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> juga menurun, dengan kata lain <b>ketahan terhadap spallation naik (adhesivitas naik).</b></p>



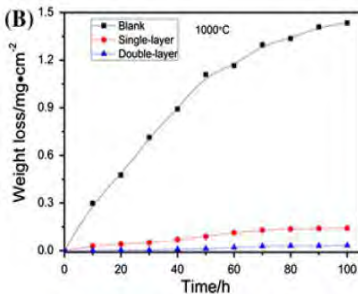
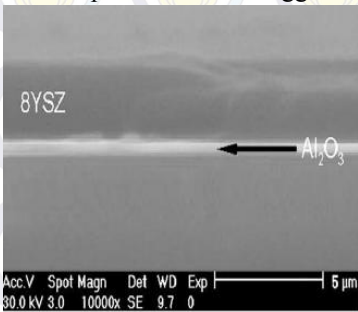
		 <p><b>Gambar 2.14</b> Penampang Melintang Daerah TGO pada TBC</p>												
<p>C. Zhu, A. Javed, P. Li, F. Yang, G.Y. Liang, P. Xiao (2012)</p>	<p>Melapiskan Al di atas TC YSZ setebal ~1 mikron, kemudian dipanaskan pada 1000 °C selama 0,5 jam menghasilkan struktur Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/YSZ. Membandingkannya dengan YSZ TBC konvensional dari segi ketebalan TGO dan struktur mikro setelah uji termal pada 1200 °C 5, 50, dan 200 jam serta <i>Thermal cycle</i> pada 1000 °C selama 240 jam.</p>	<p><b>Ketebalan TGO menurun dibanding YSZ TBC konvensional</b> dari 7.6 ±0.2 µm menjadi 6.1±0.2 µm artinya adanya kehadiran Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> membuat oksigen dari luar menjadi terhalang. Adanya formasi Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/YSZ membantu menstabilkan fasa tetragonal.</p>  <table border="1"><caption>Data for Gambar 2.15</caption><thead><tr><th>Oxidation time/h</th><th>YSZ sample Thickness of TGO/µm</th><th>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/YSZ sample Thickness of TGO/µm</th></tr></thead><tbody><tr><td>0</td><td>~2.5</td><td>~1.0</td></tr><tr><td>50</td><td>~4.5</td><td>~3.5</td></tr><tr><td>200</td><td>~7.5</td><td>~6.0</td></tr></tbody></table> <p><b>Gambar 2.15</b> Perbandingan Tebal TGO</p>	Oxidation time/h	YSZ sample Thickness of TGO/µm	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /YSZ sample Thickness of TGO/µm	0	~2.5	~1.0	50	~4.5	~3.5	200	~7.5	~6.0
Oxidation time/h	YSZ sample Thickness of TGO/µm	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /YSZ sample Thickness of TGO/µm												
0	~2.5	~1.0												
50	~4.5	~3.5												
200	~7.5	~6.0												



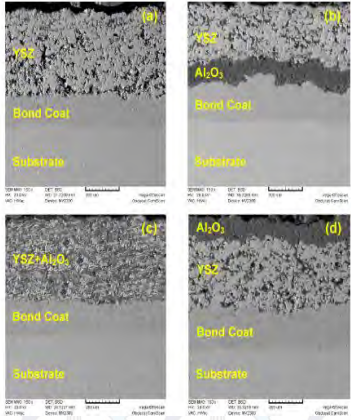


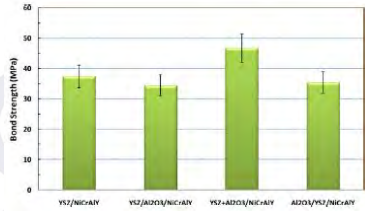
<p>C. Ren, Y.D He, D.R Wang (2011)</p> <p>Melapiskan komposit YSZ/<math>\text{Al}_2\text{O}_3</math> (95% YSZ - 5%<math>\text{Al}_2\text{O}_3</math>) pada daerah di antara YSZ dan Substrat dengan kata lain C. Ren dkk mencoba mengganti lapisan <i>bond coat</i> (BC) konvensional MCrAlY dengan komposit YSZ/<math>\text{Al}_2\text{O}_3</math>.</p> <p><i>Thermal Oxidation Test</i> pada 1000 °C dan 1100 °C selama 200 jam setiap 10 jam dikeluarkan dan ditimbang untuk mengetahui kenaikan berat akibat oksidasi.</p>	<p><b>Menghasilkan lapisan TGO yang sangat tipis.</b></p>  <p><b>Gambar 2.16</b> Penampang Melintang TBC dengan YSZ/<math>\text{Al}_2\text{O}_3</math></p>  <p><b>Gambar 2.17</b> Kinetika Oksidasi Tiap Sampel</p> <p>Dari kurva Kinetika Oksidasi didapatkan bahwa ketahanan oksidasi dari substrat meningkat.</p>
--	--



		 <p><b>Gambar 2.18</b> Kurva <i>Weight Loss</i> Tiap Sampel</p> <p>Dari kurva Pengurangan Berat menunjukkan bahwa ketahanan terhadap pengelupasan meningkat.</p>
<p>C. Amaya, W. Aperador, J.C. Caicedo, F.J. Espinoza-Beltran, J. Munoz-Saldana, G. Zambrano, P. Prieto (2009)</p>	<p>Melapiskan Al-<math>\text{Al}_2\text{O}_3</math> sebagai BC dan 8YSZ top coat, untuk mengetahui karakteristik elektrokimianya setelah pengujian thermal pada 700 selama 2, 4, 6 jam</p>	<p><b>Menghasilkan konduktivitas termal yang lebih rendah</b> dari Metal substrate. Hal ini membuat ketahan panas semakin tinggi.</p>  <p><b>Gambar 2.19</b> Penampang Melintang TBC (Amaya dkk, 2009)</p>
<p>M. Saremi, Z. Valefi,</p>	<p>Melapiskan komposit YSZ</p>	<p>Menghasilkan kesimpulan bahwa <i>coating</i> dengan <b>penambahan</b></p>

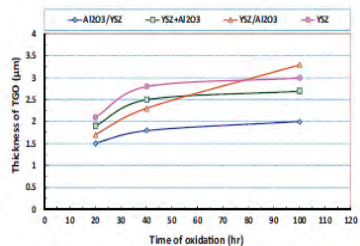


<p>N. Abaeian (2012)</p>	<p>dengan variasi wt % alumina (5, 10, 15) untuk mengetahui pengaruhnya terhadap ketahanan oksida, korosi temperatur tinggi, ketahanan termal, dan kekuatan lekat dibanding coating tanpa komposit</p>	<p><b>komposit memiliki ketahanan termal dan korosi temperatur tinggi yang lebih baik dibandingkan coating tanpa lapisan komposit.</b> Kekuatan lekat dan ketahanan termal YSZ-15 wt % lebih baik dari YSZ-5 dan 10 wt % alumina. <b>Coating YSZ-15 wt % memiliki properties yang lebih baik dari YSZ-5 dan 10 wt % alumina.</b></p>
<p>A. Keyvani, M. Saremi, M. Heydarsadeh Sohi (2010)</p>	<p>Membandingkan beberapa cara coating YSZ-alumina dengan coating YSZ.</p>	 <p><b>Gambar 2.20</b> Coating Spesimen Uji</p>



**Gambar 2.21** Perbandingan Kekuatan Lekat

Kekuatan lekat YSZ+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> paling tinggi. Porositas YSZ+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> lebih kecil karena bagian yang berporos diisi oleh serbuk alumina. Sehingga alumina berfungsi sebagai efek penguat ikatan.



**Gambar 2.22** Perbandingan tebal TGO

Tebal TGO tereduksi karena adanya penambahan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

M.Saremi,  
Z.Valefi  
(2014)

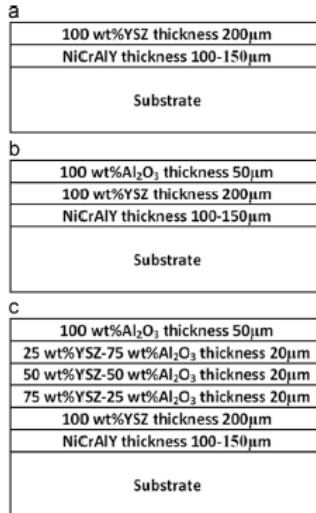
Membandingkan coating YSZ, dan YSZ-alumina

Menghasilkan kesimpulan bahwa alumina dan coating YSZ-alumina lebih dense (porositas lebih kecil) dari coating YSZ. Hal ini dikarenakan rendahnya

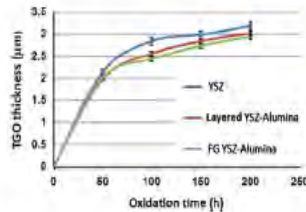




titik leleh  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dibandingkan YSZ.



**Gambar 2.23** Ilustrasi *Coating* Spesimen pada Penelitian

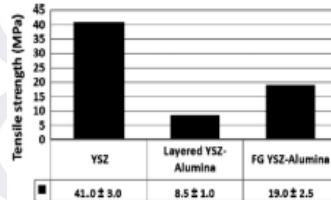


**Gambar 2.24** Perbandingan Tebal TGO

Tebal TGO YSZ-alumina dan FG YSZ-alumina lebih tipis dibandingkan *coating* YSZ. Hal



ini dikarenakan adanya alumina sebagai diffusion barrier pada oksidasi temperatur tinggi.



**Gambar 2.25** Perbandingan *Tensile Strength*

*Tensile strength* yang menurun ini disebabkan perbedaan termal ekspansi antara YSZ dan alumina. Tapi pada FG YSZ-Alumina terjadi efek penguatan karena distribusi *tensile strength* pada lapisan FG.

Resistansi termal FG YSZ-alumina lebih tinggi karena *stress* didistribusikan pada lapisan FG.

Parindra K., Dr. Widyastuti (2014)	Memvariasikan <i>feed rate</i> (8, 14, 20 g/min) dan komposisi $\text{Al}_2\text{O}_3$ (5, 15, 30 wt%) terhadap ketahanan termal dan kekuatan lekat pada YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$ /YSZ <i>double layer</i> TBC	Berdasarkan pengujian <i>Thermal Torch</i> didapatkan bahwa sampel yang memiliki tingkat kerusakan paling rendah adalah 15% $\text{Al}_2\text{O}_3$ /8YSZ, 8gr/min, pengujian lekat didapatkan bahwa nilai paling baik terdapat pada komposisi 15% $\text{Al}_2\text{O}_3$ /8YSZ, 14 gr/min yaitu 10 Mpa, dan tebal TGO paling tipis terdapat pada 15% $\text{Al}_2\text{O}_3$ /8YSZ, 14 gr/min.
------------------------------------	--	--



M. Sofyan Lazuardi, Dr. Widyastuti (2014)	Memvariasikan komposisi $\text{Al}_2\text{O}_3$ (5, 15, 30 wt%) dan <i>spray distance</i> (150, 200, 250 mm) terhadap ketahanan termal dan kekuatan lekat pada YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$ /YSZ <i>double layer</i> TBC	Nilai oksida terendah pada YSZ/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ 30% 11.83wt%, Jarak spray memberikan pengaruh terhadap kekuatan lekat dengan nilai yang paling stabil didapatkan pada jarak 200 mm YSZ/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ 30% 20,4 MPa.
---	--	---

## 2.10 Bond Coat MCrAlY

Penggunaan *bond coat* pada permukaan yang kasar memberikan kombinasi yang baik terhadap *metallurgical bonding*. Selain karena adanya *mechanical interlocking* dengan adanya permukaan yang kasar juga karena sifat *self-bonding* yang dimiliki oleh *bond coat*. *Self-bonding* yang terjadi karena adanya interaksi secara mikroskopis antara substrat dan *bond coat* (ASM *Handbook of Thermal Spray*, 2004).

Partikel panas yang ditembakkan menuju substrat menyebabkan temperatur substrat meningkat pada daerah interaksi partikel dengan substrat. Jika panas cukup tinggi untuk membuat substrat meleleh, reaksi fusi akan terjadi dalam bentuk *alloy layer* secara mikroskopik. Namun jika tidak terjadi *melting*, interaksi temperatur tinggi hanya terjadi secara difusi *solid-state* pada lapisan ikatan paduan (ASM *Handbook of Thermal Spray*, 2004).

*Bond coat* MCrAlY memiliki nilai konduktivitas termal yang rendah sama seperti material keramik pada umumnya. *Bond coat* ini dapat mereduksi temperatur. Adanya kandungan aluminium dan kromium memberikan resistansi oksida dan korosi temperatur



tinggi. Konten optimal dari bond coat tipe ini adalah kromium 5-38%, aluminium 8-13%, yttrium 0,5-1%, dan sisanya adalah komponen lain yaitu Ni. Pengaruh unsur-unsur yang ada pada MCrAlY adalah sebagai berikut:

- Kobalt memiliki kemampuan untuk mensubsitusi atom Ni secara mudah dan meningkatkan ketahanan oksidasi, terutama pada lingkungan Sulfur.
- Cr menyebabkan terbentuknya oksida kromium ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), yang menaikkan ketahan oksidasi, dan mengurangi penggunaan Al guna untuk mendapatkan fase  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ .
- Yttrium menaikkan adhesivitas dari oksida yang terbentuk seperti  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  (G.Moskal, 2009)

### 2.11 TGO (*Thermally Grown Oxide*)

*Thermally Grown Oxide* (TGO) merupakan produk hasil reaksi pada *Thermal Barrier Coating* (TBC). TGO adalah lapisan oksida tipis yang terbentuk di antara *bond coat* dan *top coat*. TGO terdiri dari komposisi utama yaitu  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , dan  $\text{NiAl}_2\text{O}_4$ . TGO merupakan faktor kunci untuk mengontrol *lifetime* dari TBC (Saremi, 2014). Meskipun lapisan ini tipis (3-10  $\mu\text{m}$ ) TGO ini memiliki densitas dengan energi yang tinggi yang dapat menyebabkan mekanisme perpatahan pada struktur (Evans, 2001).

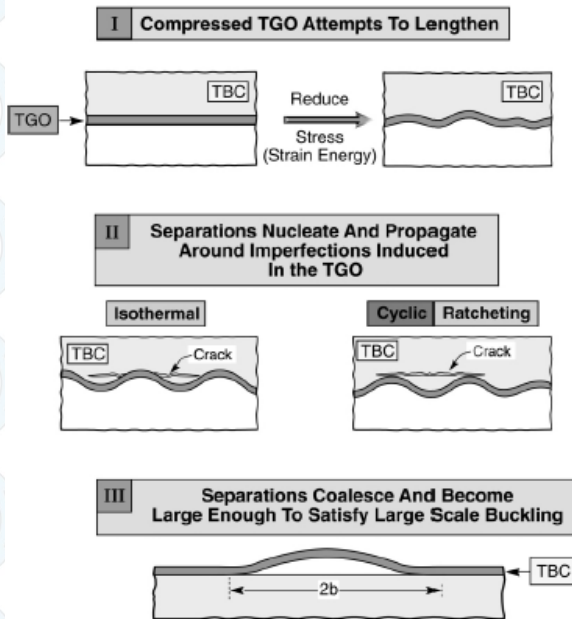
Mekanisme terjadinya *Thermally Grown Oxide* ini adalah oksigen berdifusi dari pori-pori kemudian bereaksi dengan Al, Cr, atau Ni dari *bond coat*. TGO ini dapat tumbuh secara bertahap dan menyebabkan *stress* pada layer TBC yang dapat menyebabkan pemisahan atau membuat *microcracks* (Keyvani, 2010).





Mekanisme *failure* pada TBC akibat TGO adalah:

- Pertumbuhan TGO menginduksi adanya tegangan pada YSZ/TGO *interface*
- Terjadi propagasi *lateral crack* seiring *thermal cycling* yang diberikan
- Ketika *lateral crack* mencapai nilai kritis tertentu, *coating* gagal oleh mekanisme delaminasi dan *buckling*



**Gambar 2.26** Ilustrasi *Failure* TBC Akibat TGO (Evans, 2001)

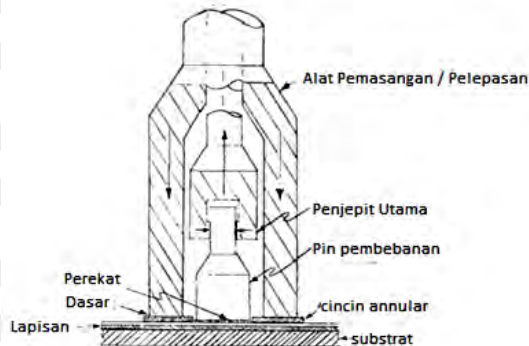
## 2.12 Adhesivitas dari Struktur TBC

Kekuatan lekat dari TC terhadap BC dipengaruhi oleh adanya perubahan temperatur kerja, hal ini karena adanya koefisien ekspansi termal yang berbeda antar TC dan BC menyebabkan adanya sistem tarik-menarik atau yang disebut



*Thermal Mismatches* (Sloof dan Nijdam, 2008). Disamping adanya *Thermal Mismatches* kekuatan lekat dari TC juga ditentukan oleh adanya pengaruh dari lingkungan, misalnya saja terbentuknya lapisan TGO (*Thermally Grown Oxide*) diantara lapisan TC dan BC hal ini akan melemahkan kekuatan lekat dari TBC dan membuatnya mudah mengalami pengelupasan (Okazaki dkk., 2013).

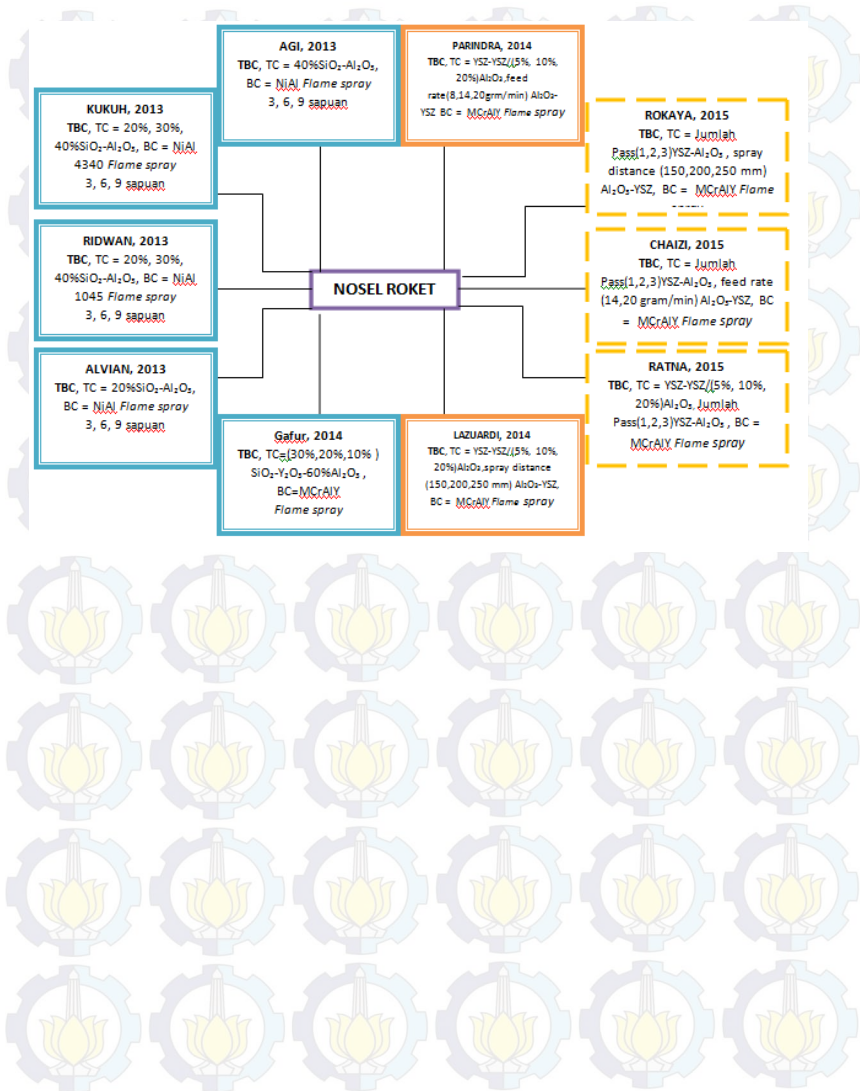
Pengujian kekuatan lekat dari struktur TBC yaitu dengan menggunakan ASTM D4541 *Portable Adhesion Tester* pada Gambar 2.26 seperti yang dilakukan oleh Ridwan Sunarya (2013).

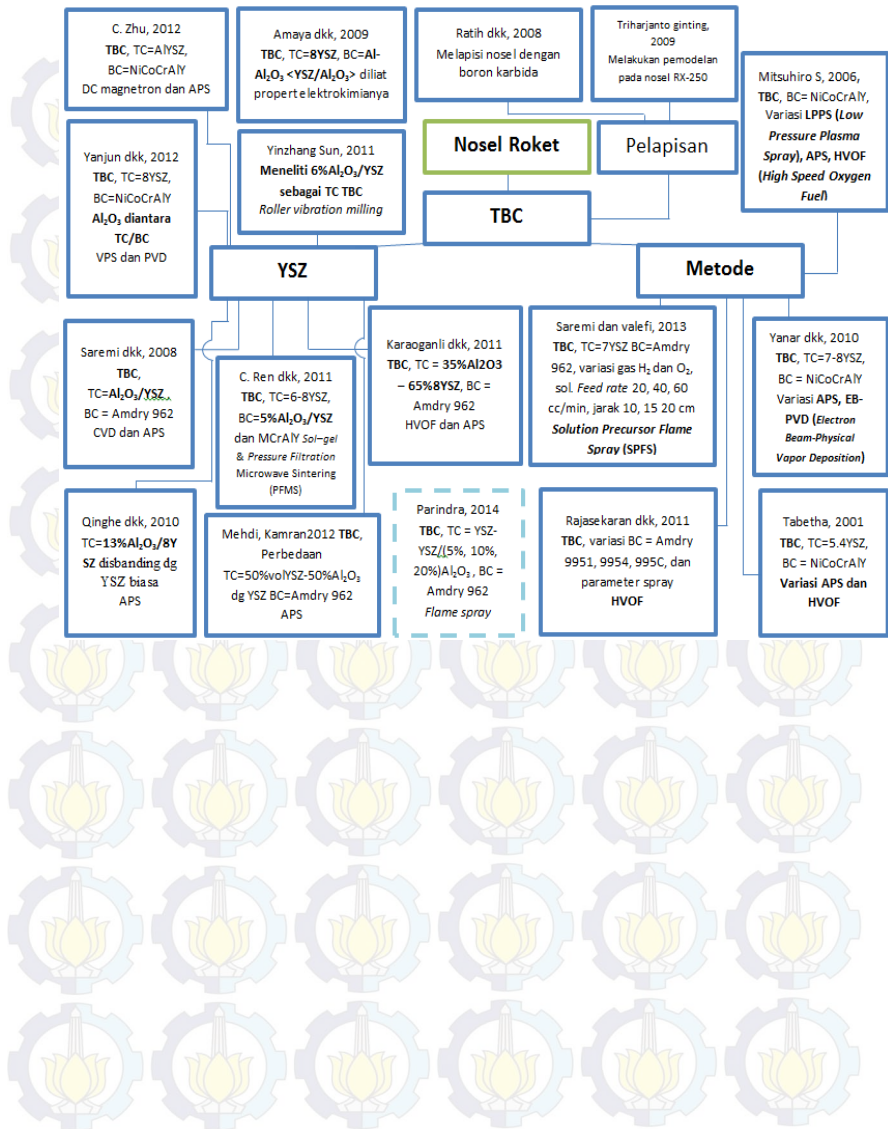


**Gambar 2.27** *Portable Adhesion Tester* (ASTM D4541, 2009)



## 2.13 Kajian Penelitian Sebelumnya

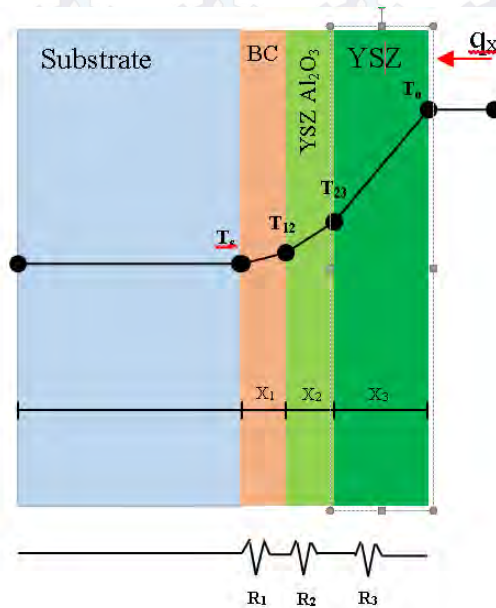








## 2.14 Perhitungan Ketebalan Lapisan *Coating* Ditinjau dari Transfer Panas



**Gambar 2.28** Skema Proses Transfer Panas dari Struktur *Double Layer TBC*

Keterangan simbol:

$x_1$  = tebal *bond coat* (m)

$x_2$  = tebal komposit YSZ/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (m)

$x_3$  = tebal YSZ (m)

$T_s$  = Temperatur *surface* dari substrat (K)

$T_o$  = Temperatur *outer* (nosel gas) (K)

$T_{12}$  = Temperatur *surface* 1 2 (K)

$T_{23}$  = Temperatur *surface* 2 3 (K)

$k_1$  = Koef. Konduktivitas termal *bond coat* (Watt/m.K)



$k_2$  = Koef. Konduktivitas termal komposit YSZ/ $\text{Al}_2\text{O}_3$   
(Watt/m.K)

$k_3$  = Koef. Konduktivitas termal YSZ (Watt/m.K)

$q_x$  = Heat flux (Watt/m<sup>2</sup>)

$R_1$  = Thermal resistan (m<sup>2</sup>K/W)

Nilai  $T_s$  yang diinginkan adalah antara kisaran temperatur kerja *superalloy* **870° C** (Haynes book, 1997). Nilai  $T_o$  = **1200° C** (berdasarkan HTPB propelan dengan berat 1,8 ton) Dicari ketebalan dari lapisan *coating* yaitu  $x_{\text{total}} = x_{\text{bc}} + x_{\text{AlY}} + x_{\text{Y}}$  untuk menahan  $\Delta T = 1200 - 870^\circ \text{C} = \mathbf{330^\circ \text{C}}$ . Bila diinginkan lapisan YSZ menahan **200° C**, lapisan YSZ/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  menahan **100° C**, dan sisanya pada bondcoat **30° C**. Dengan asumsi 1D *Steady State Conduction* maka:

Dari literatur diketahui bahwa:

$T_o$  = 1200° C = 1473 K

$T_{23}$  = 1200° C – 200° C = 1000° C = 1273 K

$T_{12}$  = 1000° C – 100° C = 900° C = 1173 K

$T_s$  = 870° C = 1143 K

$k_3$  = 2.3 Watt/m.K (Moskal, 2010)

$k_2$  = 2.2 Watt/m.K (Hongbo dkk, 2002)

$k_1$  = 7-9 Watt/m.K (Untuk Ni *based alloy*) ~ 8Watt/m.K

$q_x$  = 2 MWatt/m<sup>2</sup> (A. Alper Ozalp, 2005)

Dengan menggunakan Hukum Fourier:

$$q'_x = K \frac{dT}{dx} \text{ (Fourier Law)}$$

$$R = \frac{x}{K.A} \text{ (Thermal Resistance)}$$



Maka, *thermal resistance* tiap lapisan:

$$R'_1 = x_1/k_1 = x_1/8$$

$$R'_2 = x_2/k_2 = x_2/2.2$$

$$R'_3 = x_3/k_3 = x_3/2.3$$

$$q_x = \frac{T_o - T_{23}}{R'_3}, q_x = \frac{T_{23} - T_{12}}{R'_2} \text{ dan } q_x = \frac{T_{12} - T_o}{R'_1}$$

Menghasilkan:

$$q'_x = \frac{T_o - T_{23}}{R'_3} = \frac{T_o - T_{23}}{\frac{x_3}{k_3}}$$

$$> x_3 = \frac{k_3(T_o - T_{23})}{q'_x} = \frac{2.3(200)}{2 \times 10^6} = 0.0023 \text{ m} = 0.23 \text{ mm} = 230 \mu\text{m},$$

$$> x_2 = \frac{k_2(T_{23} - T_{12})}{q_x} = \frac{2.2(100)}{2 \times 10^6} = 0.00011 \text{ m} = 0.11 \text{ mm} = 110 \mu\text{m},$$

$$> x_1 = \frac{k_1(T_{12} - T_s)}{q_x} = \frac{8(30)}{2 \times 10^6} = 0.00012 \text{ m} = 0.12 \text{ mm} = 120 \mu\text{m},$$

Kesimpulan :

Tebal dari lapisan *bond coat* = **120  $\mu\text{m}$** , YSZ/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  = **110  $\mu\text{m}$**  dan YSZ = **230  $\mu\text{m}$**



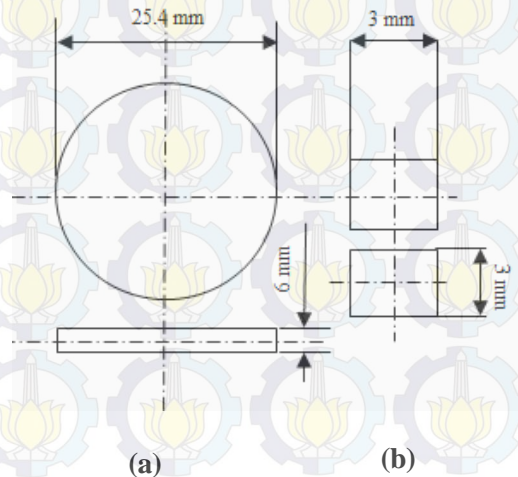
### BAB III METODOLOGI DAN PENELITIAN

#### 3.1 Bahan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini antara lain sebagai berikut:

##### a. Hastelloy® X

Pada penelitian ini sebagai substrat digunakan material Hastelloy® X (Haynes Int. USA) dengan ukuran diameter 25.4 mm dan tebal 6 mm sebanyak 54 sampel a dan 9 sampel b.

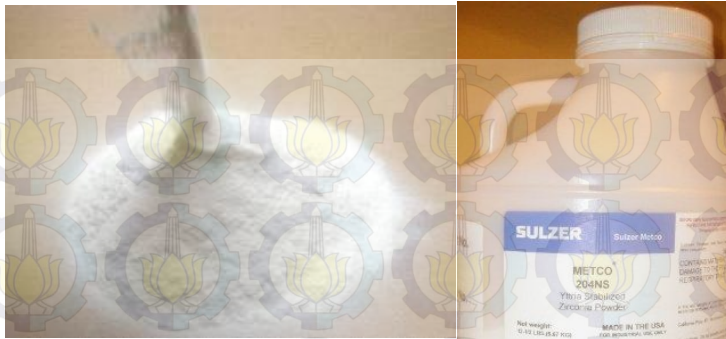


**Gambar 3.1** Spesimen Hastelloy® X  
(a) Uji *Thermal Torch* dan *Pull Off* (b) Uji TGA  
(*Thermografimetri*)

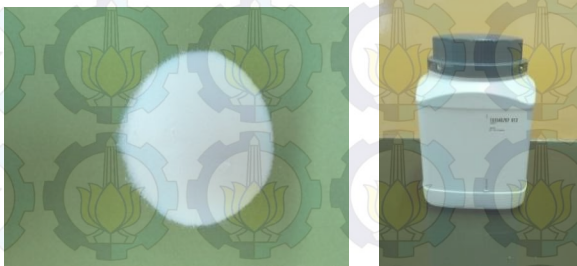
##### b. Serbuk 8% $Y_2O_3$ - $ZrO_2$ (8 *Yttria Stabilized Zirconia*/YSZ)

Serbuk YSZ (Inframat Advanced Materials, USA) digunakan sebagai *top coat* dan pada material komposit pada YSZ- $Al_2O_3$  dengan ukuran butir rata-rata  $71.88 \mu m$ .

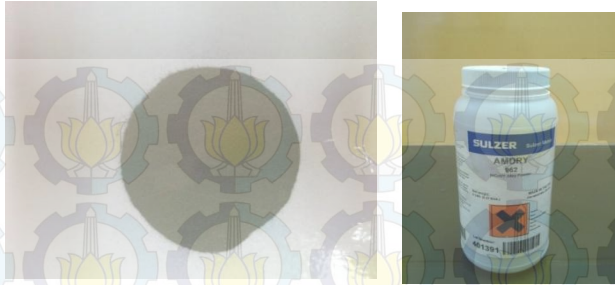


**Gambar 3.2** Serbuk YSZ**c.** Serbuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Alumina)

Serbuk Alumina yang digunakan adalah  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  (Merck, Jerman) dengan ukuran butir rata-rata sebesar  $37.7 \mu\text{m}$ . Material ini digunakan pada komposit  $\text{YSZ-Al}_2\text{O}_3$  yang berada di antara *top coat* dan *bond coat*.

**Gambar 3.3** Serbuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$ **d.** Serbuk MCrAlY

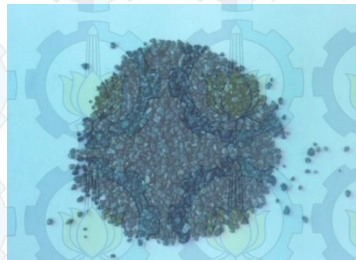
Serbuk MCrAlY yang digunakan adalah Amdry 962 (Sulzer Metco, USA) dengan komposisi Ni = bal., Cr = 21-23%, Al = 9-11%, Y = 0.8-1.2% dan ukuran butir rata-rata  $71.88 \mu\text{m}$ .



Gambar 3.4 Serbuk Amdry 962

#### e. Serbuk Pasir Alumina

Serbuk pasir alumina yang digunakan adalah *Brown Al-Oxide CF 16* dengan ukuran butir rata-rata yaitu  $646.2 \mu\text{m}$ . Serbuk ini digunakan untuk mengkasarkan permukaan substrat di mana serbuk ini disemprotkan pada tekanan 6 bar menggunakan alat *sand blasting*.



Gambar 3.5 Serbuk *Brown Al-Oxide Cf 16*

### 3.2 Alat Penelitian

Peralatan-peralatan penunjang yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

#### a. Neraca Digital Analitik

Neraca digital (Mettler Toledo) yang digunakan memiliki tingkat ketelitian yang sangat tinggi. Neraca ini digunakan untuk



menghitung berat dari  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dan YSZ sebelum dilakukan proses *mixing*.

Spesifikasi alat:

- Kapasitas Maksimum 320 g
- Daya Baca 0.001 g
- Waktu setting 1 detik
- Berat alat 4,6 Kg
- Dimensi weighing pan  $\varnothing 90\text{mm}$
- Maksimum tinggi benda 237mm



**Gambar 3.6** Neraca Digital Analitik

**b.** *Siever Shaker* dan *Sieve*

Alat *Siever Shaker* (Fritsch Analysette 3) dan *sieve* digunakan untuk mengayak serbuk agar memiliki distribusi ukuran partikel yang sama dan sesuai dengan yang diinginkan.

Spesifikasi alat:

Dry sievieng

Ukuran *sieving* : 20  $\mu\text{m}$ -63 mm

*Maximum sample* : for *sieve* <63 mm, up to 2 kg  
for *sieve* <100  $\mu\text{m}$ , up to 100 g



Waktu <i>sieving</i>	: 3 – 20 menit
Maksimum berat saringan	: 3 kg
Amplitudo	: 0.1 3 mm
Amplitudo control	: <i>Automatic</i>
Diameter saringan	: 100 – 200 mm
Maksimum tumpukan saringan	: 10 buah, t = 50 mm 16 buah, t = 25 mm



Gambar 3.7 Alat Siever Shaker

c. *Planetary Ball Mill*

*Planetary Ball Mill* (Retch PM 400) digunakan untuk mencampur (*mixing*) serbuk  $Al_2O_3$  dan YSZ agar tercampur secara homogen satu sama lain.

Spesifikasi alat:

<i>Grinding ball size</i>	: 10 mm dan 30 mm
<i>Grinding jar size</i>	: 12 mL/ 25 mL/ 50 mL/ 80 mL/ 125 mL/ 250 mL
<i>Grinding time</i>	: 00:00:01 – 99:59:59
<i>Feed size</i>	: <10 mm
<i>Final fineness</i>	: < 1mm (serbuk logam, keramik)





**Gambar 3.8** Planetary Ball Mill Restch PM 400

**d.** Pengering Serbuk (*Dryer*)

Pengering serbuk ini digunakan untuk mengeringkan serbuk sebelum dilakukan *thermal spray*. Hal ini dilakukan untuk menghilangkan kadar air pada serbuk.



**Gambar 3.9** *Dryer*

**e. Sand Blasting**

Alat *Sand Blasting* digunakan untuk mengkasarkan permukaan dari substrat (Hastelloy® X) agar *bond coat* dapat menempel dengan baik dengan menggunakan serbuk pasir alumina. Tingkat kekasaran pada proses ini sekitar 50-60  $\mu\text{m}$ .

**Gambar 3.10** Alat *Sand Blasting***f. Flame Spray**

*Flame Spray* digunakan untuk mendeposisikan serbuk *bond coat* dan keramik pada substrat. Alat ini menggunakan nyala api dari pembakaran gas *acetylene* dan oksigen untuk melelehkan serbuk.

**Gambar 3.11** Alat *Flame Spray*



**g. Oxy Acetylene**

Alat ini merupakan alat las karbit yang umumnya untuk pengelasan logam komersial. Digunakan untuk melakukan uji *thermal shock* dengan temperatur sekitar 1200 °C.



**Gambar 3.12** Peralatan Las *Oxy Acetylene*

**h. SEM (*Scanning Electron Microscope*) dan EDX**

SEM yang digunakan adalah SEM FEI S50 dengan perbesaran maksimum 10.000X. SEM digunakan untuk melihat struktur mikro dari penampang melintang struktur TBC yang dihasilkan. Dengan SEM ini diharapkan mampu melihat struktur TGO (*Thermally Grown Oxide*) dan EDX digunakan untuk melihat komposisi dari spot yang dipilih.



Gambar 3.13 SEM FEI S50

i. XRD (*X-Ray Diffraction*)

XRD (*X-Ray Diffraction*) yang digunakan adalah XRD X'Pert PAN analytical Cu K $\alpha$ . XRD digunakan untuk melihat kandungan pada lapisan *top coat*, baik sesudah maupun sebelum pemanasan.



Gambar 3.14 XRD X'Pert PAN analytical

j. TGA (*Thermogravimetry*)

Digunakan untuk pengujian *Thermal Exposure* sekaligus melihat pertumbuhan oksida (TGO) sehingga dapat melihat pertumbuhan TGO akibat oksidasi temperatur tinggi. Alat TGA yang dipakai adalah TGA/DSC<sup>1</sup>.





**Gambar 3.15** Thermogravimetry

k. Termometer Inframerah

Digunakan untuk mengukur berapa temperatur dari substrat, *bond coat*, dan *top coat* pada saat pengujian *Thermal Shock Test* menggunakan *oxyacetylene*.



**Gambar 3.16** Termometer IR

l. Alat *Pull Off* (Uji lekat)

Alat *Pull Off* ini digunakan untuk menentukan nilai kelekatan dari struktur TBC yang dihasilkan. Alat ini bertipe *fixed-alignment portable tester type II*.

Spesifikasi alat:

*Type of Equipment* : Handheld Inspection Equipment



Model No.	: 6000, 200, DFT, DPM, UTG, SPG, AT, AIR & RTR Series
Nomenclature	: <i>PosiTest Adhesion Tester</i>
Manufacturer	: Defelsko Corporation
Model	: PosiTest AT-M
Serial No.	: AT09636
Skala ketelitian	: 0.01 MPa



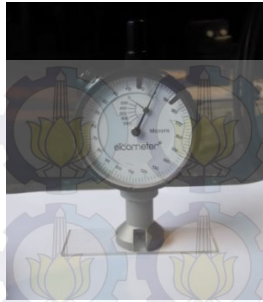
**Gambar 3.17** Alat *Pull Off*

**m.** *Roughness Meter* (Alat Uji Kekasaran Permukaan)

Elcometer 123 *Surface Profile Gauge* digunakan untuk mengukur nilai kekasaran dari substrat (Hastelloy® X) setelah dilakukan *grit blasting*. Selain itu alat ini juga digunakan sebagai pengganti metode AFM untuk mengukur kekasaran permukaan spesimen setelah dilakukan *coating*.

Spesifikasi alat:

Range	: 0 – 1000 $\mu\text{m}$
Scale	: 2 $\mu\text{m}$
Dimension	: 105 x 55 x 25 mm
Weight	: 235 g



Gambar 3.18 Roughness Meter

n. Alat Pendukung

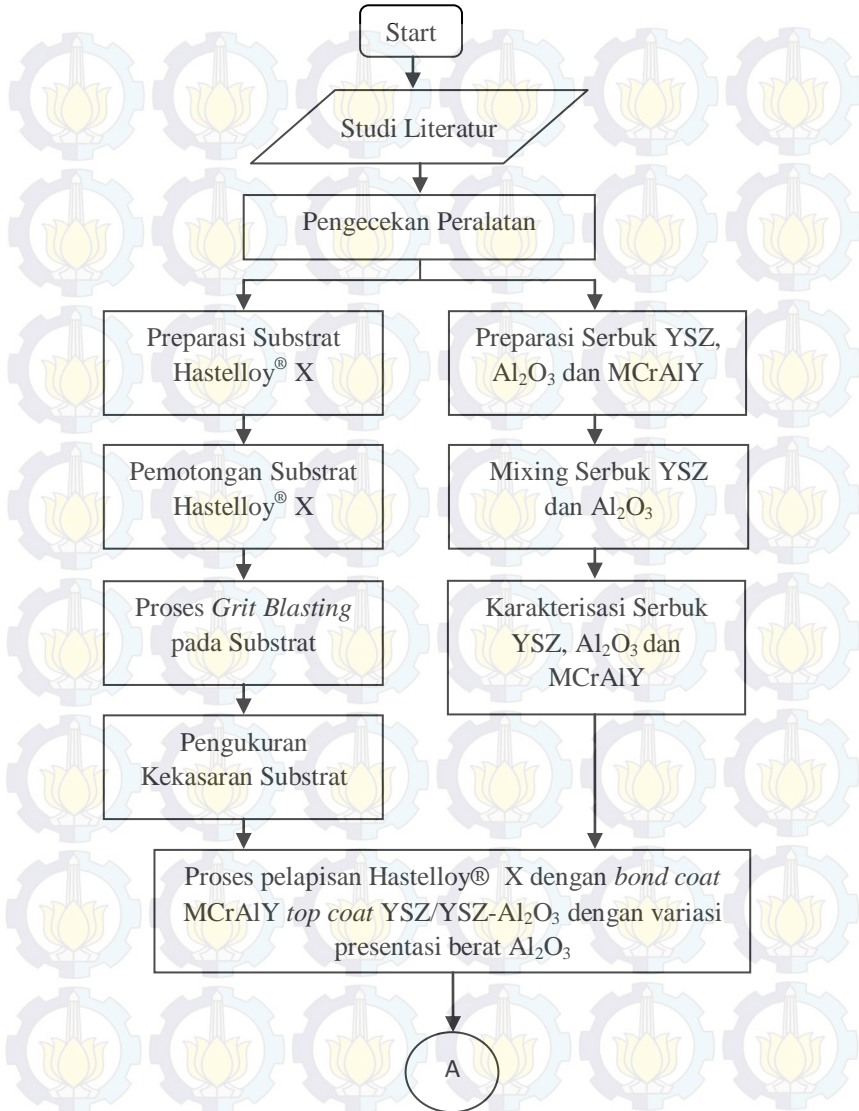
Alat pendukung yang digunakan seperti sarung tangan, masker, wadah tempat sampel, plastik tempat serbuk, dan stopwatch.



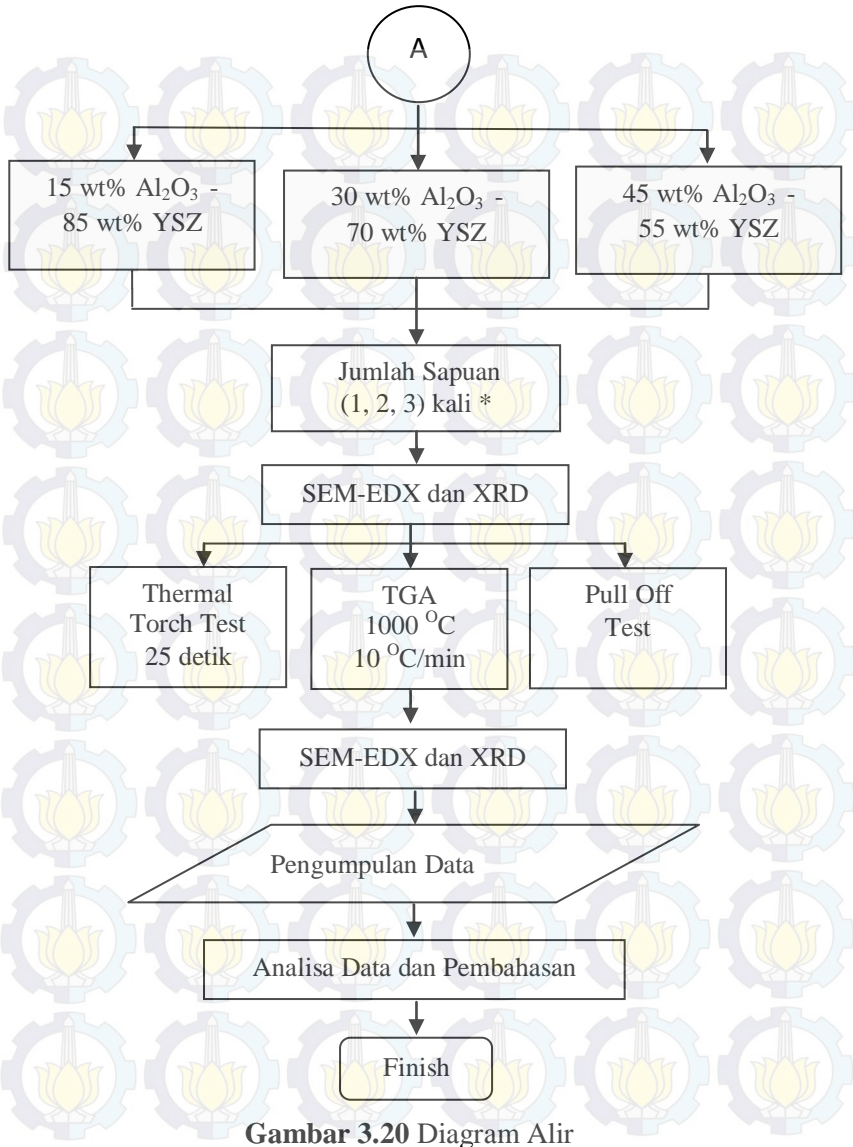
Gambar 3.19 Alat-alat Pendukung



### 3.3 Diagram Alir Penelitian





**Gambar 3.20** Diagram Alir



\*keterangan

-1 kali sapuan = 3 mm/5 detik (untuk uji TGA, SEM, XRD)

-1 kali sapuan = 25.4 mm/42 detik (untuk uji *Pull Off*, *Thermal Torch*)

### 3.4 Rancangan Penelitian

Berdasarkan Diagram alir di atas maka dapat dibuat rancangan penelitian sebagai berikut:

**Tabel 3.1** Rancangan Penelitian

Komposisi wt% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> pada YSZ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Pass	Hasil Pengujian		
		TGA (% m vs T)	<i>Thermal Torch</i> (t)	<i>Pull Off Test</i> (MPa)
15%	1			
	2			
	3			
30%	1			
	2			
	3			
45%	1			
	2			
	3			

Keterangan:

\*Struktur TBC konvensional dengan YSZ juga dibuat sebagai pembanding



### 3.5 Tahapan-tahapan Penelitian

Untuk menghasilkan hasil penelitian yang sesuai dengan harapan maka tahapan-tahapan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

#### 3.5.1 Preparasi Spesimen Hastelloy<sup>®</sup> X

Langkah-langkah yang dilakukan untuk melakukan preparasi pada Hastelloy<sup>®</sup> X adalah sebagai berikut:

1. Spesimen awalnya berbentuk silinder dengan diameter 25.4 mm dengan panjang 1500 mm, sehingga memerlukan pemotongan untuk memperoleh dimensi yang diinginkan (dia = 25.4 mm dengan tebal = 6 mm), berjumlah 54 buah, ini untuk sampel uji *pull off* dan *Thermal Torch* ditambah 1 untuk pembanding dengan *coating* YSZ biasa. Untuk sampel TGA dilakukan pemotongan sesuai dengan Gambar 3.1(b) sejumlah 9 buah. Pemotongan dilakukan dengan *wire cutting* karena material ini memiliki kekerasan yang tinggi dan tidak bisa dilakukan pemotongan dengan hanya gergaji besi.
2. Spesimen yang telah dipotong sebelumnya dilakukan karakterisasi sederhana untuk mengetahui kondisi dari bahan. Karakterisasi yang dilakukan sebatas SEM EDX, XRD dan uji kekerasan saja.
3. Dilakukan *sand blasting* pada permukaan yang akan dilapisi oleh keramik. Proses ini dilakukan agar *coating* dapat melekat erat pada substrat. Nilai kekasaran minimum yang diinginkan adalah 10 µm (DSMTS sulzer metco, 2013).

#### 3.5.2 Preparasi *Bond Coat* MCrAlY

1. Melakukan pengeringan pada serbuk *bond coat* untuk menghilangkan kadar air yang terkandung dalam serbuk.



2. Karakterisasi awal dari *bond coat* menggunakan SEM EDX dan XRD.

3. Melakukan pengayakan menggunakan *siever*, untuk menghasilkan distribusi ukuran partikel yang sama.

#### 3.5.3 Preparasi Keramik YSZ (*Top Coat*)

1. Melakukan pengeringan menggunakan *dryer* untuk menghilangkan kadar air.

2. Karakterisasi awal dari 8YSZ menggunakan SEM EDX dan XRD.

3. Melakukan pengayakan menggunakan *siever*, untuk menghasilkan distribusi ukuran partikel yang sama.

#### 3.5.4 Preparasi Komposit YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$

1. Memasukkan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ke dalam mesin milling berikut bola-bola yang akan digunakan untuk mereduksi ukuran sampai 40  $\mu\text{m}$ . Ukuran dari partikel alumina harus jauh lebih kecil dari ukuran partikel YSZ, hal ini agar menghasilkan efek penguatan yang baik pada matriks YSZ (Yinzhang dkk., 2011)

2. Menjalankan proses milling, proses ini dilakukan dengan mesin Restch PM 400 Planetary Ball Mill. Selanjutnya Melakukan proses pengayakan untuk mendapatkan ukuran  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sebesar 40  $\mu\text{m}$  menggunakan alat *Fritsch Sieve Shaker*, dengan ukuran 80, 50, 30 dan 10  $\mu\text{m}$  dengan amplitude sebesar 2,5 selama 5 menit.

3. Untuk serbuk YSZ tidak perlu dimilling karena ukurannya sudah sesuai yaitu 100  $\mu\text{m}$ .

4. Setelah diperoleh ukuran  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sebesar 40  $\mu\text{m}$ , langkah selanjutnya adalah mencampur serbuk YSZ dengan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dengan komposisi YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  15%, YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  30%, dan

---





YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  45%. Proses ini juga dilakukan dengan mesin milling menggunakan diameter *vial* 10 cm (0,01 m) dengan putaran 350 rpm, ini sesuai dengan putaran minimum untuk mendapatkan hasil mixing yang optimum.

### 3.5.5 Proses Pelapisan Melalui *Flame Spray*

1. Melakukan persiapan pada alat *spray* dengan parameter *spray* seperti yang ditunjukkan pada tabel 3.2.

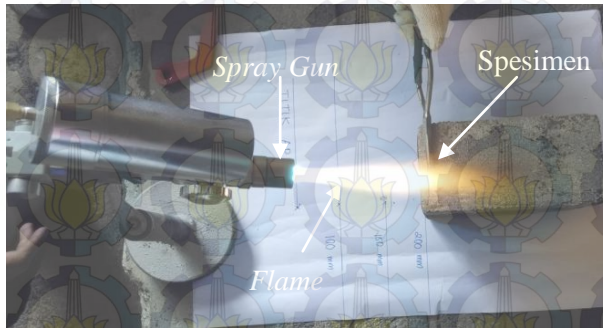
**Tabel 3.2** Parameter *Spray* yang Digunakan

Lapisan	Komposisi wt% $\text{Al}_2\text{O}_3$			Sapuan	<i>Feed Rate</i> (g/min)	Jarak Spray (mm)	Tebal ( $\mu\text{m}$ )
YSZ <i>top coat</i>	-	-	-	1	20	100	230
YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$	15	30	45	1 2 3	20	200	
<i>Bond coat</i>	-	-	-	1	20	200	120

2. Melakukan proses *sand blasting* pada substrat dengan kekasaran minimum yang diinginkan sebesar 10  $\mu\text{m}$ . Dengan adanya permukaan yang kasar akan membuat lapisan *bond coat* dapat menempel dengan baik pada substrat, hal ini karena adanya ikatan secara mekanik.
3. Memanaskan substrat pada temperatur 300-400 °C.
4. Melakukan *spraying* serbuk Amdry 962 (M<sub>2</sub>CrAlY) sebagai lapisan *bond coat* dengan tebal lapisan yang diinginkan ~100  $\mu\text{m}$  dan parameter seperti pada tabel 3.2.
5. Melakukan *spraying* serbuk komposit YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  dengan komposisi sesuai yang direncanakan (tabel 3.2) dan parameter seperti pada tabel 3.2.



6. Melakukan *spraying* serbuk YSZ sebagai *top coat* dengan tebal ~200  $\mu\text{m}$  dan parameter seperti pada tabel 3.2.



(a)



(b)

**Gambar 3.21** Proses Pelapisan dengan *Thermal Spray* (a) Proses Pelapisan Spesimen Uji *Pull Off* dan *Thermal Torch*, (b) Proses Pelapisan Spesimen Uji TGA (*Thermogravimetry*)

### 3.5.6 Pengujian

#### a. *Thermal Torch Test*

Pengujian ini bertujuan untuk melihat ketahanan dari hasil struktur *double layer TBC* yang didapatkan terhadap beban termal langsung. Pengujian menggunakan *Brander* las karbit (*oxy*



*acetylene*) dengan temperatur mencapai 1200 °C selama 25 detik. Kemudian menganalisa *failure* yang terjadi. Setelah itu dikarakterisasi dengan SEM-EDX dan XRD untuk mengetahui hasilnya.

Langkah-langkah pada pengujian ini adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan spesimen yang akan diuji dan alat las.
2. Menempatkan spesimen penyangga.
3. Mengeset nilai dari oksigen dan gas *acetylene* dari alat las. Tipe nyala yang digunakan adalah tipe las *oxidizing*, hal ini untuk menyesuaikan dengan nyala api yang keluar pada nosel roket.
4. Menembakan api ke spesimen tepat pada bagian tengah selama 25 detik.
5. Mendinginkan spesimen di udara.
6. Melakukan pengulangan untuk sampel lain.
7. Menganalisa hasil *failure*.



**Gambar 3.22** Proses Uji *Thermal Torch Oxyacetylene*



**b. Thermal TGA (Non-Isothermal Oxidation Test)**

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui ketahanan dan pertumbuhan oksida (TGO) dari lapisan *double layer TBC* yang didapatkan terhadap beban termal yang kontinu. Pengujian dilakukan dengan menggunakan *Thermogravimetry* (TGA) dengan temperatur 1000 °C dan laju temperatur 10 °C/min kemudian didinginkan secara perlahan menuju temperatur kamar. Kecepatan naiknya temperatur yang digunakan sebesar 10 °C/min (Yinzhang dkk., 2011). Setelah itu dilakukan karakterisasi dengan SEM-DX dan XRD untuk mengetahui hasilnya.

Langkah-langkah yang dilakukan pada pengujian ini adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan spesimen yang akan diuji.
2. *Setting* TGA sesuai yang diinginkan yaitu temperatur tahan 1000 °C kenaikan temperatur 10 °C/min.
3. Meletakkan spesimen pada *crucible*.
4. Menjalankan alat TGA.
5. Setelah selesai didinginkan pada temperatur kamar.
6. Melakukan pengulangan pada sampel lainnya.

**c. Pengujian Morfologi (SEM)**

SEM (*Scanning Electron Microscope*) adalah pengujian untuk melihat struktur morfologi maupun mikro dari material. Pengujian SEM ini dimaksudkan untuk mengetahui struktur bagian atas dan melintang dari *double layer TBC* yang didapatkan sebelum dan setelah dilakukan pengujian termal. Perbesaran dilakukan sampai 5000x, hal dilakukan untuk melihat adanya crack yang sangat kecil setelah pembebanan termal. Disamping SEM juga dilakukan EDX (*Energy Dispersive X-Ray*) untuk melihat fasa-fasa pada spot yang diinginkan. Hal ini dilakukan untuk mengidentifikasi dari lapisan TGO (*Thermally*

---





*Grown Oxide*) yang terbentuk antara lapisan *top coat* dan *bond coat* (Padture, 2002).

Langkah-langkah yang dilakukan pada pengujian ini adalah sebagai berikut :

1. Menyiapkan spesimen yang akan di SEM, termasuk memotong spesimen untuk melihat daerah melintang dari struktur TBC.
2. Membersihkan permukaan spesimen dengan *blower* agar tidak ada kotoran atau debu yang menempel.
3. Meletakkan spesimen pada *holder* dengan memberi perekat *carbon tape*.
4. Memasukkan spesimen beserta *holder* kedalam mesin. Selanjutnya hasil bisa diamati menggunakan komputer.
5. Melakukan untuk sampel lain.

#### d. Pengujian Fasa (XRD)

XRD merupakan alat yang umumnya digunakan untuk mengidentifikasi fasa/unsur/senyawa (analisis kualitatif) dan komposisinya (analisis kuantitatif) dari suatu material. Pengamatan dengan XRD akan saling berhubungan dengan pengamatan dengan SEM, pengamatan dengan SEM akan menjelaskan bagaimana distribusi dari fasa yang teridentifikasi berdasarkan hasil XRD. Pengujian XRD dilakukan pada bagian permukaan lapisan *top coat* dan bagian penampang pada struktur TBC.

Pengujian XRD dilakukan dengan tahapan-tahapan sebagai berikut :

1. Menyiapkan spesimen dan menyesuaikan dengan ukuran yang diharuskan untuk pengujian XRD, bila perlu dilakukan pemotongan untuk penyesuaian.



2. Spesimen yang sudah siap diletakkan pada *holder* dan ditekan agar kompak. Hal ini dilakukan agar penembakkan XRD sesuai dengan yang diinginkan, ini membutuhkan permukaan yang sejajar dengan *holder*.
3. Memasukkan *holder* beserta spesimen ke dalam mesin XRD.
4. Menyalakan mesin XRD dan mengamati hasilnya pada komputer.
5. Melakukan untuk spesimen lain.

e. Pengujian Kekuatan Lekat (*Pull Off Test*)

Pengujian kekuatan lekat dilakukan dengan menggunakan *Portable Adhesive Tester* Tipe II. Standard yang digunakan adalah ASTM D4541. Adapun langkah-langkah yang dilakukan pada pengujian kelekatan ini adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan spesimen yang akan diuji.
2. Melekatkan spesimen pada *dolly*.
3. Menaruh spesimen pada alat uji.
4. Mengkalibrasi alat hingga menunjukkan angka nol. Kemudian menentukan satuan yang akan digunakan. Dalam percobaan ini, satuan yang digunakan adalah MPa.
5. Menekan tuas hingga sampel terlepas dengan *dolly*.
6. Langkah terakhir adalah mencatat nilai yang didapatkan setelah pengujian.
7. Melakukan pengulangan untuk sampel lain.

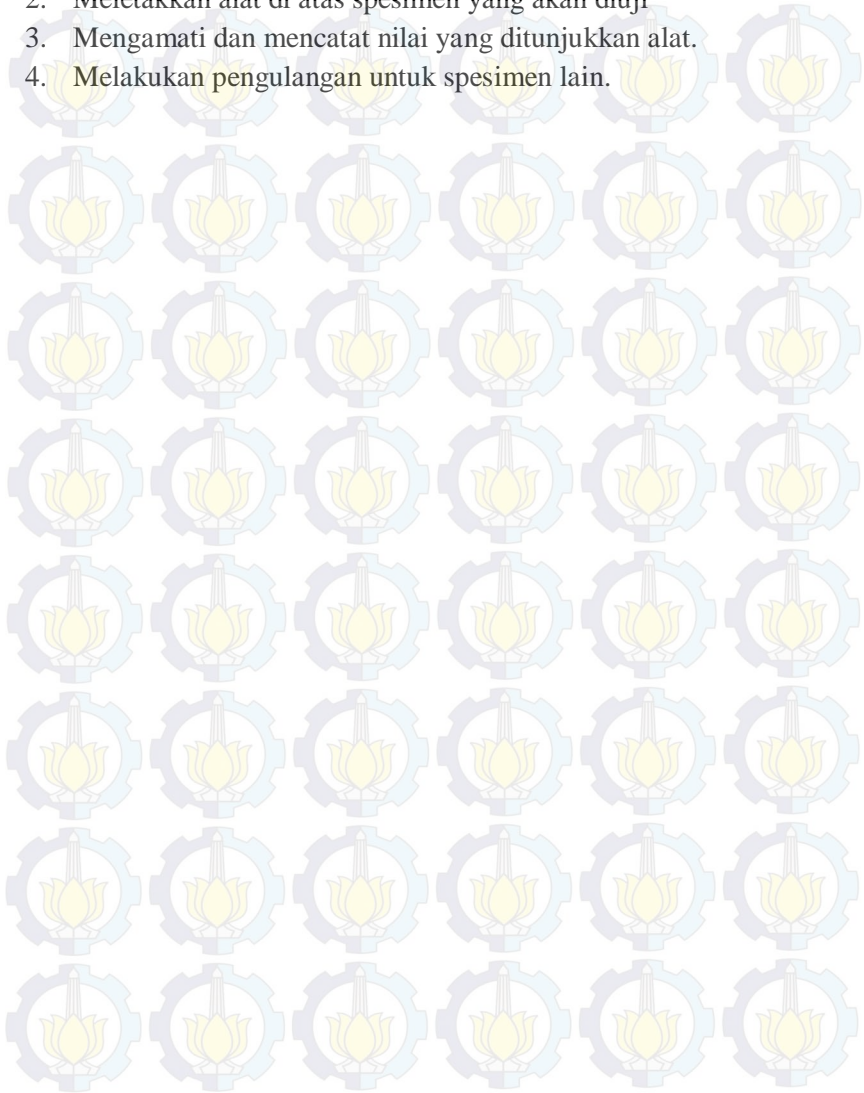
f. Pengujian Kekasaran Permukaan

Pengujian kekasaran permukaan ini dilakukan dengan menggunakan Elcometer 123 *Surface Profile Gauge*. Langkah-langkah yang dilakukan pada pengujian kekasaran permukaan ini adalah sebagai berikut:

---

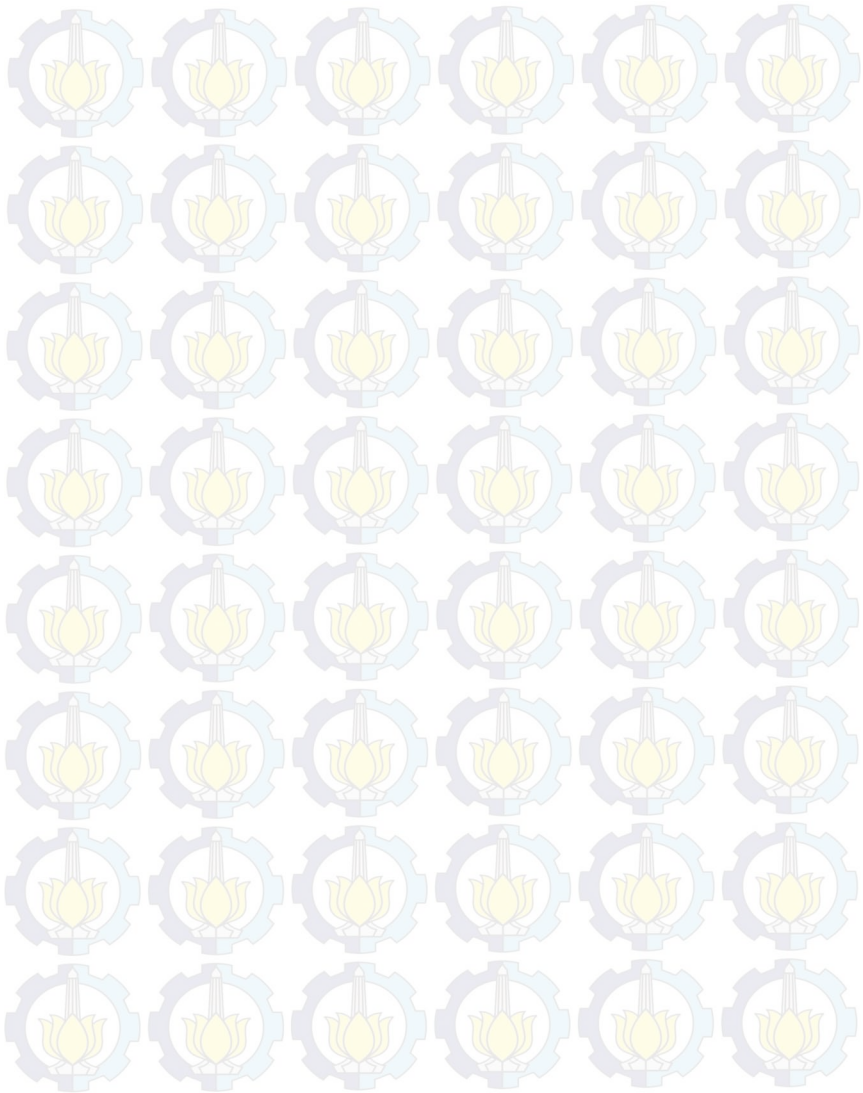


1. Menyiapkan spesimen yang akan diuji.
2. Meletakkan alat di atas spesimen yang akan diuji
3. Mengamati dan mencatat nilai yang ditunjukkan alat.
4. Melakukan pengulangan untuk spesimen lain.











## BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

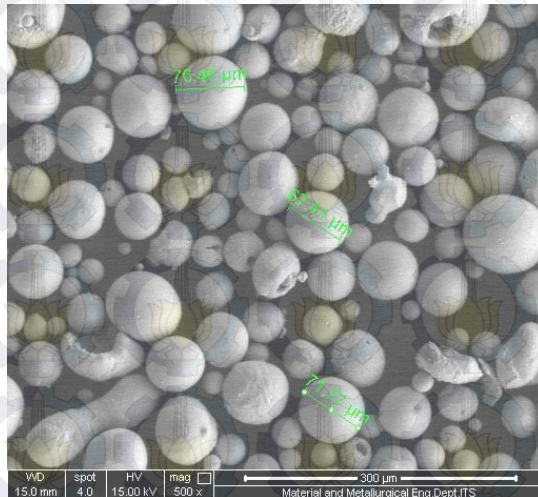
### 4.1 Analisa Data

#### 4.1.1 Karakterisasi Serbuk

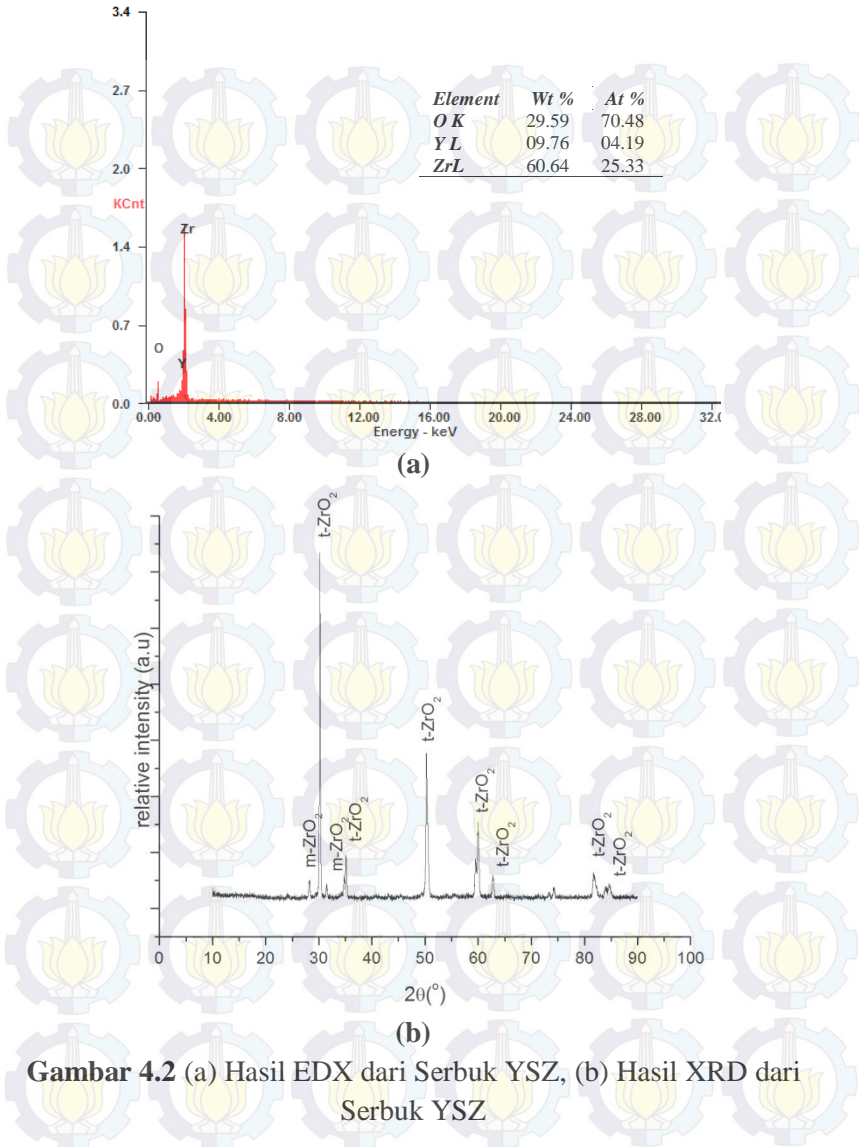
Karakterisasi awal serbuk dilakukan untuk mengetahui ukuran, bentuk partikel, dan komposisi serbuk. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan kesesuaian antara serbuk dengan spesifikasi *spray gun* pada *flame spray*. Ukuran partikel yang optimal digunakan untuk proses *spray gun* sekitar 40-150  $\mu\text{m}$ .

##### a. Serbuk YSZ (*Yttria-Stabilized Zirconia*)

Serbuk YSZ yang digunakan berwarna putih dan memiliki ukuran butir rata-rata 71.88  $\mu\text{m}$  dengan bentuk *spherical* sesuai dengan pengujian SEM dengan perbesaran 500x pada Gambar 4.1.



**Gambar 4.1** Hasil Pengujian SEM Serbuk YSZ dengan Perbesaran 500x



Gambar 4.2 (a) Hasil EDX dari Serbuk YSZ, (b) Hasil XRD dari Serbuk YSZ



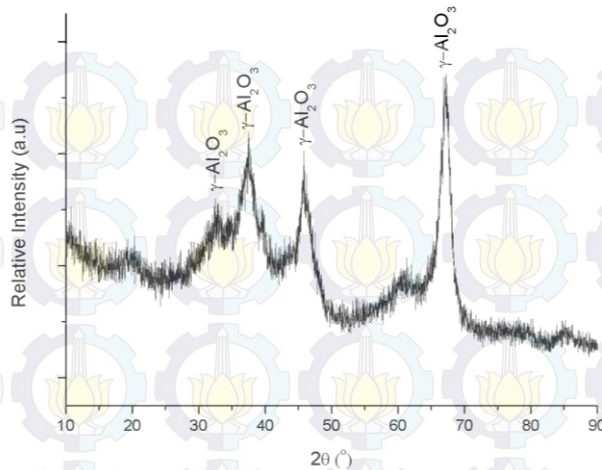
Serbuk yang dikarakterisasi sebelumnya sudah mengalami proses *sieving* dengan ukuran *sieve* 140, 112, dan 80  $\mu\text{m}$ . Hasil karakterisasi EDX menunjukkan serbuk mengandung unsur Zr 60,64 wt%, Y 9,76 wt% dan O 29,59 wt%. Dari hasil XRD didapatkan *peak* yang menunjukkan adanya fasa Ytria Stabilized Zirconia (t-ZrO<sub>2</sub> 01-082-1241) yang memiliki struktur kristal tetragonal.

#### **b. Serbuk Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Alumina)**

Serbuk Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> digunakan sebagai material komposit dengan YSZ yang akan dilapiskan di antara *top coat* dan *bond coat*. Penggunaan serbuk Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sebagai komposit karena ketahanan oksidasi dapat ditingkatkan dengan adanya penambahan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pada YSZ/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Ren, 2011). Serbuk Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> berwarna putih. Dari karakterisasi SEM pada Gambar 4.3 dapat diketahui ukuran serbuk rata-rata 37.7  $\mu\text{m}$  dan bentuk serbuk adalah *polygonal* dengan permukaan yang kasar. Serbuk yang dikarakterisasi sebelumnya sudah mengalami proses *sieving* dengan ukuran *sieve* 60, 50, 40, dan 30  $\mu\text{m}$ . Dari karakterisasi EDX didapatkan serbuk terdiri dari unsur Al sebesar 52,14 wt% dan O 47,86 wt%. Dan dari uji XRD didapatkan *peak* yang keluar menunjukkan adanya  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (*ref code* 00-004-0858).







(b)

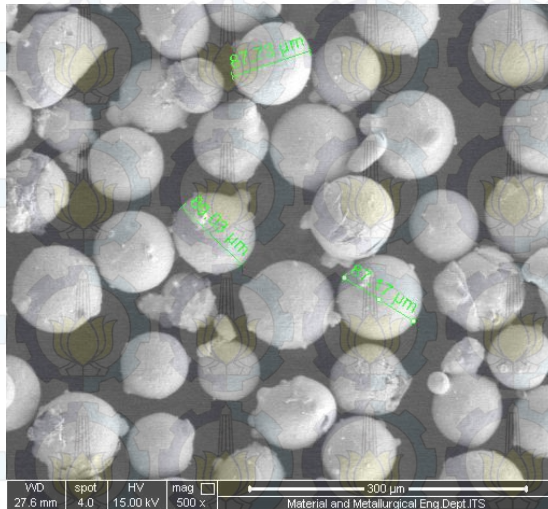
**Gambar 4.4** (a) Hasil EDX dari Serbuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , (b) Hasil XRD dari Serbuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$

### c. Serbuk NiCrAlY

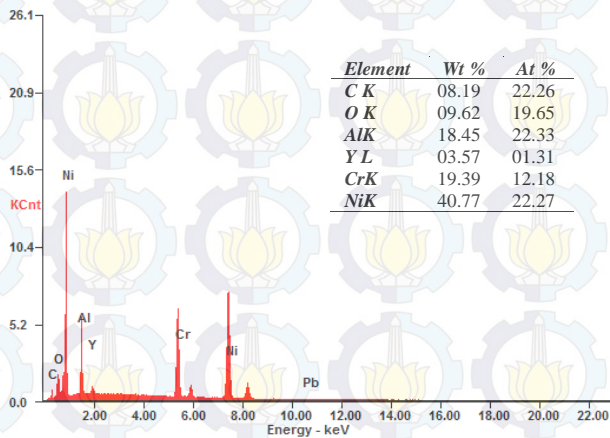
*Bond coat* yang digunakan pada percobaan ini adalah NiCrAlY. Penggunaan serbuk NiCrAlY sebagai *bondcoat* guna menyesuaikan komposisi dengan substrat. Serbuk NiCrAlY memiliki warna abu-abu. Dari pengujian SEM pada Gambar 4.5 dengan perbesaran 500x diketahui bahwa serbuk NiCrAlY memiliki struktur *spherical* dengan distribusi ukuran rata-rata 87,98  $\mu\text{m}$ . Dari karakterisasi EDX didapatkan komposisi unsur serbuk NiCrAlY antara lain Ni 39,74 wt%, Cr 19,39 wt%, Al 18,45%, Y 3,57 wt%, sedangkan adanya O sebesar 9,62 wt% menunjukkan bahwa serbuk mengalami oksidasi, juga C sebesar 8,19 wt% berasal dari *carbon tape* yang digunakan untuk menahan spesimen. Dari hasil XRD didapatkan *peak* yang keluar



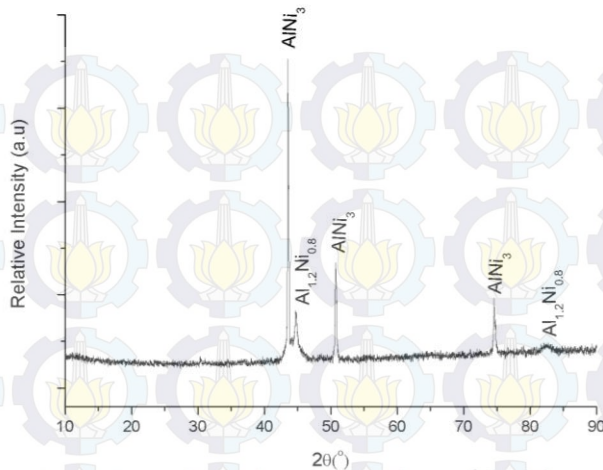
menunjukkan adanya fasa  $\text{AlNi}_3$  (ref code 01-071-5884) dan  $\text{Al}_{1,2}\text{Ni}_{0,8}$  (ref code 01-077-6813).



Gambar 4.5 Hasil Pengujian SEM Serbuk NiCrAlY dengan Perbesaran 500x



(a)



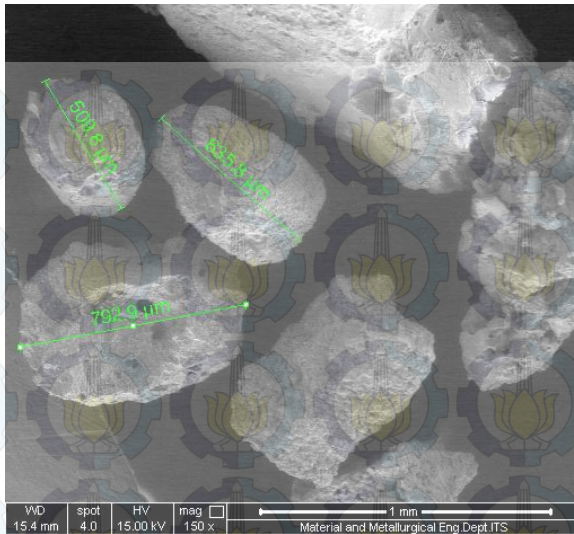
(b)

**Gambar 4.6** (a) Hasil EDX dari Serbuk NiCrAlY, (b) Hasil XRD dari Serbuk NiCrAlY

#### **d. Serbuk *Brown Al-Oxide CF 16***

Serbuk *Brown Al-Oxide CF 16* (serbuk pasir alumina) digunakan dalam proses pengkasaran permukaan material substrat sebelum dilakukann pelapisan. Serbuk ini berwarna hitam. Dari Pengujian SEM Gambar 4.7 dengan perbesaran 500x diketahui bahwa serbuk pasir alumina ini memiliki bentuk angular dengan distribusi ukuran rata-rata 646,2  $\mu m$ .



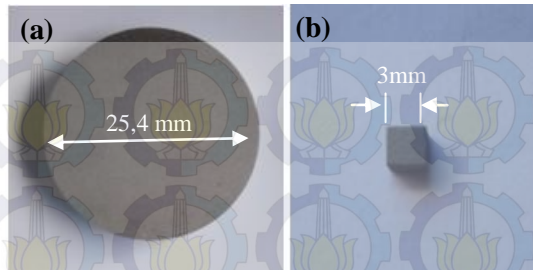


**Gambar 4.7** Hasil Pengujian SEM Serbuk Pasir Alumina dengan Perbesaran 500x

#### 4.1.2 Hasil Preparasi Substrat

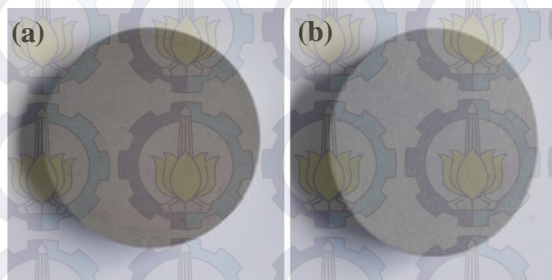
Sebelum dilakukan proses pelapisan substrat Hastelloy® X, beberapa preparasi dilakukan untuk menyesuaikan dengan standard proses pelapisan keramik. Preparasi yang dilakukan sesuai tahapan penelitian pada sub bab 3.5.1 Preparasi Substrat Hastelloy® X.

Ukuran spesimen untuk uji *Pull Off* berdasarkan pada ASTM D4541 dan ukuran spesimen *Thermal Torch* mengikuti ukuran spesimen *Pull Off* yaitu berdiameter 1 inch dengan ketebalan 6 mm, sedangkan spesimen untuk uji TGA berbentuk kubus dengan panjang sisi 3 mm yang berdasarkan pada ukuran *crucible* yang ada.



**Gambar 4.8** Spesimen Hastelloy<sup>®</sup> X setelah Dipotong (a) Spesimen Uji *Pull Off* dan *Thermal Torch*, (b) Spesimen Uji TGA (*Thermogravimetry*)

Setelah dilakukan pemotongan spesimen dilakukan proses pengasaran dengan menggunakan serbuk pasir alumina (*Brown Al-Oxide CF 16*) yang disemprotkan pada tekanan 6 bar atau sekitar 600 kPa menggunakan alat *sand blasting*. Nilai kekasaran yang dihasilkan adalah 50-60  $\mu\text{m}$ . Fungsi dari *blasting* disini selain untuk mengkasarkan permukaan pada logam, juga berfungsi untuk membersihkan permukaan logam dari kotoran-kotoran yang menempel.



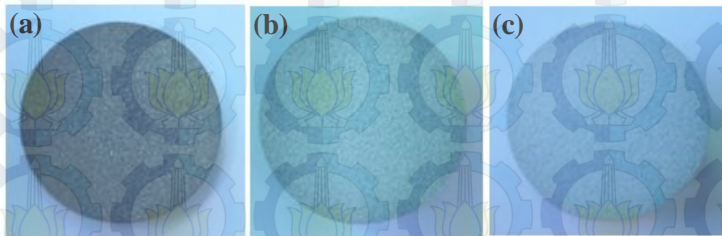
**Gambar 4.9** Spesimen Hastelloy<sup>®</sup> X Setelah Dipotong (a) Sebelum *Sand Blasting*, (b) Setelah *Sand Blasting*



Dapat dilihat dari Gambar 4.9 substrat Hastelloy<sup>®</sup> X setelah dipotong memiliki permukaan yang halus dan warna yang cenderung lebih gelap. Warna gelap tersebut dihasilkan dari pengotor pada saat dilakukan *wire cutting*. Sedangkan pada substrat Hastelloy<sup>®</sup> X setelah proses *Sand Blasting* memiliki permukaan yang lebih kasar.

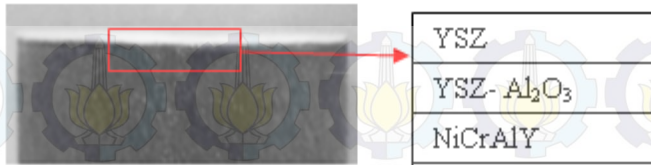
#### 4.1.3 Hasil Proses Pelapisan

Setelah substrat selesai dipreparasi, kemudian dilakukan proses pelapisan dengan urutan yang pertama pelapisan lapisan *bond coat* NiCrAlY, pelapisan lapisan YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, pelapisan lapisan YSZ secara berurutan. Sebelum dilakukan proses pelapisan, spesimen dilakukan pemanasan awal (*pre heat*) pada temperatur 300-400 °C, untuk mengurangi *shock thermal* ketika proses pelapisan dilakukan. Pelapisan *bond coat*, YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan YSZ dilakukan dengan parameter *spray* seperti ditunjukkan pada Tabel 3.2. Di mana kondisi tekanan Oksigen 25 kg/cm<sup>2</sup> dan Asetilen 27 kg/m<sup>2</sup>.



**Gambar 4.10** Permukaan Spesimen Setelah Dilapisi  
(a) *Bond coat* NiCrAlY, (b) Dilapisi YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (c) YSZ





**Gambar 4.11** Penampang Melintang Spesimen Setelah Dilapisi *Bond coat* NiCrAlY + YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+YSZ

#### 4.1.4 Hasil Pengujian Kekuatan Lekat

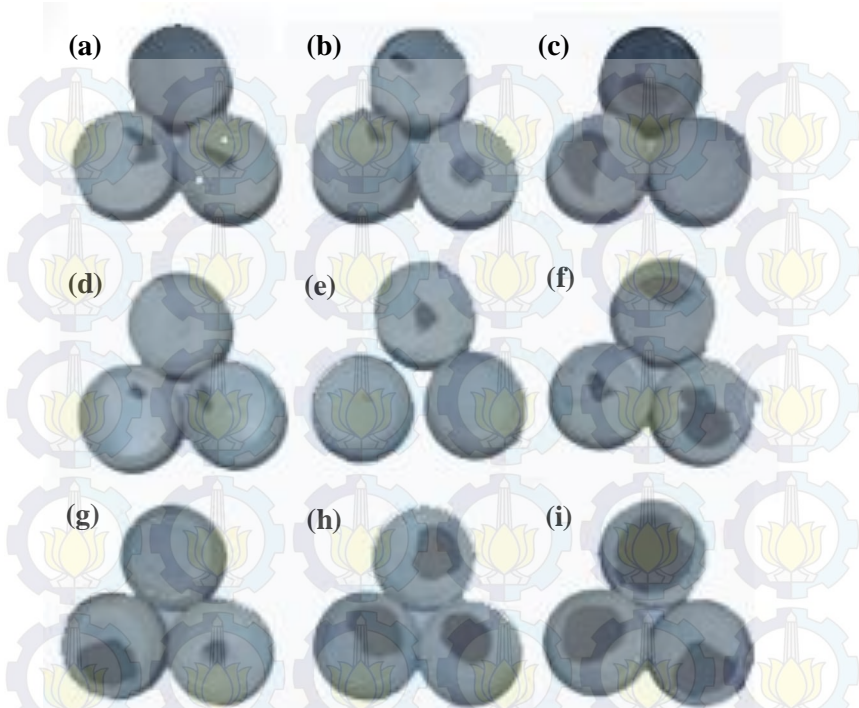
##### 4.1.4.1 Analisa Kuantitatif Metode Taguchi

Pengujian kekuatan lekat dilakukan untuk menentukan ketahanan *coating* dari pengelupasan secara langsung. Hutchinson (1990) mengatakan bahwa kekuatan lekat merupakan parameter utama dalam karakterisasi lapisan keramik *top coat*.

Pengujian kekuatan lekat dengan metode *pull off* dilakukan untuk menganalisa pengaruh variasi komposisi Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan jumlah sapan pada komposit YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Dari pengujian ini didapatkan data yang menunjukkan nilai kekuatan tiap sampel sehingga mampu ditentukan sampel mana yang memiliki kelekatan yang paling baik. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan menggunakan alat uji lekat *PosiTest Adhesion Tester*.

Gambar 4.12 menunjukkan tampak fisik dari spesimen sesudah uji kelekatan. Terlihat beberapa kondisi dari spesimen sesudah dilakukan pengujian kelekatan ada yang mengalami pengelupasan pada *top coat*, *bond coat* dan ada pula yang tidak terkelupas.





**Gambar 4.12** Gambar Sampel Sesudah Pengujian *Pull Off*

(a) YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  15% - 1x,

(b) YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  15% - 2x, (c) YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  15% - 3x,

(d) YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  30% - 1x, (e) YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  30% - 2x,

(f) YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  30% - 3x, (g) YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  45% - 1x,

(h) YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  45% - 2x, (i) YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  45% - 3x

Gambar 4.12 menunjukkan tampak fisik dari spesimen sesudah diuji kelekatan. Terlihat beberapa kondisi dari spesimen sesudah dilakukan pengujian kelekatan ada yang mengalami pengelupasan pada top coat, bondcoat dan ada pula yang tidak



terkelupas. Nilai kekuatan lekat setiap sampel dapat dilihat pada Tabel 4.1.

**Tabel 4.1** Nilai Kelekatan dari Setiap Sampel

Komposisi YSZ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sapuan	Kekuatan Lekat (Mpa)			
		I	II	III	Rata-Rata
15%	1x	14.23	13.99	14.16	14.13
	2x	13.56	13.36	12.99	13.30
	3x	11.86	12	11.65	11.84
30%	1x	14.38	15.38	16.29	15.35
	2x	13.37	15.68	14.58	14.54
	3x	11.84	13.05	14.24	13.04
45%	1x	13.01	12.97	12.87	12.95
	2x	11.98	12.17	12.41	12.19
	3x	10.65	10.71	10.98	10.78
<b>Rata-rata</b>					13.12

Dari Tabel 4.1 didapatkan nilai kekuatan lekat rata-rata 13.12 MPa. Berdasarkan *ASM Handbook of Thermal Spray* (2004) nilai kekuatan lekat metal berada pada range 30 Mpa sedangkan nilai kekuatan lekat keramik berada pada range 15 Mpa. Hasil kekuatan lekat ini dikategorikan cukup tinggi dan sudah memenuhi standar yang ada.

Dari hasil uji lekat pada Tabel 4.1 masih belum dapat mengetahui variabel mana yang berpengaruh signifikan dan berapa persen pengaruhnya terhadap kekuatan lekat. Oleh karena itu untuk mempermudah menganalisa hasil uji kekuatan lekat maka digunakan analisa statistika dengan metode Taguchi. Penggunaan metode taguchi ini untuk mempermudah mengetahui nilai optimum pada hasil kekuatan lekat. Pada metode Taguchi variabel dan level yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.2.



**Tabel 4.2** Variabel dan Level Penelitian.

Level	Variabel	
	Komposisi (A)	Sapuan (B)
1	15%	1x
2	30%	2x
3	45%	3x

Dari hasil data pengujian yang didapatkan menunjukkan nilai kekuatan lekat tiap variasi variabel komposisi dan sapuan pada sampel. Data ditransformasikan ke dalam bentuk rasio S/N (*Signal to Noise*) untuk mencari variabel yang berpengaruh pada variasi karakteristik kualitas semakin besar kekuatan lekat semakin baik (*larger is better*).

Rumus:

$$S/N = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum \frac{1}{y^2} \right)$$

Keterangan:

n = jumlah pengulangan dari suatu percobaan

y = nilai kekuatan lekat

Karakteristik kualitas pada penelitian ini adalah memaksimalkan nilai kekuatan lekat dari uji *pull off*. Nilai yang diharapkan adalah nilai hasil *pull off* terbesar, dengan pengulangan percobaan sebanyak tiga kali maka perhitungan rasio S/N adalah sebagai berikut:

Pada eksperimen ke 1 :

$$\begin{aligned} S/N &= -10 \log \left[ \frac{1}{3} \left( \frac{1}{14.23^2} + \frac{1}{13.99^2} + \frac{1}{14.16^2} \right) \right] \\ &= -10 \log [0.0050] \\ &= 23.0001 \end{aligned}$$

Perhitungan untuk eksperimen yang lain dapat dilihat pada lampiran 1.



Selanjutnya dilakukan perhitungan variabilitas nilai rasio S/N kekuatan lekat hasil uji *pull off* dengan kombinasi level dari masing masing variabel guna menganalisa pengaruh level dari variabel terhadap variasi nilai kekuatan lekat.

Perhitungan untuk variabel A (komposisi)

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{1}{3}(23.0001 + 22.4751 + 21.4627) \\ &= 22.3126 \end{aligned}$$

Perhitungan untuk level 2 dan 3 dapat dilihat pada lampiran.

Perhitungan untuk variabel B (sapan)

$$\begin{aligned} B_1 &= \frac{1}{3}(23.0001 + 23.6883 + 22.2451) \\ &= 22.9779 \end{aligned}$$

Perhitungan untuk level 2 dan 3 dapat dilihat pada lampiran 1.

Hasil perhitungan di atas dapat dilihat pada Tabel 1.3 lampiran 1.

Kombinasi level optimum dicapai pada nilai rata-rata rasio S/N tertinggi dari setiap variabel. Kombinasi level optimum adalah sebagai berikut:

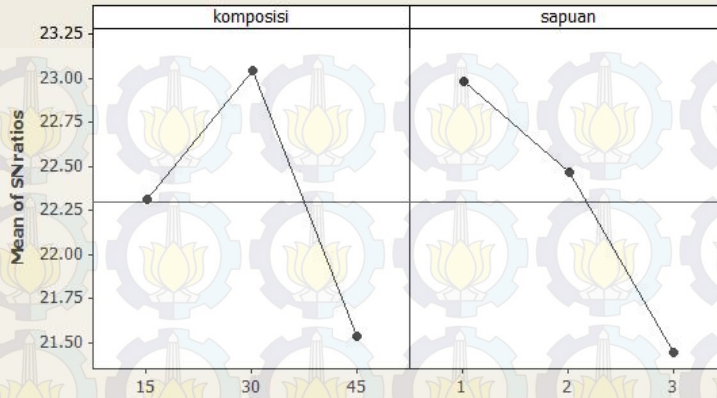
$A_2$  = Komposisi YSZ- $Al_2O_3$  30%

$B_1$  = Sapan 1x

#### 4.1.4.2 Analisa Kuantitatif Metode Taguchi dengan Minitab

Untuk mengetahui pengaruh variabel terhadap respon bisa digunakan *software* Minitab. *Software* ini digunakan untuk menganalisa variabel mana yang berpengaruh signifikan terhadap respon. Dengan Minitab didapatkan tabel ANOVA dan *output* secara visualisasi Minitab sebagai berikut:





**Gambar 4.13** Grafik Pengaruh antara Kekuatan Lekat dengan Komposisi Dan Sapuan *Output* Software Minitab

Berdasarkan gambar di atas menunjukkan adanya pengaruh atau perbedaan antar level variabel. Selain itu kombinasi untuk mendapatkan nilai optimum dipilih nilai yang tertinggi yaitu  $A_2, B_1$ . Pemilihan kombinasi level tiap variabel tersebut menunjukkan hasil yang sama dengan perhitungan manual pada pembahasan sebelumnya.

Selain itu dengan menggunakan Minitab dapat menganalisa varian rasio S/N untuk mengetahui variabel yang berpengaruh secara signifikan terhadap respon nilai rasio S/N. Didapatkan Tabel 4.2 *Analysis of Variance for SN ratios* sebagai berikut:

**Tabel 4.3** ANOVA Kekuatan Lekat

Analysis of Variance for SN ratios						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
komposisi	2	3.63116	3.63116	1.69545	1272.55	0.001
sapuan	2	3.39090	3.39090	1.81558	1362.72	0.011
Residual Error	4	0.00533	0.00533	0.00133		
Total	8	7.02739				



Dari Tabel 4.3 dapat diketahui bahwa **variabel komposisi dan sapuan berpengaruh signifikan terhadap kekuatan lekat** hasil uji *pull off*. Hal tersebut dapat diketahui karena nilai P lebih kecil dari  $\alpha$  (0.10). Perhitungan lebih lanjut dapat diketahui persen kontribusi atau porsi masing-masing variabel yang signifikan terhadap total varian yang diamati. Persen kontribusi ini merupakan fungsi dari *sum of squares* dari masing-masing variabel signifikan yang merupakan indikasi kekuatan sebuah variabel. Rumus perhitungan persen kontribusi adalah:

$$\rho = \frac{SS \text{ "variabel"}}{SS \text{ total}} \times 100 \%$$

Terlebih dahulu dilakukan perhitungan SS'' sebagai berikut:

$$SS'_A = SS_A - MS_e(V_A) = 3.63116 - 0.00133(2) = 3.6285$$

$$SS'_B = SS_B - MS_e(V_B) = 3.39090 - 0.00133(2) = 3.38824$$

Maka persen kontribusi masing-masing faktor:

$$\rho_A = \frac{3.6285}{7.02739} \times 100\% = 51.634\%$$

$$\rho_B = \frac{3.38824}{7.02739} \times 100\% = 48.215\%$$

Dari perhitungan persen kontribusi dapat diketahui bahwa **variabel A (komposisi) memiliki porsi pengaruh yang cukup tinggi** sebesar 51.634% sedangkan porsi variabel B (sapuan) sebesar 48.215%. Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa nilai kekuatan lekat lebih dipengaruhi oleh komposisi dibandingkan dengan sapuan.



## 4.1.5 Hasil Pengujian *Thermal Torch Oxyacetylene*

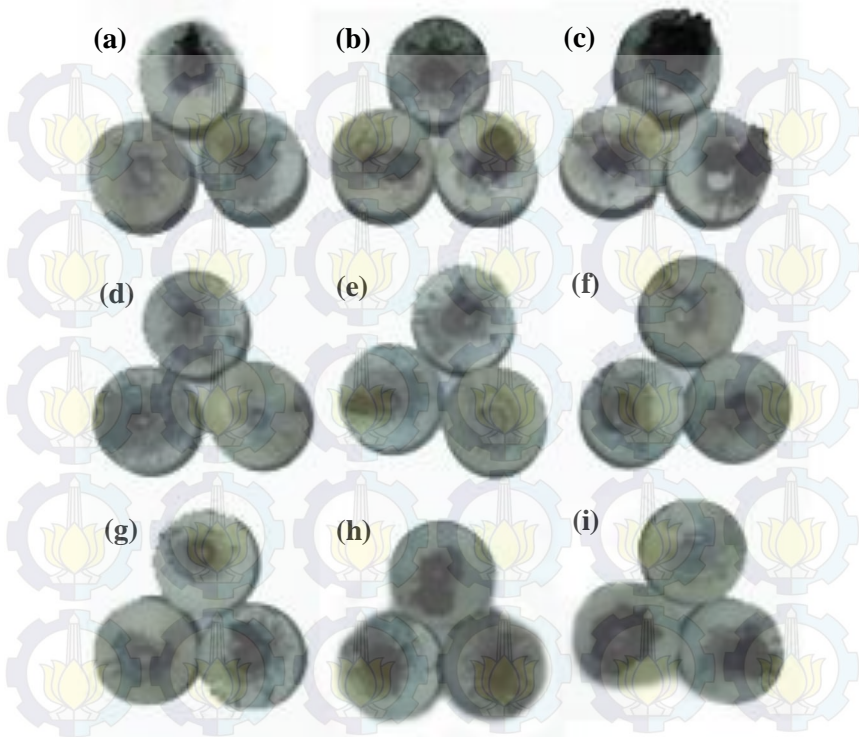
### 4.1.5.1 Analisa Kuantitatif Metode Taguchi

Pengujian *Thermal Torch* ini dimaksudkan untuk mengetahui bagaimana ketahanan dari *coating* terhadap pembebanan termal secara langsung oleh busur las *oxyacetylene* sehingga akan terlihat secara fisik ketahanan dari lapisan keramik. Pengujian ini menggunakan busur las *Oxydizing flame* dengan temperatur nyala 1200 °C. Pengujian ini dilakukan dengan memberikan lama waktu standard 25 dengan jarak *torch* ke sampel 10 mm lalu diamati kerusakan pada setiap sampel.

Untuk mendapatkan hasil yang akurat mengenai seberapa besar kerusakan yang terjadi pada sampel maka dilakukan dua jenis metode yaitu pendekatan massa dan pendekatan volume. Pendekatan massa yaitu menimbang massa sampel sebelum dan sesudah pengujian sehingga didapatkan seberapa besar massa yang hilang. Semakin besar massa yang hilang berarti semakin rusak *coating* yang artinya ketahanan terhadap beban termal semakin rendah. Pendekatan volume, yaitu melakukan perhitungan volume rusak sampel dengan mengukur seberapa banyak volume aquades yang masuk ke dalam bagian sampel yang rusak dengan metode titrasi menggunakan buret.

Gambar 4.14 menunjukkan tampak fisik dari sampel sesudah diuji termal las. Setelah dilakukan uji *thermal torch* terjadi kerusakan dan terdapat cekungan dipermukaan sampel. Data hasil pengujian *thermal torch* berdasarkan pendekatan massa dapat dilihat pada Tabel 4.4 dan data hasil pengujian *thermal torch* berdasarkan pendekatan volume dapat dilihat pada Tabel 4.5.





**Gambar 4.14** Gambar Sampel sesudah Pengujian *Thermal Torch Oxyacetylene*

(a) YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>15% - 1x,

(b) YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15% - 2x, (c) YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15% - 3x,

(d) YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% - 1x, (e) YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% - 2x,

(f) YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>30% - 3x, (g) YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 1x,

(h) YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 2x, (i) YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 3x





**Tabel 4.4** Nilai Ketahanan Termal dengan Metode Pendekatan  
 Massa Hasil Uji *Thermal Torch Oxyacetylene*

Komposisi YSZ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sapuan	Pengurangan Massa (gram)			
		I	II	III	Rata-Rata
15%	1x	1.20	26.49	24.31	1.18
	2x	1.81	26.99	25.28	1.71
	3x	2.09	26.26	25.08	2.18
30%	1x	1.25	26.95	25.70	1.25
	2x	1.45	26.12	24.67	1.45
	3x	1.62	28.15	26.52	1.63
45%	1x	1.42	26.92	24.99	1.31
	2x	1.71	26.67	25.02	1.65
	3x	1.82	26.35	25.03	1.93
<b>Rata-rata</b>					1.61

**Tabel 4.5** Nilai Ketahanan Termal dengan Metode Pendekatan  
 Volume Hasil Uji *Thermal Torch Oxyacetylene*

Komposisi YSZ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sapuan	Volume Rusak (mL)			
		I	II	III	Rata-Rata
15%	1x	0.1	0.15	0.1	0.12
	2x	0.2	0.15	0.15	0.17
	3x	0.2	0.25	0.25	0.23
30%	1x	0.05	0.1	0.05	0.07
	2x	0.1	0.1	0.05	0.08
	3x	0.15	0.15	0.1	0.13
45%	1x	0.1	0.15	0.1	0.12
	2x	0.15	0.1	0.15	0.13
	3x	0.2	0.2	0.2	0.20
<b>Rata-rata</b>					0.14

Dari hasil kedua pendekatan tersebut didapatkan data yang menunjukkan nilai ketahanan termal tiap variasi variabel komposisi dan sapuan pada sampel. Kemudian data ditransformasikan ke dalam bentuk rasio S/N (*Signal to Noise*)



untuk mencari faktor yang berpengaruh pada variasi karakteristik kualitas, semakin kecil selisih massa dan semakin kecil volume kerusakan yang dihasilkan semakin baik (*smaller is better*).

Rumus :

$$S/N = -10 \log\left(\sum \frac{y^2}{n}\right)$$

Keterangan:

n = jumlah pengulangan dari suatu percobaan

y = nilai volume kerusakan

Karakter kualitas pada penelitian ini adalah meminimalkan nilai massa yang hilang (selisih massa) dan meminimalkan nilai volume kerusakan, dengan pengulangan percobaan sebanyak tiga kali maka perhitungan rasio S/N untuk volume kerusakan dan selisih massa spesimen dapat dilihat pada lampiran 2.

Selanjutnya dilakukan perhitungan variabilitas nilai rasio S/N ketahanan termal hasil uji *termal torch* dengan kombinasi level dari masing masing variabel guna menganalisa pengaruh level dari variabel terhadap variasi nilai ketahanan termal. Perhitungan dan level variabel terhadap variasi variabel yang digunakan sama seperti perhitungan kekuatan lekat. Sehingga didapatkan data Tabel 2.3 untuk hasil pendekatan massa dan Tabel 2.6 untuk pendekatan volume pada lampiran 2.

Dari hasil perhitungan dapat diketahui pengaruh level dari dari masing-masing variabel terhadap ketahanan termal. Untuk memperoleh nilai ketahanan termal maksimum semakin kecil semakin baik (*smaller is better*), kombinasi level variabel optimum dicapai pada nilai rata-rata rasio S/N level variabel tertinggi dari setiap variabel. Kombinasi level variabel optimum adalah sebagai berikut:

---



Pada pendekatan massa:

$A_2$  = Komposisi YSZ- $Al_2O_3$  30%

$B_1$  = Sapuan 1x

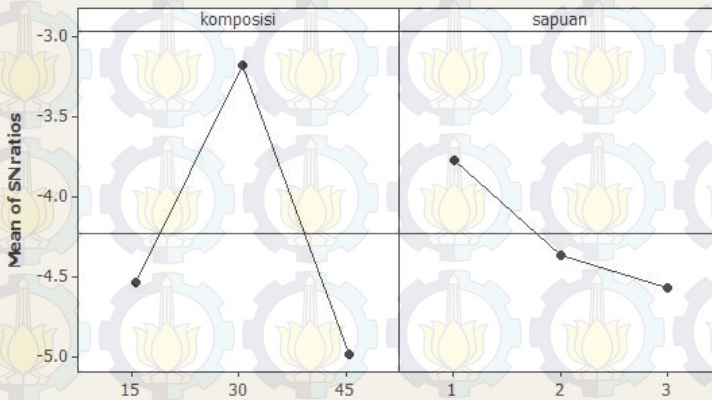
Pada pendekatan volume:

$A_2$  = Komposisi YSZ- $Al_2O_3$  30%

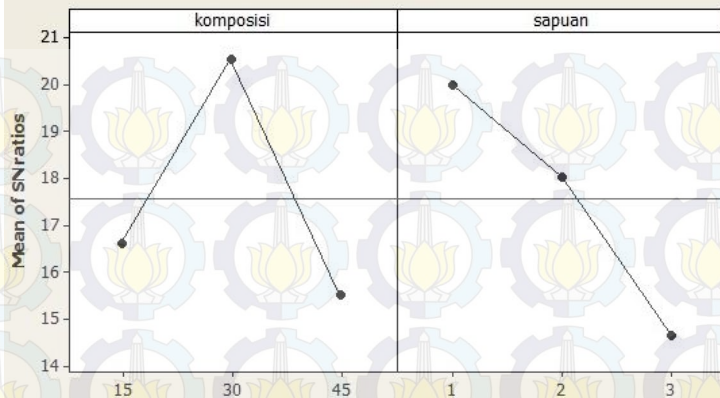
$B_1$  = Sapuan 1x

#### 4.1.5.2 Analisa Kuantitatif Metode Taguchi dengan Minitab

Untuk mengetahui pengaruh variabel terhadap respon bisa digunakan *software* Minitab. Secara visualisasi menggunakan *output* Minitab sebagai berikut:



**Gambar 4.15** Grafik Hubungan antara Ketahanan Termal dengan Komposisi dan Sapuan berdasarkan Pendekatan Massa menggunakan *Software* Minitab



**Gambar 4.16** Grafik Hubungan antara Ketahanan Termal dengan Komposisi dan Sapan berdasarkan Pendekatan Volume menggunakan *Software Minitab*

Berdasarkan Gambar 4.15 dan 4.16 diketahui adanya pengaruh atau perbedaan antar level. Selain itu kombinasi untuk mendapatkan nilai optimum dipilih nilai yang tertinggi yaitu  $A_2, B_1$ . pemilihan kombinasi level tiap variabel tersebut pada masing masing pendekatan untuk nilai ketahan termal.

Selain itu dengan menggunakan *Minitab* bisa untuk menganalisis varian rasio S/N untuk mengetahui variabel yang berpengaruh secara signifikan terhadap nilai rasio S/N didapatkan tabel *Analysis of Variance for SN ratios* sebagai berikut:





**Tabel 4.6** ANOVA Ketahanan Termal berdasarkan Pendekatan Massa

Analysis of Variance for SN ratios						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
komposisi	2	5.2701	5.2701	2.63506	71.82	0.001
sapuan	2	1.0208	1.0208	0.51040	13.91	0.016
Residual Error	4	0.1468	0.1468	0.03669		
Total	8	6.4377				

**Tabel 4.7** ANOVA Ketahanan Termal berdasarkan Pendekatan Volume

Analysis of Variance for SN ratios						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
komposisi	2	41.866	41.866	20.9329	73.08	0.001
sapuan	2	43.897	43.897	21.9484	76.62	0.001
Residual Error	4	1.146	1.146	0.2864		
Total	8	86.908				

Dari tabel di atas dapat diketahui bahwa **variabel komposisi dan sapuan berpengaruh signifikan terhadap ketahanan termal**. Hal tersebut dapat diketahui karena nilai P lebih kecil dari  $\alpha$  (0.10).

Perhitungan lebih lanjut dapat diketahui persen kontribusi atau porsi masing masing variabel yang signifikan terhadap total varian yang diamati. Persen kontribusi ini merupakan fungsi dari *sum of squares* dari masing masing variabel signifikan yang merupakan indikasi kekuatan sebuah variabel. Rumus perhitungan persen kontribusi adalah:

$$\rho = \frac{SS^{\text{faktor}}}{SS^{\text{total}}} \times 100 \%$$

Terlebih dahulu dihitung SS” sebagai berikut:



Perhitungan untuk pendekatan massa

$$SS'_A = SS_A - MS_e(V_A) = 5.2701 - 0.03669 (2) = 5.19672$$

$$SS'_B = SS_B - MS_e(V_B) = 1.0208 - 0.03669 (2) = 0.94742$$

Perhitungan untuk pendekatan volume

$$SS'_A = SS_A - MS_e(V_A) = 41.866 - 0.2864 (2) = 41.2932$$

$$SS'_B = SS_B - MS_e(V_B) = 43.897 - 0.2864 (2) = 43.3242$$

Maka persen kontribusi masing masing faktor dihitung berdasarkan perhitungan sebagai berikut:

Perhitungan untuk pendekatan massa

$$\rho_A = \frac{5.19672}{6.4377} \times 100\% = 80.72\%$$

$$\rho_B = \frac{0.94742}{6.4377} \times 100\% = 14.72\%$$

Perhitungan untuk pendekatan volume

$$\rho_A = \frac{41.2932}{86.908} \times 100\% = 47.51\%$$

$$\rho_B = \frac{43.3242}{86.908} \times 100\% = 49.85\%$$

Dari perhitungan persen kontribusi pada pendekatan massa dapat diketahui bahwa variabel A (komposisi) memiliki porsi pengaruh yang cukup tinggi sebesar 80.72% sedangkan porsi variabel B (sapan) sebesar 14.72%. Pada pendekatan volume variabel A (komposisi) memiliki porsi pengaruh sebesar 47.51% sedangkan porsi variabel B (sapan) sebesar 49.58%. Dari hasil analisa tersebut dapat dilihat bahwa pengaruh komposisi dan sapan terhadap ketahanan termal memiliki pola hasil yang sama dengan pengaruh terhadap kekuatan lekat.

---



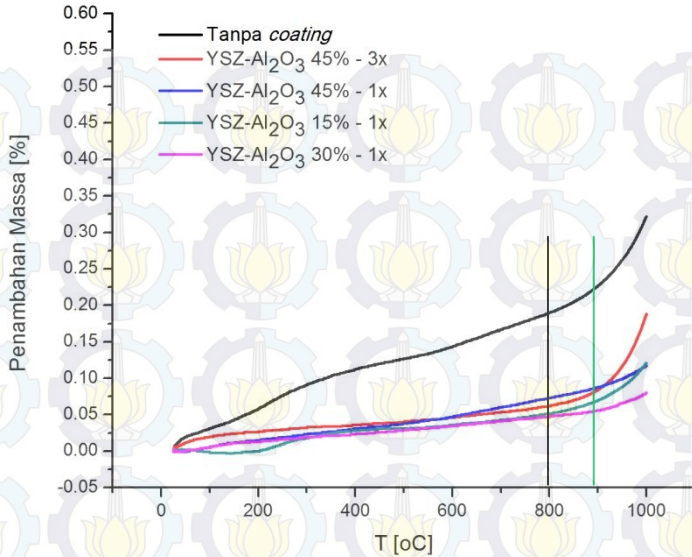
#### 4.1.6 Hasil pengujian TGA (*Thermogravimetri*)

Pengujian TGA merupakan pengujian oksidasi secara non-isotermal yang dilakukan untuk melihat pertumbuhan oksida pada sampel dan kestabilan sampel ketika bekerja pada temperatur tinggi yang telah dilapisi dengan struktur YSZ/YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  sebagai simulasi uji statik nosel roket. Alat pengujian menggunakan DSC/TGA Mettler Toledo dengan temperatur sampai 1000 °C dengan *heating rate* 10 °C/min dan total estimasi waktu 97 menit dalam lingkungan gas oksigen.

Pengujian ini dilakukan pada 3 variasi sampel terbaik dan 1 sampel terburuk pada hasil uji *thermal torch* dan juga sampel tanpa *coating*. Hal ini dilakukan untuk memfokuskan analisa pengaruh komposisi. Dari pengujian ini akan ditentukan sampel dengan komposisi yang mana yang memiliki tingkat ketahanan termal yang baik (stabil).

Gambar 4.17 menunjukkan grafik pengaruh temperatur terhadap perubahan massa. Dengan bertambahnya temperatur, massa sampel bertambah. Hal ini mengindikasikan bahwa ada reaksi yang terjadi. Reaksi yang terjadi berupa reaksi oksidasi yang menyebabkan massa spesimen bertambah tiap kenaikan temperatur. Menurut Sulistijono,dkk (2008), menyebutkan bahwa pertumbuhan oksida berlangsung apabila terjadi perpindahan atau difusi ion dan elektron menyeberangi lapisan oksida, karena penebalan lapisan terjadi akibat terbentuknya oksida di *interface*. Karena adanya oksigen yang menempel dan membentuk suatu senyawa menjadikan terjadinya pertambahan massa.





**Gambar 4.17** Pengaruh Temperatur terhadap Penambahan Massa

Terlihat pada temperatur yang tidak *dicoating* mengalami kenaikan massa yang cukup signifikan mulai temperatur sekitar 850 °C hingga 1000 °C. Hal ini menunjukkan terjadi reaksi oksidasi yang besar pada temperatur tersebut. Hal ini dikarenakan spesimen Hastelloy ® X memiliki temperatur kerja hingga 870°C (Haynes International, 1997).

Berdasarkan Gambar 4.17 terlihat bahwa pada sampel yang *dicoating* dengan komposisi Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15, 30 dan 45 wt% saat diberi perlakuan termal dari temperatur 25 °C hingga 900 °C memiliki pola kenaikan massa yang hampir sama, di mana perubahan massa yang terjadi tidak terlalu signifikan. Rata-rata sampel mulai mengalami kenaikan massa yang signifikan akibat oksidasi pada daerah *bond coat* pada temperatur 900 °C yang menyebabkan munculnya daerah TGO (*Thermal Growth Oxide*). Hal ini





dikarenakan *bond coat* memiliki temperatur kerja maximum pada 980 °C jika diterapkan dengan menggunakan *Athmospheric Plasma Spray* (APS), atau sampai 1050 °C jika diterapkan dengan menggunakan HVOF (Sulzer Metco,2013). Sedangkan jika menggunakan metode *flame spray* sangat memungkinkan menghasilkan temperatur kerja yang lebih rendah karena *flame spray* menghasilkan temperatur kerja yang lebih rendah sekitar 2700 °C dan kecepatan impak serbuk yang rendah yaitu 50 m/s. Hasil dari *Flame-spray* juga menghasilkan porositas yang tinggi (>10%) dan konten oksida antara 6 and 12%. Oksida dalam deposit metal berasal dari adanya reaksi oksidasi ketika proses *flame spray* berlangsung (*ASM Handbook of Thermal Spray*, 2004).

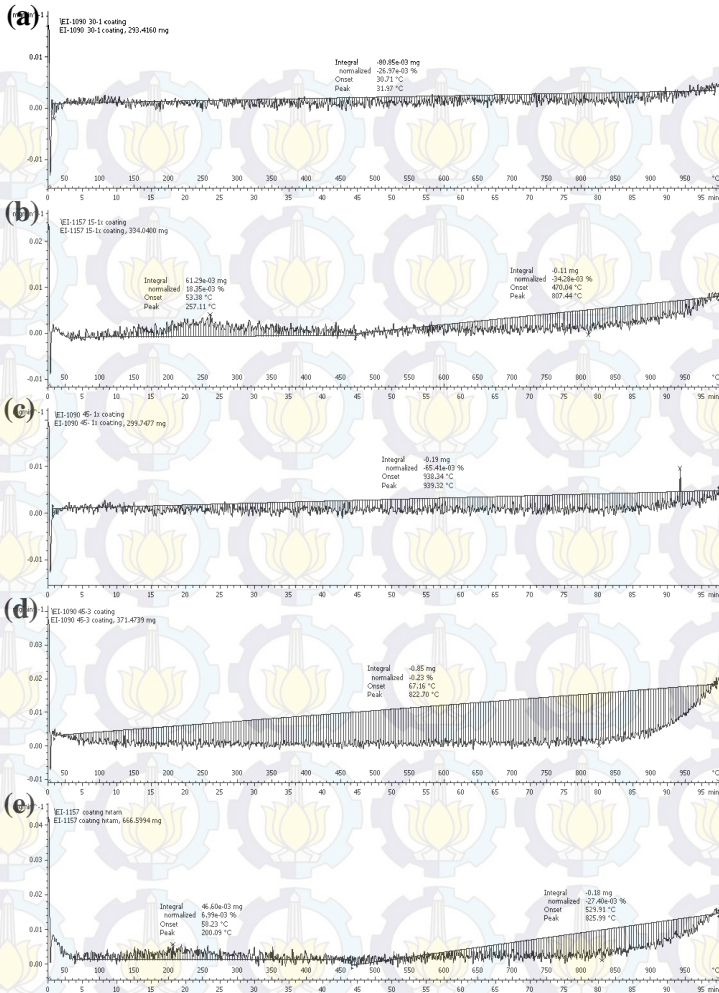
Dari Gambar 4.17 pada sampel YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% - 1x memiliki kenaikan massa yang paling kecil. Sampel YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15% - 1x memiliki kenaikan massa yang hampir sama dengan sampel YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% - 1x hingga temperatur 800 °C, tetapi melewati temperatur tersebut terjadi perubahan massa yang drastis. Hal ini dikarenakan sampel tersebut memiliki kandungan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang lebih sedikit jika dibandingkan dengan sampel YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% - 1x, sehingga ketahanan terhadap penetrasi oksida kurang. Penurunan massa pada temperatur 50-250 °C yang terjadi pada sampel YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15% - 1x karena adanya zat pengotor yang menguap pada range temperatur tersebut. Namun pada sampel YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 3x memiliki kenaikan massa yang tinggi dibandingkan sampel yang lain. Hal ini dikarenakan porositas terbuka yang terjadi pada sampel ini cukup tinggi sehingga menyebabkan jumlah oksigen yang berdifusi melalui *top coat* menuju *bond coat* juga tinggi.

Gambar 4.18 menunjukkan grafik dari analisa *1<sup>st</sup> Derivative*. Grafik ini menunjukkan tingkat kestabilan sampel ketika



dilakukan uji termal. Pada pengujian ini, dapat juga dilihat adanya reaksi eksotermal dan endotermal dari sampel. Reaksi eksotermal ditunjukkan ketika peak pada grafik naik dan reaksi endotermal ditunjukkan ketika peak pada grafik turun. Tingkat kestabilan sampel dapat dilihat dari tinggi rendahnya *noise* yang menunjukkan ketahanan terhadap reaksi eksotermal dan endotermal. Semakin rendah *noise* yang muncul, maka kestabilan sampel semakin baik.

Pada grafik analisa  $I^{st}$  Derivative, terlihat bahwa pada sampel tanpa *coating* mulai terjadi perubahan tinggi rendah *noise* yang menandakan perubahan kestabilan sampel terjadi pada temperatur 100 °C. Sedangkan rata-rata sampel dengan lapisan *coating* mengalami kenaikan pada temperatur 900 °C. Namun pada sampel YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15% - 1x terlihat terjadi perubahan pada temperatur 150 °C. Hal ini dikarenakan kandungan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> paling sedikit. Li (2012) menjelaskan bahwa penambahan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pada YSZ dapat mengurangi konduktivitas termal dari lapisan YSZ sehingga sampel memiliki kestabilan yang lebih baik ketika dilakukan uji TGA. Pada sampel YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 1x kestabilan sampel terganggu pada temperatur 950 °C dan pada sampel YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 3x perubahan *noise* pada temperatur 900 °C dengan gradien perubahan yang sangat signifikan. Pada sampel YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% - 1x perubahan gradien kestabilan sampel hampir tidak terlihat. Sehingga dari hasil analisa  $I^{st}$  Derivative didapatkan tingkat kestabilan sampel dari yang paling stabil berturut-turut adalah YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% - 1x; YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 1x; YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 3x; dan YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15% - 1x.



**Gambar 4.18** Grafik Analisa  $1^{st}$  Derivative TGA

(a) YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% - 1x, (b) YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15% - 1x,

(c) YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 1x, (d) YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 3x

(e) Tanpa coating



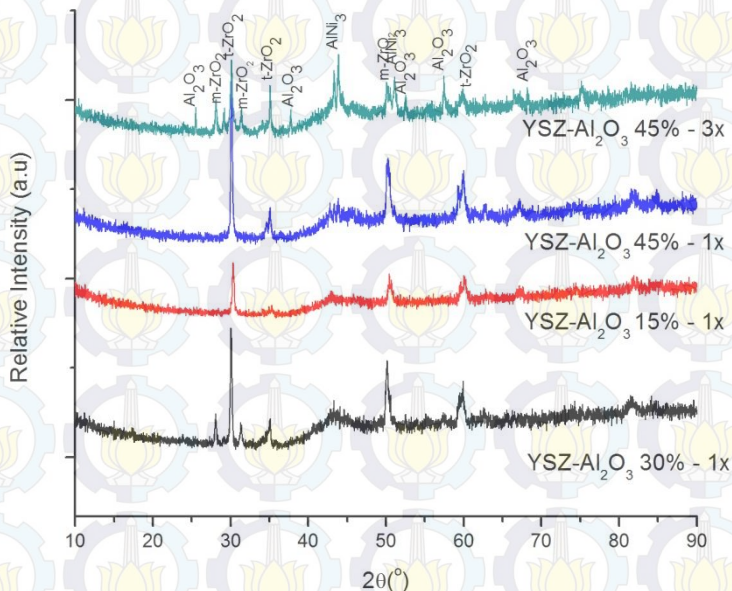


#### 4.1.7 Hasil Pengujian XRD

Pengujian XRD dilakukan untuk mengetahui fasa apa saja yang terbentuk pada lapisan *top coat* setelah proses *flame spray* dan proses pengujian termal TGA pada sampai 1000 °C.

##### 4.1.7.1 Hasil Pengujian XRD Sebelum Uji termal

Pengujian XRD dilakukan dengan menggunakan X-Ray Diffraction PANalytical dengan sudut  $2\theta$   $10^\circ - 90^\circ$ , gelombang  $\text{CuK}\alpha$  sebesar 1.5406 Å. Analisa puncak dilakukan dengan menggunakan *software* PCPDF WIN dan PDF (*Powder Diffraction File*) 2 2011, untuk mencocokkan kartu PDF dengan puncak pada sampel. Dari pengujian didapatkan hasil seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.19.



Gambar 4.19 Hasil Pengujian XRD Pada Permukaan Atas Sebelum Uji Termal Pada Setiap Komposisi





Gambar 4.19 merupakan hasil XRD pada sampel setelah *flame spray* sebelum dilakukan uji termal. Dari gambar tersebut terlihat komposisi YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  45% - 3x *peak* tertinggi yang muncul teridentifikasi pada  $2\theta = 29.15^\circ$ , setelah dilakukan pencocokan dengan kartu pdf, *peak* ini merujuk pada fasa t- $\text{ZrO}_2$  (zirkonia tetragonal) (*ref code* 01-075-9646) dengan bidang kristal (101) dan puncak  $2\theta = 35.08^\circ$  (112), berturut-turut juga merupakan puncak milik fasa t- $\text{ZrO}_2$ . Puncak lain pada  $31.41^\circ$  merupakan puncak milik m- $\text{ZrO}_2$  (zirkonia monoklinik) (*ref code* 00-037-1484) pada bidang kristal (111) dan pada puncak pada  $2\theta = 50.103^\circ$  pada bidang (022). Fasa lain yang terdeteksi adalah  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (01-073-5928), dapat dilihat dengan adanya puncak-puncak  $25.52^\circ$  yang teridentifikasi pada bidang (012),  $37.73^\circ$  pada bidang (110),  $57.46^\circ$  pada bidang 116. Fasa lainnya adalah  $\text{AlNi}_3$  pada  $2\theta = 43.89^\circ$  pada bidang (113) dan pada  $2\theta = 51.17^\circ$  dengan bidang (220).

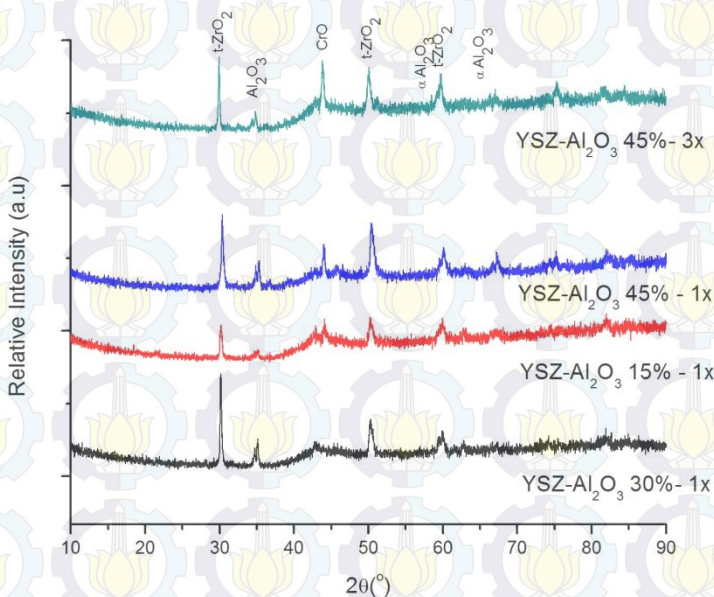
Munculnya *peak* yang teridentifikasi sebagai m- $\text{ZrO}_2$  disebabkan allotropi pada keramik zirkonia di mana memiliki struktur kristal lebih dari satu seiring dengan adanya perubahan temperatur. *Peak* lain yang terdeteksi adalah  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Adanya fasa ini merupakan suatu indikasi bahwa adanya porositas yang menyebabkan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yang seharusnya berada pada lapisan di bawah YSZ menjadi terdeteksi. Anggapan adanya porositas menjadi semakin kuat karena ditemukannya fasa  $\text{AlNi}_3$  (01-071-5884) yang merupakan fasa dari *bondcoat*, hal ini dapat dikarenakan kesalahan pada saat proses pelapisan.

#### 4.1.7.2 Hasil Pengujian XRD Setelah Uji Termal

Setelah pengujian termal dilakukan pengujian XRD kembali. Hasil yang didapatkan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.20. Dari hasil XRD tampak beberapa perubahan pada intensitas



dari puncak-puncak seperti  $t\text{-ZrO}_2$  dibandingkan dengan kondisi sebelum pengujian termal. Fasa  $m\text{-ZrO}_2$  yang sebelumnya muncul setelah proses *flame spray*, pada hasil XRD setelah uji termal sudah tidak terdeteksi dikarenakan  $m\text{-ZrO}_2$  sudah bertransformasi menjadi  $t\text{-ZrO}_2$  pada temperatur sekitar  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ . Transformasi fasa ini menyebabkan perubahan volume pada struktur kristal. Perubahan dari fasa  $m\text{-ZrO}_2$  menjadi  $t\text{-ZrO}_2$  terjadi penyusutan volume pada saat pendinginan yang menyebabkan timbulnya tarikan pada struktur kristal dan menyebabkan terjadi inisiasi *crack* (DeMasi et al, 1989).



**Gambar 4.20** Hasil Pengujian XRD Pada Permukaan Atas Sesudah Uji Termal Pada Setiap Komposisi

Munculnya peak yang teridentifikasi sebagai fasa  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  pada  $2\theta = 59.68^\circ$  pada bidang (211) dan  $66.35^\circ$  pada bidang (214)



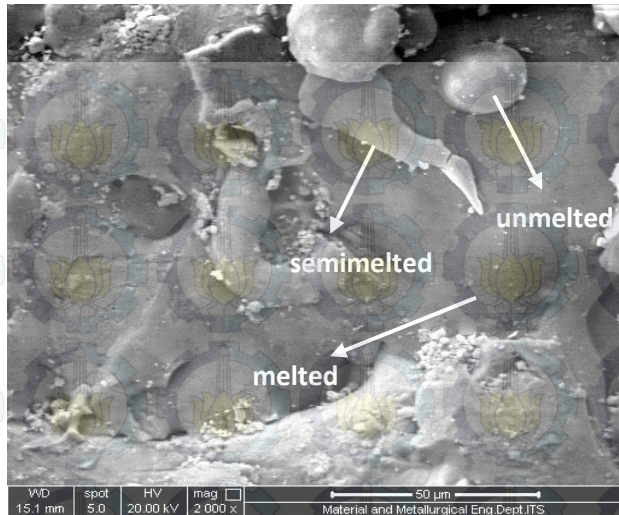
karena adanya oksidasi yang terjadi dengan Al dari *bondcoat* saat uji termal. Dijumpai juga puncak baru teridentifikasi sebagai CrO (01-078-0722), hal ini menunjukkan adanya kerusakan pada permukaan sampel sehingga oksida yang berasal dari kandungan Cr pada *bondcoat* ikut terdifraksi.

#### 4.1.8 Hasil Pengujian SEM

Pengujian SEM (*Scanning Electron Microscope*) dilakukan untuk mengetahui struktur morfologi dari permukaan *top coat* dan penampang melintang pada spesimen setelah proses *flame spray* dan setelah pengujian termal.

Hasil pengujian SEM ditemukan beberapa kondisi serbuk dari lapisan *top coat* setelah dilakukan proses *coating* seperti ditunjukkan pada Gambar 4.21. Struktur partikel yang menempel (*splats*) berbentuk lamellar. Pada permukaan *top coat* terlihat bahwa ada serbuk yang meleleh (*melted*), meleleh sebagian (*semi melted*), dan tidak meleleh (*unmelted*). Hal ini dikarenakan kecepatan rata-rata material serbuk yang ditembakkan dengan menggunakan metode *flame spray* sekitar 30 m/s, yang tergolong rendah apabila dibandingkan dengan metode *spray* yang lainnya (*ASM Handbook of Thermal Spray*, 2004) sehingga ketika proses *spray* serbuk mengalami pendinginan di udara relatif lebih lama, mengakibatkan serbuk sebagian ada yang tidak meleleh atau semi meleleh ketika menyentuh permukaan substrat.





**Gambar 4.21** Hasil Pengujian SEM Permukaan *Coating* pada Perbesaran 2000x

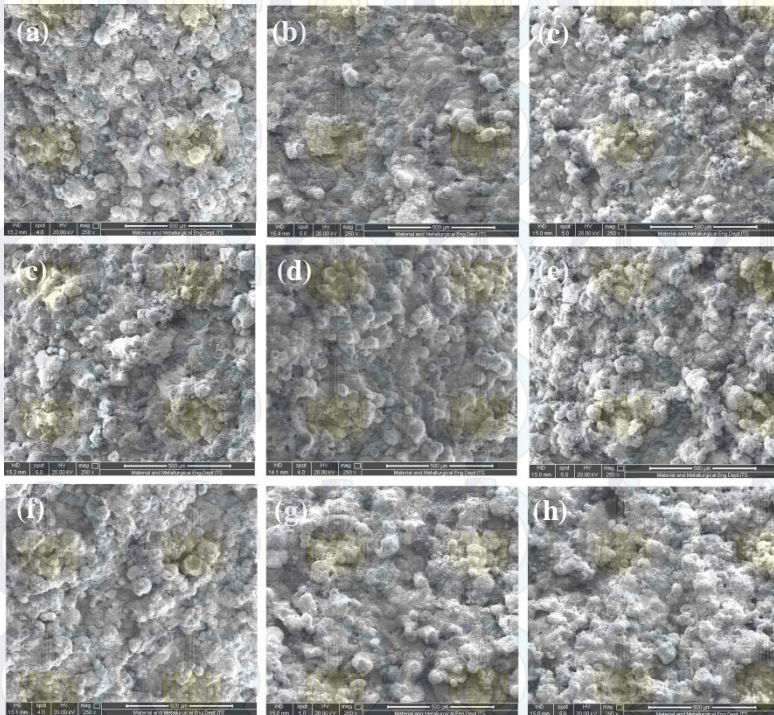
#### 4.1.8.1 Hasil Pengujian SEM Sebelum Uji Termal

Hasil pengujian SEM pada permukaan setiap sampel setelah proses *flame spray* ditunjukkan pada Gambar 4.24. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa struktur yang dihasilkan oleh metode *flame spray* memang cenderung kurang teratur dan kasar. Fenomena ini dimulai dari proses awal droplet (serbuk panas yang keluar saat *spray*) pada saat masing-masing partikel menyerap energi panas nyala api. Partikel besar cenderung membentuk droplet dalam ukuran besar dengan tingkat volume partikel yang meleleh yang rendah atau leleh sebagian (Sobolev, 1997), droplet dengan kondisi tersebut akan menumbuk substrat membentuk lamellar dalam ukuran yang besar. Tumpukan lamellar yang besar akan membentuk lapisan yang memiliki nilai kekasaran yang tinggi. Sedangkan partikel yang memiliki ukuran





kecil akan mudah untuk meleleh penuh membentuk droplet cair dan berdeposisi ke arah samping membentuk lapisan yang memiliki permukaan yang halus. Sesaat setelah droplet menumbuk substrat akan terbentuk splat dengan ketebalan yang sangat dipengaruhi oleh kecepatan pergerakan droplet sesaat sebelum berdeposisi. Ketebalan splat berkurang dengan bertambahnya kecepatan droplet dan sebaliknya.



**Gambar 4.22** Hasil Pengujian SEM Permukaan *Coating* pada

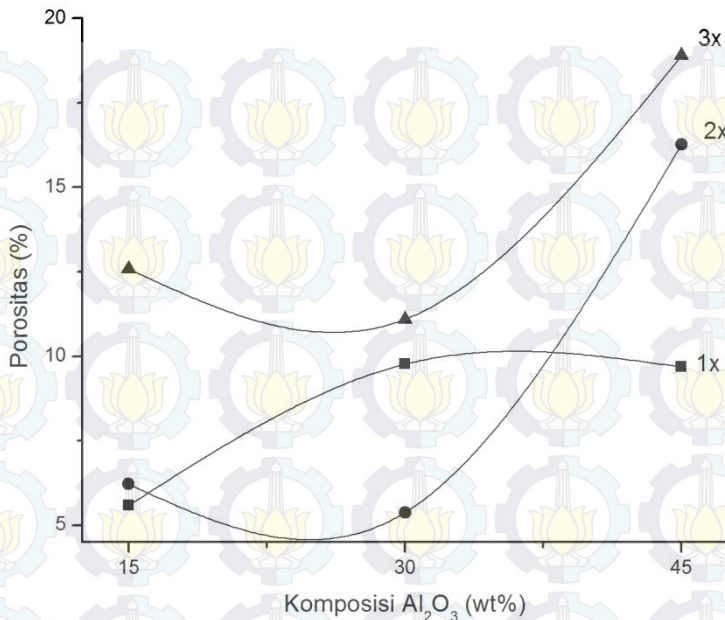
Perbesaran 250x (a) YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>15% - 1x,

(b) YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15% - 2x, (c) YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15% - 3x,

(d) YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% - 1x, (e) YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% - 2x,

(f) YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>30% - 3x, (g) YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 1x,

(h) YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 2x, (i) YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 3x

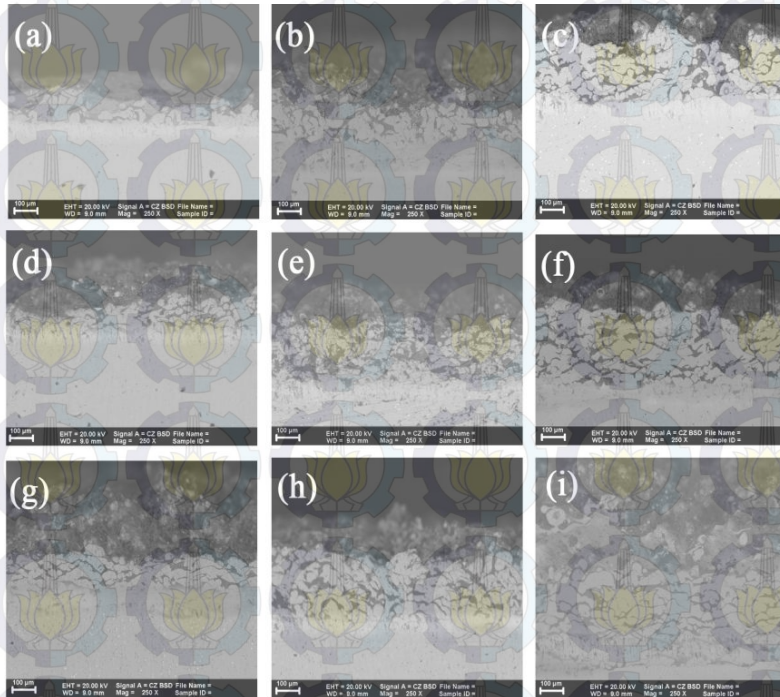


**Gambar 4.23** Grafik Presentase Luasan Porositas pada Permukaan Hasil *Coating* tiap Sampel

Dari Gambar 4.22 dilakukan pengukuran terhadap luasan porositas terbuka. Gambar 4.23 menunjukkan grafik presentase luasan porositas pada permukaan hasil *coating*. Dapat dilihat dari grafik sampel dengan komposisi YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  45% memiliki porositas yang besar dibandingkan sampel yang lain. Hal ini dikarenakan jumlah serbuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yang berukuran lebih kecil lebih banyak, serbuk dengan ukuran yang lebih kecil ini memiliki luas permukaan yang lebih besar menyebabkan friksi antar partikel yang tinggi sehingga mudah memadat. Pencampuran yang terjadi tidak merata. Selain itu, serbuk yang memadat ini



menyebabkan kemacetan pada proses *coating* sehingga serbuk komposit tidak terdeposisi pada permukaan dengan merata.



**Gambar 4.24** Hasil Pengujian SEM Penampang Melintang pada Perbesaran 250x (a) YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>15% - 1x, (b) YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15% - 2x, (c) YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15% - 3x, (d) YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% - 1x, (e) YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% - 2x, (f) YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>30% - 3x, (g) YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 1x, (h) YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 2x, (i) YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45%- 3x

Hasil SEM penampang melintang setiap spesimen pada tiap variabel yang digunakan setelah proses *flame spray* ditunjukkan pada Gambar 4.24. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa kompleksitas mikrostruktur semakin banyak dengan semakin





tingginya jumlah sapan, terlihat bahwa inklusi oksida pada hasil *coating* semakin banyak seiring dengan bertambahnya jumlah sapan.

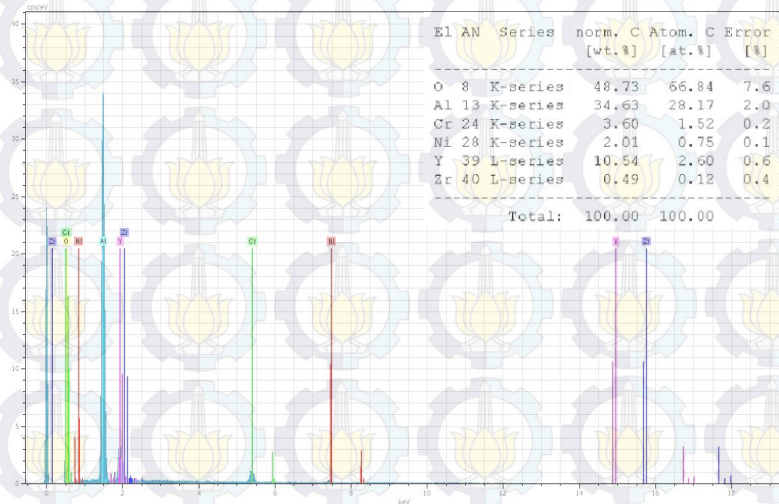
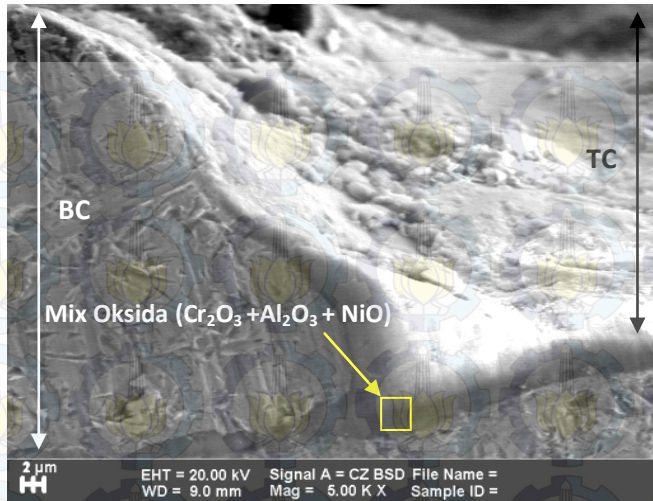
Gambar 4.25 – 4.28 menunjukkan hasil SEM setelah *Flame Spray* sebelum dilakukan uji termal dengan perbesaran 5000x di daerah *interface* antara *top coat* dengan *bond coat*, selanjutnya dilakukan EDX untuk mengetahui kandungan unsur pada daerah tersebut.

Pada Gambar 4.25 dapat diketahui bahwa antara lapisan *top coat* dan *bond coat* terdapat daerah yang berwarna gelap, daerah ini diidentifikasi sebagai daerah pertumbuhan oksida atau TGO (*Thermally Grown Oxide*). TGO merupakan bagian dari *bond coat* yang mengalami oksidasi karena adanya perubahan temperatur yang cukup tinggi (Padture, 2002). Hal ini dibuktikan dengan hasil EDX dengan adanya unsur O sebesar 48.73% yang menunjukkan adanya pembentukan oksida. Terbentuknya oksida ini karena adanya reaksi dengan unsur lain pada *bond coat* antara lain Al 34.63%, Cr 3.60%, dan Ni 2.01%. Tebal daerah TGO pada sampel ini setelah dilakukan pengukuran sekitar 1.85  $\mu\text{m}$ .

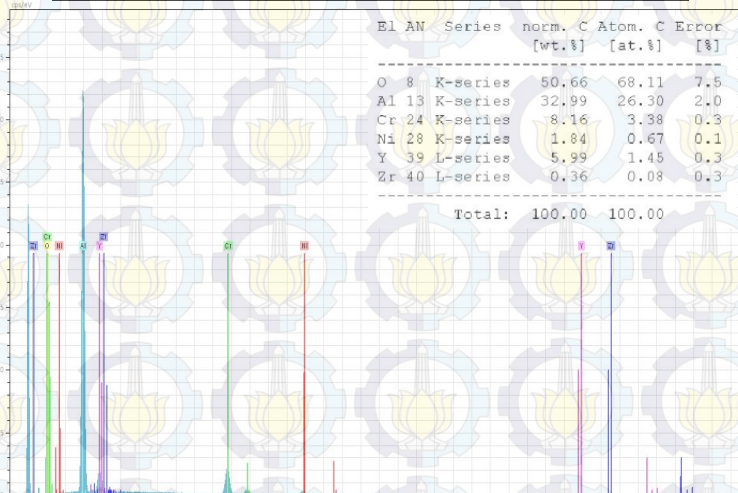
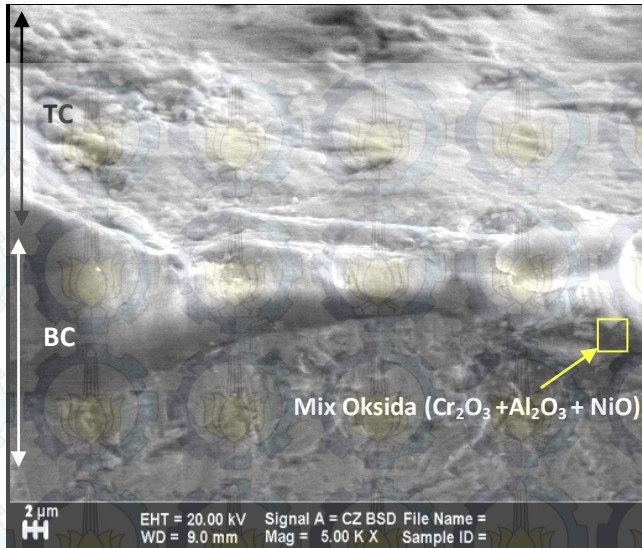
Pada Gambar 4.26 daerah TGO spesimen YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15% - 1x terdeteksi dengan menggunakan EDX memiliki ketebalan 2.18  $\mu\text{m}$  dengan kandungan O sebanyak 50.66%, Al 32.99%, Cr 8.16%, dan Ni 1.84%.

Gambar 4.27 daerah TGO spesimen YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 1x terdeteksi menggunakan EDX dengan kandungan O 50.99%, Al 33.93%, Cr 6.66%, dan Ni 1.52. Ketebalan TGO yang terbentuk adalah 4.15  $\mu\text{m}$ .

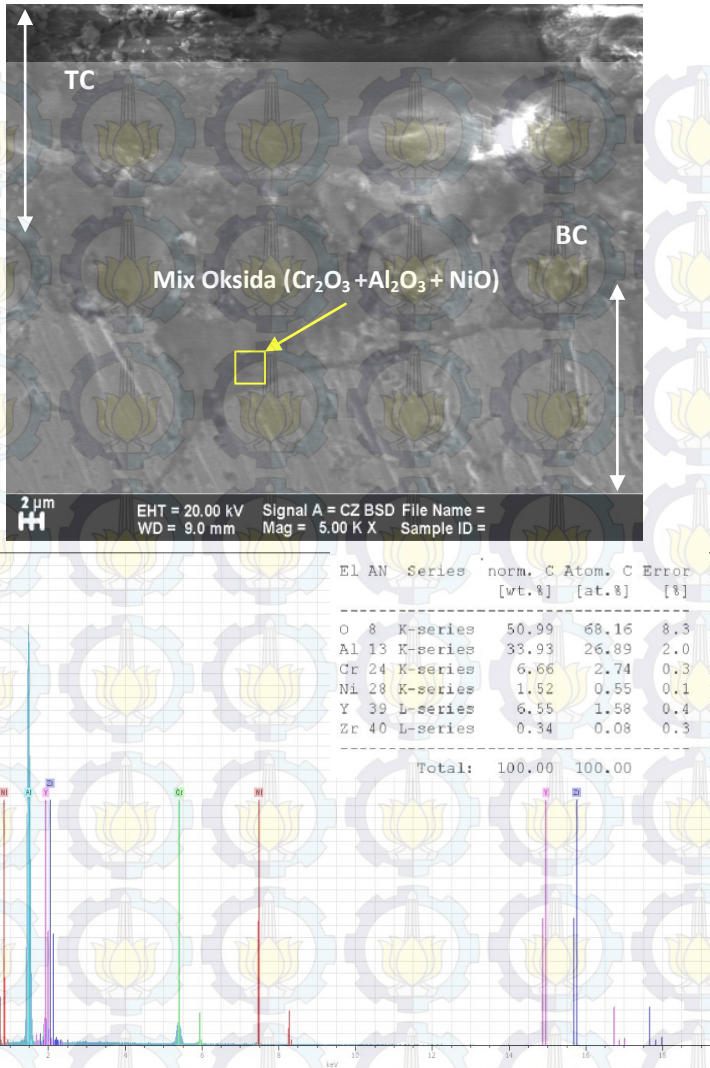




**Gambar 4.25** Hasil Pengujian SEM-EDX dengan Perbesaran 5000x pada Spesimen YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% - 1x Setelah Proses *Flame Spray*

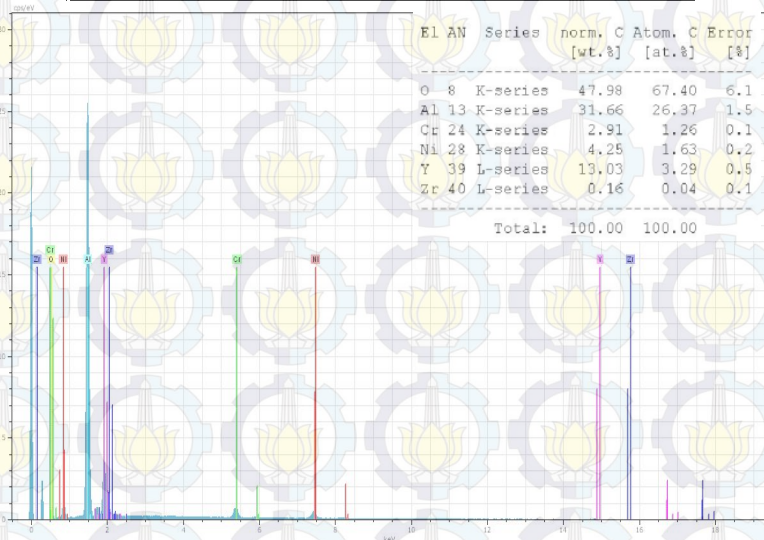
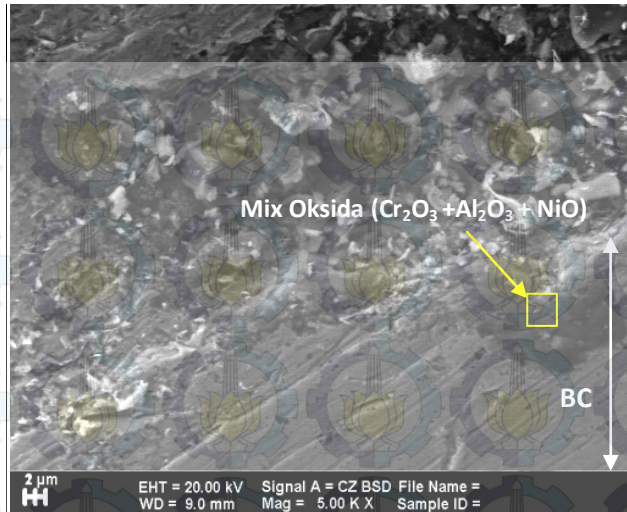


**Gambar 4.26** Hasil Pengujian SEM-EDX dengan Perbesaran 5000x pada Spesimen YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15% - 1x Setelah Proses *Flame Spray*



**Gambar 4.27** Hasil Pengujian SEM-EDX dengan Perbesaran 5000x pada Spesimen YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 1x Setelah Proses *Flame Spray*





**Gambar 4.28** Hasil Pengujian SEM-EDX dengan Perbesaran 5000x pada Spesimen YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 3x Setelah Proses *Flame Spray*





Pada Gambar 4.28 daerah TGO spesimen YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 3x yaitu O 47.98%, Al 31.66%, Cr 2.91%, dan 4.25%. Ketebalan TGO yang terbentuk adalah 6.09  $\mu\text{m}$ .

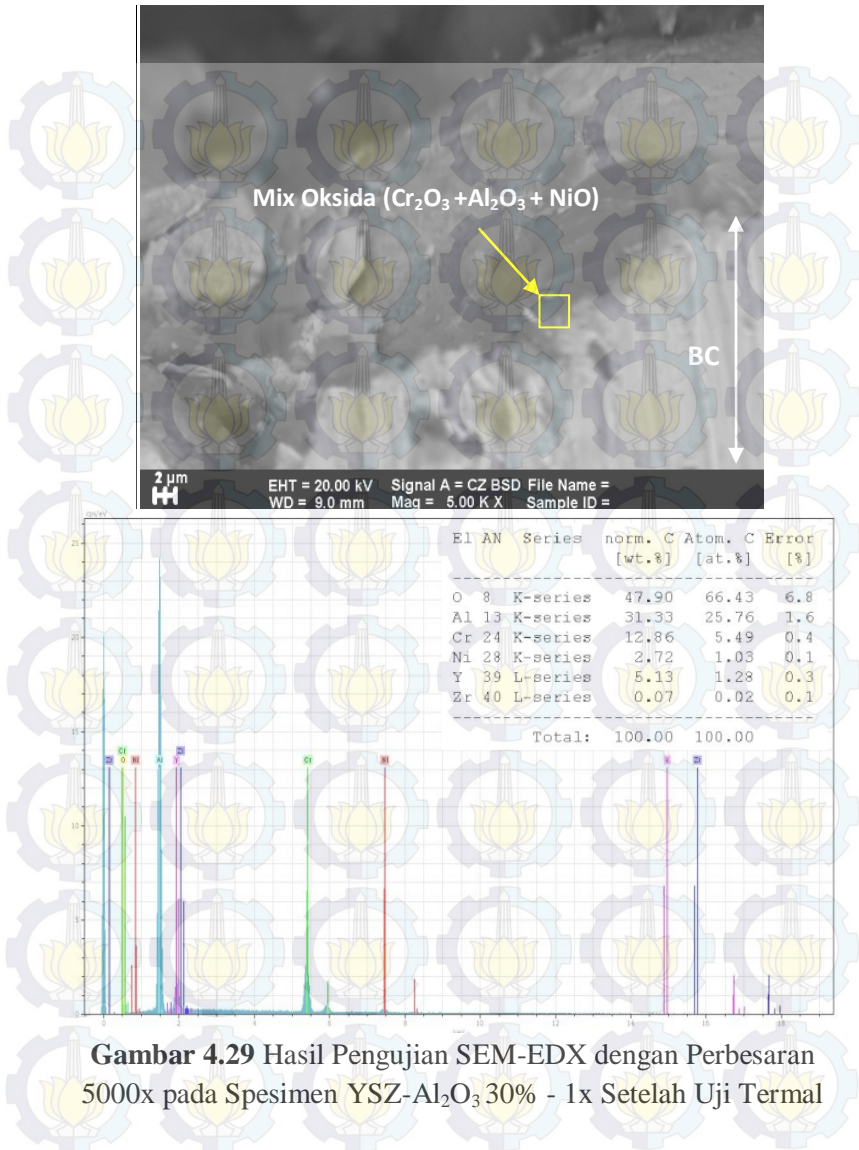
TGO yang muncul sebelum dilakukan uji termal disebabkan karena adanya pengaruh panas saat proses *thermal spray* dilakukan. Ketika melakukan proses pelapisan *topcoat*, *bond coat* terpengaruh panas sehingga terjadi oksidasi dan tumbuh lapisan TGO.

#### 4.1.8.2 Hasil Pengujian SEM Setelah Uji Termal

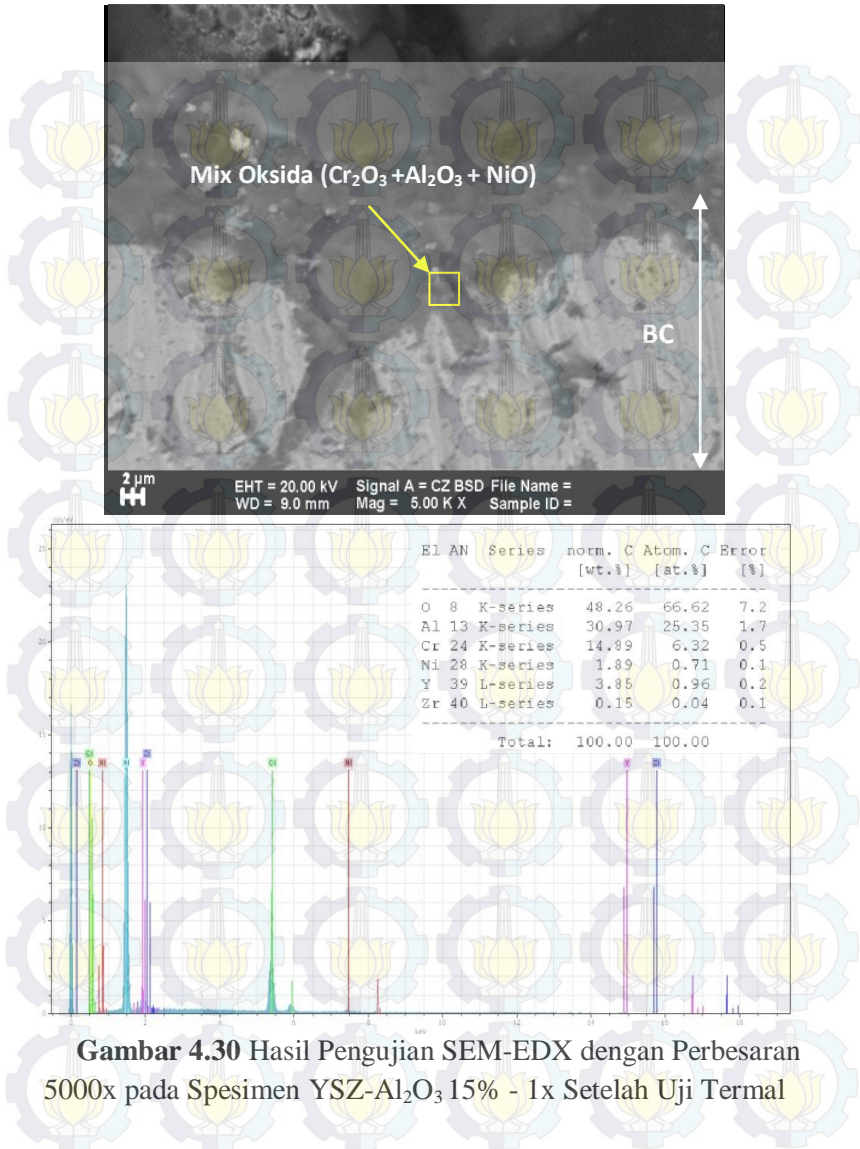
Pengujian termal dilakukan menggunakan alat TGA (*thermogravimetri*) dengan memanaskan sampel hingga temperatur 1000 °C dan laju kenaikan temperatur 10 °C/min. Setelah dilakukan pengujian, sampel kemudian diuji SEM untuk melihat daerah penampang antara *top coat* dan *bond coat* serta melihat pertumbuhan dari TGO dan kondisi dari lapisan.

Gambar 4.29 merupakan hasil SEM dan EDX dari spesimen YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% - 1x setelah uji termal. Dari hasil tersebut diketahui bahwa tebal TGO bertambah dari 1.85  $\mu\text{m}$  menjadi 6.76  $\mu\text{m}$  dan ditemukan *microcrack* dengan ukuran rata-rata 0.44  $\mu\text{m}$ . Berdasarkan hasil EDX kandungan O 47.90%, Al 31.33%, Cr 12.86%, dan Ni 2.72%.

Gambar 4.30 merupakan hasil SEM dan EDX dari spesimen YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 1x setelah uji termal. Tebal TGO bertambah dari 2.11  $\mu\text{m}$  menjadi 6.83  $\mu\text{m}$ . Dapat dilihat pula adanya *microcrack* dengan ukuran rata-rata 0.89  $\mu\text{m}$ . Berdasarkan hasil EDX kandungan O 48.26%, Al 30.97%, Cr 14.89%, dan Ni 1.89%.

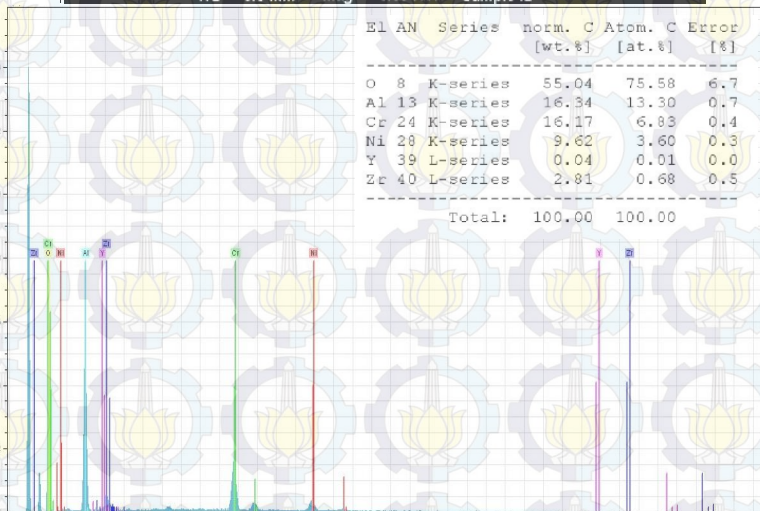
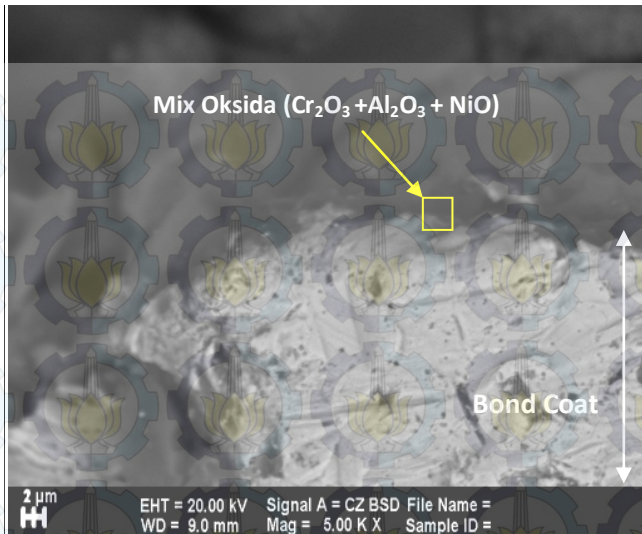


**Gambar 4.29** Hasil Pengujian SEM-EDX dengan Perbesaran 5000x pada Spesimen YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  30% - 1x Setelah Uji Termal



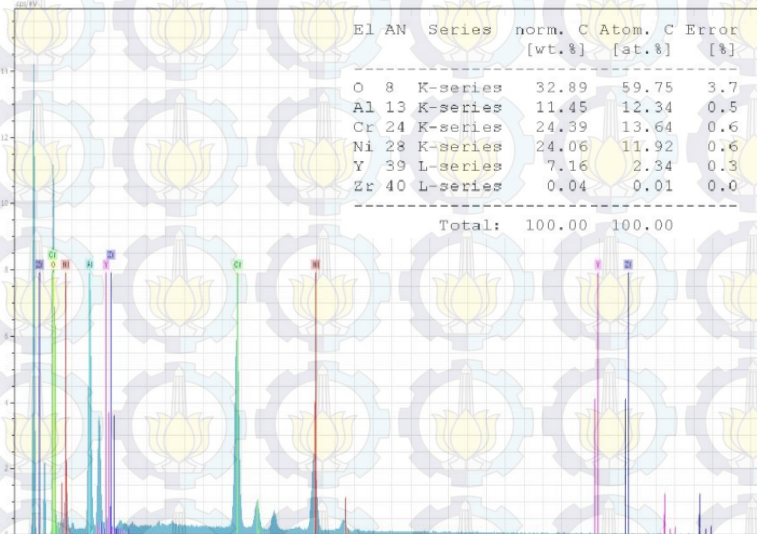
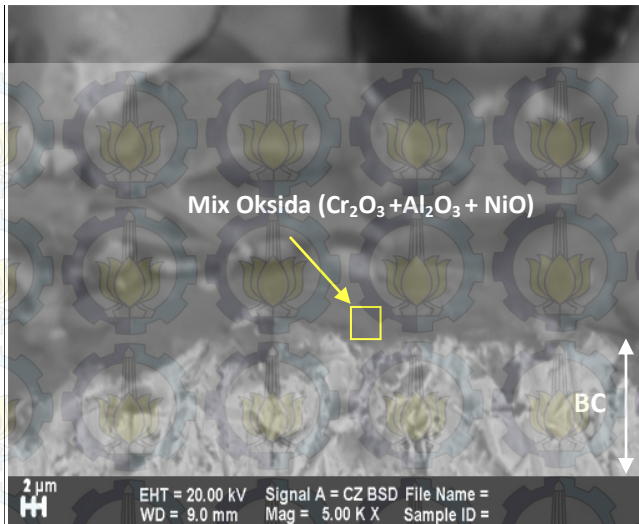
**Gambar 4.30** Hasil Pengujian SEM-EDX dengan Perbesaran 5000x pada Spesimen YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  15% - 1x Setelah Uji Termal





Gambar 4.31 Hasil Pengujian SEM-EDX dengan Perbesaran 5000x pada Spesimen YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 1x Setelah Uji Termal





**Gambar 4.32** Hasil Pengujian SEM-EDX dengan Perbesaran 5000x pada Spesimen YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 3x Setelah Uji Termal



Gambar 4.31 merupakan hasil SEM dan EDX dari spesimen YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 1x setelah uji termal. Tebal TGO bertambah dari 4.46  $\mu\text{m}$  menjadi 7.59  $\mu\text{m}$ . Dapat dilihat pula adanya *microcrack* dengan ukuran rata-rata 0.96  $\mu\text{m}$ . Berdasarkan hasil EDX kandungan O 55.04%, Al 16.34%, Cr 16.17%, dan Ni 9.62%.

Gambar 4.32 merupakan hasil SEM dan EDX dari spesimen YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 3x setelah uji termal. Tebal TGO bertambah dari 6.09  $\mu\text{m}$  menjadi 8.56  $\mu\text{m}$ . Dapat dilihat pula adanya *microcrack* dengan ukuran rata-rata 1.07  $\mu\text{m}$ . Berdasarkan hasil EDX kandungan O 32.89%, Al 11.45%, Cr 24.39%, dan Ni 24.06%.

Dari keempat sampel uji termal maka didapatkan lebar TGO dan lebar *mikrocrack* yang terbentuk yang ditampilkan pada Tabel 4.8. Perbandingan tebal TGO dan ukuran retak sebelum dan sesudah uji termal dalam tabel berikut:

**Tabel 4.8** Perbandingan Tebal TGO dan Ukuran Retak Sebelum dan Sesudah Uji Termal

Sampel	Sebelum Uji Termal		Sesudah Uji Termal	
	TGO ( $\mu\text{m}$ )	Crack ( $\mu\text{m}$ )	TGO ( $\mu\text{m}$ )	Crack ( $\mu\text{m}$ )
YSZ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 30% - 1x	1.85	-	6.76	0.44
YSZ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 15% - 1x	2.11	-	6.83	0.89
YSZ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 45% - 1x	4.46	-	7.59	0.96
YSZ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 45% - 3x	6.09	-	8.56	1.07

## 4.2 Pembahasan

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa pengaruh komposisi dan sapuan komposit YSZ/YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> terhadap ketahanan termal dan kekuatan lekat pada YSZ/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-YSZ *double layer* TBC untuk aplikasi nosel roket yang memiliki



temperatur kerja 800-900 °C. *Thermal Barrier Coating* (TBC) merupakan salah satu aplikasi dari teknik pelapisan yang diaplikasikan pada material yang bekerja pada temperatur tinggi. TBC digunakan untuk menurunkan transfer panas dari lingkungan, sehingga struktur menjadi aman terhadap panas. Salah satu metode melapiskan TBC ini adalah menggunakan *thermal spray*. Kelebihan dari metode ini adalah dapat mendepositkan semua material menjadi *coating* dengan ketebalan yang bervariasi yaitu dari 50  $\mu\text{m}$  sampai 6.5 mm (ASM *Handbook of Thermal Spray*, 2004).

Secara umum kriteria *coating* yang baik harus yaitu memiliki kesesuaian antara lapisan *coating* dengan substrat (*substrat compatibility*), porositas yang rendah, dan kekuatan lekat yang tinggi (*good adhesion*) (ASM *Handbook of Thermal Spray*, 2004). Pada penelitian ini substrat yang digunakan adalah Hastelloy<sup>®</sup> X yang merupakan paduan logam yang bisa digunakan pada temperatur tinggi dengan *base metal* nikel. Kemudian dilapiskan dengan *bond coat* NiCrAlY, komposit YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan YSZ secara berurutan.

Pada kriteria kesesuaian antara lapisan *coating* dengan substrat, serbuk yang digunakan telah memiliki kesesuaian dengan substrat yang digunakan. Kesesuaian tersebut meliputi CTE (*coefficient thermal expansion*), temperatur kerja, *melting point*, dan juga kecocokan komposisi kimia. Dari hasil uji XRD diketahui bahwa fasa dari serbuk YSZ adalah t-ZrO<sub>2</sub>. Fasa ini merupakan fasa yang diharapkan karena kestabilannya pada temperatur tinggi. Dan dari hasil karakterisasi serbuk sudah didapatkan ukuran serbuk yang sesuai dengan spesifikasi *gun flame spray* (40-150  $\mu\text{m}$ ). Ini menunjukkan serbuk yang ada dapat digunakan untuk mengoptimalkan parameter proses yang digunakan.





#### 4.2.1 Pengaruh Komposisi $\text{Al}_2\text{O}_3$ dan Sapuan pada Komposit YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$ terhadap Porositas pada Hasil *Coating* TBC YSZ/YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$

Kriteria hasil *coating* selanjutnya adalah porositas yang rendah. Pada hasil XRD Gambar 4.19 porositas terdeteksi dengan adanya fasa  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Adanya fasa ini merupakan suatu indikasi bahwa adanya porositas yang menyebabkan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yang seharusnya berada pada lapisan di bawah YSZ menjadi terdeteksi.

Porositas yang baik untuk lapisan TBC sekitar 8-15% (ASM *Handbook of Thermal Spray*, 2004)). Untuk mengetahui besar porositas yang terbentuk pada hasil *coating* dilakukan pengujian SEM untuk mengetahui ukuran luasan porositas terbuka. Presentase luasan porositas sebesar 10.6%. Dengan metode *flame spray* dimungkinkan porositas lebih dari 15% (Jr, Tucker, *Thermal Spray Coatings*, 1994).

Dapat dilihat dari Gambar 4.23 sampel dengan komposisi YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  45% memiliki porositas yang besar dibandingkan sampel yang lain. Hal ini dikarenakan jumlah serbuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yang berukuran lebih kecil lebih banyak, serbuk dengan ukuran yang lebih kecil ini memiliki luas permukaan yang lebih besar menyebabkan friksi antar partikel yang tinggi sehingga mudah memadat. Pencampuran yang terjadi tidak merata. Selain itu, serbuk yang memadat ini menyebabkan kemacetan pada proses *coating* sehingga serbuk komposit tidak terdeposisi pada permukaan dengan merata. Namun variasi dari komposisi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dan jumlah sapuan pada komposit tidak dapat menggambarkan dari luasan porositas. Hal ini dikarenakan lapisan terluar hasil *coating* adalah lapisan YSZ yang tidak divariasikan pada penelitian ini.

---





#### 4.2.2 Pengaruh Komposisi $\text{Al}_2\text{O}_3$ dan Sapuan pada Komposit YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$ terhadap Kekuatan Lekat pada Hasil *Coating* TBC YSZ/YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$

Kriteria hasil *coating* yang lain adalah memiliki kekuatan lekat yang tinggi (*good adhesion*). Pada penelitian ini nilai kekuatan lekat yang dicapai adalah 10-17 MPa dengan rata-rata nilai kekuatan lekat yang dihasilkan sebesar 13.12 MPa (Tabel 4.1). Hasil ini sesuai teori bahwa nilai kekuatan lekat yang dihasilkan dengan metode *flame spray* yaitu 7-25 Mpa. Nilai kekuatan lekat ini termasuk rendah jika dibandingkan dengan metode *thermal spray* yang lainnya (ASM *Handbook of Thermal Spray*, 2004).

Dari hasil pengujian lekat sampel dengan komposisi YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  30% memiliki rata-rata kekuatan lekat yang paling tinggi. Dari perhitungan kombinasi level variabel optimum juga didapatkan dari sampel YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  30%. Hal ini dikarenakan komposisi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yang tinggi berfungsi sebagai *oxygen barrier* untuk mengurangi munculnya lapisan TGO yang bisa menyebabkan penurunan kekuatan lekat. Tren nilai variabel komposisi yang didapatkan pada hasil uji kekuatan lekat ini adalah semakin tinggi komposisi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pada komposit YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  menyebabkan kekuatan lekatnya semakin baik.

Namun pada grafik terlihat hasil uji lekat dari YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  45% memiliki rata-rata kekuatan lekat yang lebih rendah dibandingkan dengan 30%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -YSZ. Hal ini dapat dijelaskan dengan melihat porositas terbuka pada sampel tersebut. Porositas permukaan pada sampel YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  45% lebih tinggi dibandingkan pada sampel lain (Gambar 4.23). Porositas menyebabkan kohesi antar lapisan *coating* rendah (ASM *Handbook of Thermal Spray*, 2004).



Pada variasi jumlah sapuan juga menunjukkan penurunan kekuatan lekat seiring bertambahnya jumlah sapuan. Rajasekaran (2011) mengemukakan bahwa *multi-pass coating* (*coating* dengan lebih dari satu sapuan) menyebabkan kompleksitas pada mikrostruktur yang terbentuk. Perbandingan kompleksitas mikrostruktur dapat dilihat dari Gambar 4.24. Dari gambar tersebut terlihat bahwa inklusi oksida yang terbentuk semakin banyak seiring bertambahnya jumlah sapuan. Semakin banyak inklusi oksida yang terperangkap pada hasil *coating*, menyebabkan kekerasan meningkat sehingga hasil *coating* menjadi *brittle*. Hal ini menyebabkan penurunan terhadap kekuatan lekat yang dihasilkan (ASM *Handbook of Thermal Spray*, 2004). Tren nilai Kekuatan lekat optimum pada 1x sapuan.

#### **4.2.3 Pengaruh Komposisi $\text{Al}_2\text{O}_3$ dan Sapuan pada Komposit YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$ terhadap Ketahanan Termal pada Hasil *Coating* TBC YSZ/YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$**

Untuk dapat melindungi struktur pada temperatur tinggi, TBC harus memiliki ketahanan termal yang baik (Keyvani, 2010). Pada penelitian ini dilakukan pengujian terhadap ketahanan termal dengan dua metode yaitu pengujian *thermal torch* untuk mengetahui ketahanan termal secara langsung dan uji TGA untuk melihat ketahanan termal *non isothermal*.

Dari hasil analisa sampel terhadap pembebanan termal secara langsung oleh busur las *oxyacetylene* dapat dilihat bahwa sampel yang memiliki ketahanan baik terhadap penetrasi api asetilen adalah 30%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -YSZ 1 sapuan. Hal ini terjadi karena sampel 30%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -YSZ 1 sapuan memiliki kestabilan *coating* yang baik ketika dilakukan uji termal terbukti dari hasil yang ditunjukkan oleh grafik hasil uji  $1^{\text{st}}$  *Derivative TGA* (Gambar 4.18).

---



Namun pada sampel 15%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -YSZ dan 45%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -YSZ memiliki ketahanan yang buruk dibandingkan sampel yang lain. Sampel 15%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -YSZ memiliki komposisi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yang rendah sehingga menyebabkan ketahanan terhadap penetrasi oksida berkurang untuk mengurangi munculnya lapisan TGO. Sampel 45%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -YSZ juga memiliki ketahanan termal yang buruk. Hal ini disebabkan karena porositas yang ada cukup tinggi (Gambar 4.23). Porositas pada sampel 45%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -YSZ - 3x menyebabkan oksigen berdifusi melalui celah menuju *bond coat* kemudian terjadi oksidasi di permukaan *bond coat*. Selain itu, oksida yang terperangkap selama proses *coating* yang menyebabkan kompleksitas pada *multi-pass coating* menyebabkan *adhesi* pada lapisan *coating* rendah dan *coating* mudah terkelupas. Akibatnya *coating* mudah rusak ketika terekspos temperatur tinggi secara tiba-tiba.

Ketahanan termal berdasarkan hasil pengujian TGA (*non isothermal*) terbaik juga pada sampel YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  30% - 1x yang memiliki kenaikan massa yang paling kecil (Gambar 4.17). Namun pada sampel YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  45% - 3x memiliki kenaikan massa yang tinggi dibandingkan sampel yang lain. Hal ini dikarenakan pada sampel tersebut porositas yang terbentuk banyak sehingga menyebabkan oksigen lebih banyak masuk ke lapisan *bond coat* dan kemudian membentuk lapisan TGO. Pada Tabel 4.8 penambahan massa ini dapat dijelaskan dengan adanya penebalan lapisan TGO yang terbentuk sebelum dan sesudah uji termal. Dari hasil tersebut didapatkan tebal TGO dari nilai yang paling kecil berturut-turut adalah 30%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -YSZ 1 sapuan; 45%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -YSZ 1 sapuan; 15%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -YSZ 1 sapuan dan 45%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -YSZ 3 sapuan.

Saremi (2014) menyatakan TGO merupakan produk hasil reaksi pada *Thermal Barrier Coating* (TBC) yang menjadi faktor





kunci untuk mengontrol *lifetime* dari TBC (Saremi, 2014). Pada penelitian yang dilakukan oleh Jackson dkk (2011) bahwa batas kritis dari tebal TGO sebelum TBC mengalami kegagalan adalah 3 – 10  $\mu\text{m}$ .

TGO dideteksi dengan menggunakan EDX. Berdasarkan hasil EDX oksida terbesar datang dari Al. Hal ini dikarenakan Al memiliki posisi paling bawah pada diagram Ellingham jika dibandingkan dengan Cr dan Ni sehingga menyebabkan Al akan lebih cepat teroksidasi (Mehdi dan Kamran, 2012). Daaronparvar (2013) mengatakan bahwa pada daerah TGO umumnya terdiri atas beberapa formasi oksida antara lain  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $(\text{Cr},\text{Al})_2\text{O}_3 + (\text{Co},\text{Ni})(\text{Cr},\text{Al})_2\text{O}_4 + \text{NiO}$  yang selanjutnya disebut formasi CSN dan  $(\text{Cr},\text{Al})_2\text{O}_3 + (\text{Co},\text{Ni})(\text{Cr},\text{Al})_2\text{O}_4$  yang selanjutnya disebut sebagai CS. Formasi oksida ini dapat diidentifikasi pada hasil EDX sebelum dan setelah uji termal. Pada semua sampel unsur Cr dan Ni mengalami kenaikan setelah uji termal.

Dari hasil XRD formasi CS dan CSN ini dapat teridentifikasi dari perbedaan pada identifikasi  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ .  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yang terbentuk berbeda dengan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sebelum dilakukan uji termal yang didapatkan dari hasil analisa kartu PDF (01-088-0826). Perbedaan ini dimungkinkan karena adanya oksidasi yang terjadi dengan Al dari *bondcoat* saat uji termal. Selain itu juga muncul puncak baru yang terdeteksi sebagai CrO (01-078-0722) yang merupakan hasil oksidasi dengan Cr yang berada pada *bondcoat*. Fasa ini teridentifikasi pada XRD karena permukaan yang terkelupas.

Semakin tinggi komposisi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ketebalan TGO semakin tipis. Menurut penelitian C. Zhu dkk (2011), C. Ren dkk (2011), Mehdi dan Kamran (2012) dan Saremi (2012), hal ini dikarenakan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  merupakan oksida yang bersifat sebagai *oxygen barrier* sehingga dengan adanya  $\text{Al}_2\text{O}_3$  menahan adanya penetrasi oksigen. *Microcrack* terlihat pada sampel setelah

---





pegujian TGA. Hal ini dapat dikarenakan ketidakcocokan CTE antara substrat dan TGO. Ketidakcocokan CTE ini menyebabkan tegangan pada saat diberi beban termal menginisiasi terbentuknya *microcrack*. Selain itu, *microcrack* terjadi karena adanya penyusutan volume pada saat perubahan fasa dari  $m\text{-ZrO}_2$  menjadi  $t\text{-ZrO}_2$ . Dari hasil XRD pada Gambar 4.19 dan Gambar 4.20, fasa  $m\text{-ZrO}_2$  sebelumnya muncul setelah proses *flame spray*, tetapi setelah uji TGA pada  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  fasa tersebut telah bertransformasi menjadi  $t\text{-ZrO}_2$ . Transformasi fasa ini menyebabkan perubahan volume pada struktur kristal. Perubahan dari fasa  $m\text{-ZrO}_2$  menjadi  $t\text{-ZrO}_2$  terjadi penyusutan volume pada saat pendinginan yang menyebabkan timbulnya tarikan pada struktur kristal dan menyebabkan terjadi inisiasi *crack* (DeMasi et al, 1989).



## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan tentang pengaruh komposisi dan jumlah sapuan dari lapisan YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  terhadap kelekatan dan ketahanan termal dari struktur YSZ/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ -YSZ *double layer* TBC pada substrat Hastelloy® X dengan metode *flame spray*, maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Komposisi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pada lapisan komposit YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  memberikan pengaruh terhadap sifat kelekatan dan ketahanan termal dari YSZ/YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  *double layer* TBC. Semakin tinggi komposisi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pada komposit YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  kekuatan lekat dan ketahanan termal yang dihasilkan semakin baik dan optimum pada YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  30%. Hal ini dikarenakan porositas yang terbentuk pada sampel YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  45% cukup tinggi.
2. Jumlah sapuan komposit YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  memberikan pengaruh terhadap sifat kelekatan dan ketahanan termal dari YSZ/YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  *double layer* TBC. Semakin banyak jumlah sapuan, kekuatan lekat dan ketahanan termal semakin turun. Hal ini dikarenakan kompleksitas mikrostruktur yang tinggi pada *multi-pass coating*.
3. Pengaruh dari komposisi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dan jumlah sapuan pada lapisan komposit YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  terhadap struktur mikro yang dihasilkan sebelum dan setelah pengujian termal adalah perubahan TGO. Semakin tinggi komposisi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dan semakin sedikit jumlah sapuan pada komposit YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  tebal TGO yang dihasilkan semakin tipis dan optimum pada YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  30% - 1x. Hal ini dikarenakan porositas yang



tinggi pada sampel YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$  45% dan kompleksitas mikrostruktur yang tinggi pada *multi-pass coating*.

## 5.2 Saran

Berdasarkan hasil yang didapatkan maka saran-saran yang dapat diambil, antara lain:

1. Kondisi lingkungan sekitar pada proses spraying harus dipastikan bersih dari pengotor.
2. Metode *Flame spray* kurang optimum membentuk struktur TBC yang baik, karena banyak oksida yang terbentuk.
3. Adanya studi lebih lanjut mengenai pelapisan YSZ/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ -YSZ tetapi menggunakan metode *Thermal Spray* yang berbeda



**DAFTAR PUSTAKA**

- \_\_\_\_\_. 1997. **Haynes International Book for Hastelloy® X**. New York : Haynes International Ltd.
- \_\_\_\_\_. 2001. **ASTM C633 – 01 Standard Test Method for Adhesion or Cohesion Strength of Thermal Spray Coatings**. ASTM International
- \_\_\_\_\_. 2004. **ASM Handbook of Thermal Spray**. ASM Internasional
- \_\_\_\_\_. 2012. **Lapan Masih Kembangkan Roket RX 550**. <URL:<http://militer-review.web.id>>
- \_\_\_\_\_. 2013. **Nickel Chromium Aluminum Yttrium (NiCrAlY) Thermal Spray Powders. Material Product Data Sheet NiCrAlY Powders 1/6 DSMTS-0102.1USA** :SulzerMetco.
- Amaya, C., W. Aperador, J.C. Caicedo, F.J. Espinoza-Beltrán, J. Muñoz-Saldaña, G. Zambrano, P. Prieto. 2009. Corrosion Study of Alumina/Yttria-Stabilized Zirconia (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/YSZ) Nanostructure Thermal Barrier Coatings (TBC) Exposed to High Temperature Treatment. **Corrosion Science** 51 2994–2999.
- DeMasi, et al., 1989. “Mechanisms of degradation and Failure in plasma Deposited Thermal Barrier Coating. **ASME**. 89-GT-132.
- Evans, A. G., D. R. Mumm, J. W Hutchinson. G. H Meier, F. S. Pettit, “Mechanisms Controlling the Durability of Thermal Barrier Coatings”. **Progress in Material Science** 46 505 553.
- Hasab, Mehdi Ghobeiti dan Kamran Rashnuei. 2012. Comparison of Oxidation Resistance of YSZ and YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Coatings
-





- on Ni-Based Superalloy. **Scientific Paper UDC:** 667.613:621.791.48.
- Guo, Hongbo dkk. 2002. Preparation of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -YSZ composite coating by EB-PVD. **Materials Science and Engineering** A325 389–393.
- Karaoglanli, A.C, E. Altuncu, I. Ozdemir, A. Turk, F. Ustel. 2011. Structure and Durability Evaluation of YSZ +  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Composite TBCs with APS and HVOF Bond Coats under Thermal Cycling Conditions, **Surface & Coatings Technology** 205 S369–S373.
- Keyvani, A., M. Saremi, M. Heydarzadeh Sohi. 2010. “Oxidation Resistance of YSZ-Alumina Composites Compared to Normal YSZ TBC Coatings at 1100°C”. **Journal of Alloys and Compounds** 509 8370-8377.
- Kusriantoko, Parindra. 2014. **Pengaruh Komposisi Komposit  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YSZ}$  dan Variasi Feet rate Terhadap Ketahanan Termal dan Kekuatan Lekat pada YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YSZ}$  Double Layer TBC.** Tugas Akhir Teknik Material dan Metalurgi. ITS – Surabaya
- Lazuardi, M. Sofyan, 2014. **Pengaruh kandungan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dan Jarak Flame Spray terhadap Ketahanan Termal dan Kekuatan Lekat pada YSZ-YSZ/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  DL-TBC untuk Nosel Roket.** Tugas Akhir Teknik Material dan Metalurgi. ITS – Surabaya
- Li, Yanjun, YoutaoXie, Lipinghuang, Xuanyong Liu, Xuebin Zheng. 2012. Effect of Physical Vapor Deposited  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Film on TGO Growth in YSZ/CoNiCrAlY Coatings. **Ceramics International** 38 5113–5121.
- Moskal, G. 2009. Thermal Barrier Coatings: Characteristics of Microstructure and Properties, Generation and Directions of Development of Bond. **Journal of Achievements in**



**Materials and Manufacturing Engineering** Volume 2  
323-331.

Moskal, G. 2010. Characteristics of Selected Thermal Properties of 8YSZ Type Powders Produced With Different Methods. 11<sup>th</sup> **Europysical Conference on Defects in Insulating Materials, Materials Science and Engineering 15** 012065.

Ren, C. Y. D. He. D., dan R. Wang. 2010. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/YSZ Composite Coatings Prepared by A Novel Sol-Gel Process And Their High-Temperature Oxidation Resistance. **Oxide Metal Journal** Springer 74:275-285.

Saremi M., Z.Valefi. 2014. "Thermal and Mechanical Properties of Nano -YSZ-Alumina Functionally Graded Coatings by Nano-Agglomerated Powder Plasma Spraying". **Ceramics International**.

Saremi, M., Z.Valefi, N.Abaeian. 2012. "Hot Corossion, High Temperature Oxidation and Thermal Shock Behaviour of Nanoagglomerated YSZ-Alumina Composite Coatings Produced by Plasma Spray Method". **Surface & Coatings Technology** 221 133-141.

Saremi, Mohsen, Abbas Afrasiabi, Akira Kobayashi. 2008. Microstructural Analysis of YSZ and YSZ/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Plasma Sprayed Thermal Barrier Coatings After High Temperature Oxidation. **Surface & Coatings Technology** 202 3233-3238.

Sugondo, Ratih Langenati, Futichah. Mujtahid. 2010. "Pelapisan Nosel Roket dengan Boron Karbida". **ISSN 1907-2635**

Sulistijono dan Lukman Noerochiem. 2007. **Rekayasa Smart Material untuk Perintang Panas Pada Komponen Turbin Gas Modern**. Laporan Penelitian LPPM ITS

---



- Sun, Yinzhang, Shulin Wang, Hongzhi Tang, Deming Cao, Di Liu. 2011. Preparation and Phase Stability of YSZ-Alumina Composite by Roller Vibration Milling. **IEEE** 978-1-61284-752-8 111.
- Sutton, George P. 2001. Rocket Propulsion Elements: Seven Edition. John Wiley & Sons. Inc
- Triharjanto, Robertus Herudan Salam Ginting. 2009. Studi Parameter Nosel Roket RX-250 Untuk Mengoptimasi Berat. **PUSROSAT-LAPAN**.
- Wibisono, Alvian Toto. 2013. **Pengaruh Ketebalan Lapisan 80%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-20%SiO<sub>2</sub> Dengan Metode Flame Spray Terhadap Kekuatan Lekat Dan Ketahanan Termal Lapisan Pada Substrat S45C Untuk Aplikasi Nosel Roket**. Tugas Akhir Teknik Material dan Metalurgi. ITS – Surabaya
- Yu, Qinghe, Chungen Zhou, Huiyan Zhang, Feng Zhao. 2010. Thermal Stability of Nanostructured 13 wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-8wt% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> Thermal Barrier Coatings. **Journal of the European Ceramic Society** 30 889–897.
- 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 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/YSZ) Thermal Barrier Coatings. **Surface & Coatings Technology** 212 214–222.

## LAMPIRAN

### 1. Hasil Pengujian Lekat

Analisa Perhitungan Rasio S/N

Rumus :

$$S/N = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum \frac{1}{y^2}\right)$$

Keterangan:

n = jumlah pengulangan dari suatu percobaan

y = nilai kekuatan lekat

Pada eksperimen ke 1 :

$$\begin{aligned} S/N &= -10 \log \left[ \frac{1}{3} \left( \frac{1}{14.23^2} + \frac{1}{13.99^2} + \frac{1}{14.16^2} \right) \right] \\ &= -10 \log [0.0050] \\ &= 23.0001 \end{aligned}$$

Pada eksperimen ke 2 :

$$\begin{aligned} S/N &= -10 \log \left[ \frac{1}{3} \left( \frac{1}{13.56^2} + \frac{1}{13.36^2} + \frac{1}{12.99^2} \right) \right] \\ &= -10 \log [0.0057] \\ &= 22.4751 \end{aligned}$$

Pada eksperimen ke 3 :

$$\begin{aligned} S/N &= -10 \log \left[ \frac{1}{3} \left( \frac{1}{11.86^2} + \frac{1}{12^2} + \frac{1}{11.65^2} \right) \right] \\ &= -10 \log [0.0071] \\ &= 21.4627 \end{aligned}$$

Pada eksperimen ke 4 :

$$\begin{aligned} S/N &= -10 \log \left[ \frac{1}{3} \left( \frac{1}{14.48^2} + \frac{1}{15.38^2} + \frac{1}{16.29^2} \right) \right] \\ &= -10 \log [0.0043] \\ &= 23.6883 \end{aligned}$$



Pada eksperimen ke 5 :

$$\begin{aligned} S/N &= -10 \log \left[ \frac{1}{3} \left( \frac{1}{13.37^2} + \frac{1}{15.68^2} + \frac{1}{14.58^2} \right) \right] \\ &= -10 \log[0.0048] \\ &= 23.1979 \end{aligned}$$

Pada eksperimen ke 6 :

$$\begin{aligned} S/N &= -10 \log \left[ \frac{1}{3} \left( \frac{1}{11.84^2} + \frac{1}{13.05^2} + \frac{1}{14.24^2} \right) \right] \\ &= -10 \log[0.0060] \\ &= 22.2338 \end{aligned}$$

Pada eksperimen ke 7 :

$$\begin{aligned} S/N &= -10 \log \left[ \frac{1}{3} \left( \frac{1}{13.01^2} + \frac{1}{12.97^2} + \frac{1}{12.87^2} \right) \right] \\ &= -10 \log[0.0060] \\ &= 22.2451 \end{aligned}$$

Pada eksperimen ke 8 :

$$\begin{aligned} S/N &= -10 \log \left[ \frac{1}{3} \left( \frac{1}{11.98^2} + \frac{1}{12.17^2} + \frac{1}{12.41^2} \right) \right] \\ &= -10 \log[0.0067] \\ &= 21.7150 \end{aligned}$$

Pada eksperimen ke 9 :

$$\begin{aligned} S/N &= -10 \log \left[ \frac{1}{3} \left( \frac{1}{10.65^2} + \frac{1}{10.71^2} + \frac{1}{10.98^2} \right) \right] \\ &= -10 \log[0.0086] \\ &= 20.6501 \end{aligned}$$

**Tabel 1.1** Hasil Perhitungan Rasio S/NMatriks Ortogonal L9 (3<sup>2</sup>)

No.	Faktor		Kekuatan Lekat (MPa)			S/N
	A*	B*	I	II	III	
1	1	1	14.23	13.99	14.16	23.0001
2	1	2	13.56	13.36	12.99	22.4751
3	1	3	11.86	12	11.65	21.4627
4	2	1	14.38	15.38	16.29	23.6883
5	2	2	13.37	15.68	14.58	23.1979
6	2	3	11.84	13.05	14.24	22.2338
7	3	1	13.01	12.97	12.87	22.2451
8	3	2	11.98	12.17	12.41	21.7150
9	3	3	10.65	10.71	10.98	20.6501
Rata rata						22.2965

\*) Keterangan:

A = Komposisi

B = Sapuan

Perhitungan Pengaruh Level dari Faktor terhadap Variasi Nilai Kekuatan Lekat

Perhitungan untuk faktor A (komposisi)

$$A_1 = \frac{1}{3} (23.0001 + 22.4751 + 21.4627)$$

$$= 22.3126$$

$$A_2 = \frac{1}{3} (23.6883 + 23.1979 + 22.2338)$$

$$= 23.0400$$

$$A_3 = \frac{1}{3} (22.2451 + 21.7150 + 20.6501)$$

$$= 21.5367$$

Perhitungan untuk faktor B (sapan)

$$B_1 = \frac{1}{3} (23.0001 + 23.6883 + 22.2451)$$

$$= 22.9779$$

$$B_2 = \frac{1}{3} (22.4751 + 23.1979 + 21.7150)$$

$$= 22.4627$$

$$B_3 = \frac{1}{3} (21.4627 + 22.2338 + 20.6501)$$

$$= 21.4488$$

**Tabel 1.2** Respon Rasio S/N Nilai Kekuatan Lekat dari Pengaruh Faktor

	A	B
level 1	22.31	22.98
level 2	23.04	22.46
level 3	21.54	21.45
Selisih	1.53	1.50
Peringkat	1	2

## 2. Hasil Pengujian *Thermal Torch Oxyacetylene*

### a. Berdasarkan Pendekatan Massa

Analisa Perhitungan Rasio S/N

Rumus :

$$S/N = -10 \log\left(\sum \frac{y^2}{n}\right)$$

Keterangan:

n = jumlah pengulangan dari suatu percobaan

y = nilai ketahanan termal

Pada eksperimen ke 1 :

$$\begin{aligned} S/N &= -10 \log \left[ \left( \frac{1.2061^2}{3} + \frac{1.1757^2}{3} + \frac{02.291^2}{3} \right) \right] \\ &= -10 \log [2.6952] \\ &= -4.306 \end{aligned}$$

Pada eksperimen ke 2 :

$$\begin{aligned} S/N &= -10 \log \left[ \left( \frac{1.811^2}{3} + \frac{1.707^2}{3} + \frac{1.912^2}{3} \right) \right] \\ &= -10 \log [3.2831] \\ &= -5.163 \end{aligned}$$

Pada eksperimen ke 3 :

$$\begin{aligned} S/N &= -10 \log \left[ \left( \frac{2.093^2}{3} + \frac{2.184^2}{3} + \frac{1.2001^2}{3} \right) \right] \\ &= -10 \log [3.5302] \\ &= -5.478 \end{aligned}$$

Pada eksperimen ke 4 :

$$\begin{aligned} S/N &= -10 \log \left[ \left( \frac{1.2538^2}{3} + \frac{1.2517^2}{3} + \frac{1.6534^2}{3} \right) \right] \\ &= -10 \log [1.9378] \\ &= -2.873 \end{aligned}$$



Pada eksperimen ke 5 :

$$\begin{aligned} S/N &= -10 \log \left[ \left( \frac{1.449^2}{3} + \frac{1.4521^2}{3} + \frac{1.4232^2}{3} \right) \right] \\ &= -10 \log[2.0781] \\ &= -3.177 \end{aligned}$$

Pada eksperimen ke 6 :

$$\begin{aligned} S/N &= -10 \log \left[ \left( \frac{1.6199^2}{3} + \frac{1.6289^2}{3} + \frac{1.1956^2}{3} \right) \right] \\ &= -10 \log[2.2356] \\ &= -3.494 \end{aligned}$$

Pada eksperimen ke 7 :

$$\begin{aligned} S/N &= -10 \log \left[ \left( \frac{1.423^2}{3} + \frac{1.3124^2}{3} + \frac{2.0054^2}{3} \right) \right] \\ &= -10 \log[2.5897] \\ &= -4.738 \end{aligned}$$

Pada eksperimen ke 8 :

$$\begin{aligned} S/N &= -10 \log \left[ \left( \frac{1.711^2}{3} + \frac{1.6483^2}{3} + \frac{1.813^2}{3} \right) \right] \\ &= -10 \log[2.9771] \\ &= -4.738 \end{aligned}$$

Pada eksperimen ke 9 :

$$\begin{aligned} S/N &= -10 \log \left[ \left( \frac{1.8150^2}{3} + \frac{1.9252^2}{3} + \frac{1.379^2}{3} \right) \right] \\ &= -10 \log[2.9674] \\ &= -4.724 \end{aligned}$$

**Tabel 2.1** Hasil Perhitungan Rasio S/N Pendekatan MassaMatriks Ortogonal L9 ( $3^2$ )

No.	Faktor		$\Delta$ Massa Rusak (Gram)			S/N
	A*	B*	I	II	III	
1	1	1	1.2061	1.1757	2.291	-4.306
2	1	2	1.811	1.707	1.912	-5.163
3	1	3	2.093	2.184	1.2001	-5.478
4	2	1	1.2538	1.2517	1.6354	-2.873
5	2	2	1.449	1.4521	1.4234	-3.177
6	2	3	1.6199	1.6289	1.1956	-3.494
7	3	1	1.423	1.3124	2.0054	-4.132
8	3	2	1.711	1.6483	1.813	-4.738
9	3	3	1.8150	1.9252	1.379	-4.724
Rata rata						-4.232

Perhitungan Pengaruh Level dari Faktor terhadap Variasi Nilai Ketahanan Termal

Perhitungan untuk faktor A (komposisi)

$$A_1 = \frac{1}{3}((-4.306) + (-5.163) + (-5.478)) \\ = -4.531$$

$$A_2 = \frac{1}{3}((-2.873) + (-3.177) + (-3.494)) \\ = -3.181$$

$$A_3 = \frac{1}{3}((-4.132) + (-4.738) + (-4.724)) \\ = -4.982$$

Perhitungan untuk faktor B (sapan)

$$B_1 = \frac{1}{3}((-4.306) + (-2.873) + 18.4873) \\ = -3.77$$

$$B_2 = \frac{1}{3}((-5.163) + (-3.177) + (-3.494)) \\ = -4.359$$

$$B_3 = \frac{1}{3}((-5.478) + (-4.738) + (-4.724)) \\ = -4.565$$

**Tabel 2.2** Respon Rasio S/N Nilai Pengurangan Massa dari Pengaruh Faktor

	A	B
level 1	-4.531	-3.770
level 2	-3.181	-4.359
level 3	-4.982	-4.565
Selisih	1.801	0.795
Peringkat	1	2

## **b. Berdasarkan Pendekatan Volume**

Analisa Perhitungan Rasio S/N

Rumus :

$$S/N = -10 \log \left( \sum \frac{y^2}{n} \right)$$

Keterangan:

n = jumlah pengulangan dari suatu percobaan

y = nilai ketahanan termal

Pada eksperimen ke 1 :

$$\begin{aligned} S/N &= -10 \log \left[ \left( \frac{0.1^2}{3} + \frac{0.15^2}{3} + \frac{0.1^2}{3} \right) \right] \\ &= -10 \log [0.0142] \\ &= 18.4837 \end{aligned}$$

Pada eksperimen ke 2 :

$$\begin{aligned} S/N &= -10 \log \left[ \left( \frac{0.2^2}{3} + \frac{0.15^2}{3} + \frac{0.15^2}{3} \right) \right] \\ &= -10 \log [0.0283] \\ &= 15.4770 \end{aligned}$$

Pada eksperimen ke 3 :

$$\begin{aligned} S/N &= -10 \log \left[ \left( \frac{0.2^2}{3} + \frac{0.25^2}{3} + \frac{0.25^2}{3} \right) \right] \\ &= -10 \log [0.0550] \\ &= 12.5964 \end{aligned}$$

Pada eksperimen ke 4 :

$$\begin{aligned} S/N &= -10 \log \left[ \left( \frac{0.05^2}{3} + \frac{0.1^2}{3} + \frac{0.05^2}{3} \right) \right] \\ &= -10 \log [0.0050] \\ &= 23.0103 \end{aligned}$$

Pada eksperimen ke 5 :

$$\begin{aligned} S/N &= -10 \log \left[ \left( \frac{0.1^2}{3} + \frac{0.1^2}{3} + \frac{0.05^2}{3} \right) \right] \\ &= -10 \log [0.0075] \\ &= 21.2494 \end{aligned}$$



Pada eksperimen ke 6 :

$$\begin{aligned} S/N &= -10 \log \left[ \left( \frac{0.15^2}{3} + \frac{0.15^2}{3} + \frac{0.1^2}{3} \right) \right] \\ &= -10 \log[0.0183] \\ &= 17.3676 \end{aligned}$$

Pada eksperimen ke 7 :

$$\begin{aligned} S/N &= -10 \log \left[ \left( \frac{0.1^2}{3} + \frac{0.15^2}{3} + \frac{0.1^2}{3} \right) \right] \\ &= -10 \log[0.0142] \\ &= 18.4873 \end{aligned}$$

Pada eksperimen ke 8 :

$$\begin{aligned} S/N &= -10 \log \left[ \left( \frac{0.15^2}{3} + \frac{0.1^2}{3} + \frac{0.15^2}{3} \right) \right] \\ &= -10 \log[0.0183] \\ &= 17.3676 \end{aligned}$$

Pada eksperimen ke 9 :

$$\begin{aligned} S/N &= -10 \log \left[ \left( \frac{0.2^2}{3} + \frac{0.2^2}{3} + \frac{0.2^2}{3} \right) \right] \\ &= -10 \log[0.0400] \\ &= 13.9794 \end{aligned}$$

**Tabel 2.3** Hasil Perhitungan Rasio S/N Pendekatan Volume

Matriks Ortogonal L9 (3<sup>2</sup>)

No.	Faktor		Volume Rusak (mL)			S/N
	A*	B*	I	II	III	
1	1	1	0.1	0.15	0.1	18.4873
2	1	2	0.2	0.15	0.15	15.4770
3	1	3	0.2	0.25	0.25	12.5964
4	2	1	0.05	0.1	0.05	23.0103
5	2	2	0.1	0.1	0.05	21.2494
6	2	3	0.15	0.15	0.1	17.3676
7	3	1	0.1	0.15	0.1	18.4873
8	3	2	0.15	0.1	0.15	17.3676
9	3	3	0.2	0.2	0.2	13.9794
Rata rata						17.5580

\*) Keterangan:

A = komposisi Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-YSZ

B = sapan

Perhitungan Pengaruh Level dari Faktor terhadap Variasi Nilai Ketahanan Termal

Perhitungan untuk faktor A (komposisi)

$$A_1 = \frac{1}{3} (18.4873 + 15.4770 + 12.5964)$$

$$= 16.6114$$

$$A_2 = \frac{1}{3} (23.0103 + 21.2494 + 17.3676)$$

$$= 20.5424$$

$$A_3 = \frac{1}{3} (18.4873 + 17.3676 + 13.9794)$$

$$= 15.5202$$

Perhitungan untuk faktor B (sapan)

$$B_1 = \frac{1}{3} (18.4873 + 23.0103 + 18.4873)$$

$$= 19.9950$$

$$B_2 = \frac{1}{3} (15.4770 + 21.2494 + 17.3676)$$

$$= 18.0313$$

$$B_3 = \frac{1}{3} (12.5964 + 17.3676 + 13.9794)$$

$$= 14.6478$$

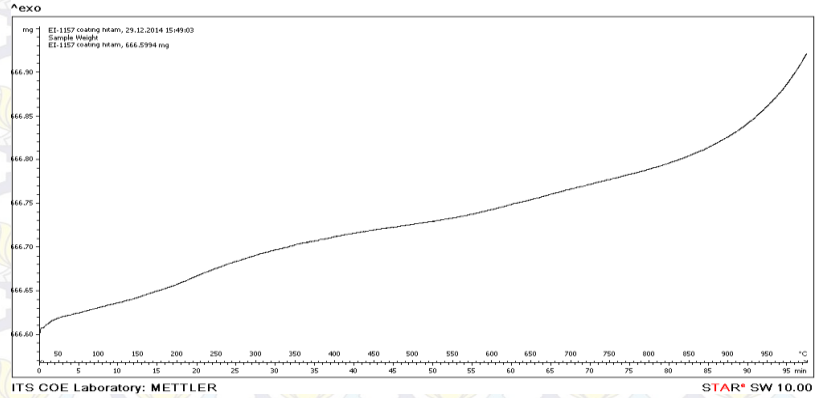
**Tabel 2.4** Respon Rasio S/N Nilai Volume Cacat dari Pengaruh Faktor

	A	B
level 1	16.61	19.99
level 2	20.54	18.03
level 3	15.52	14.65
Selisih	5.35	5.02
Peringkat	2	1

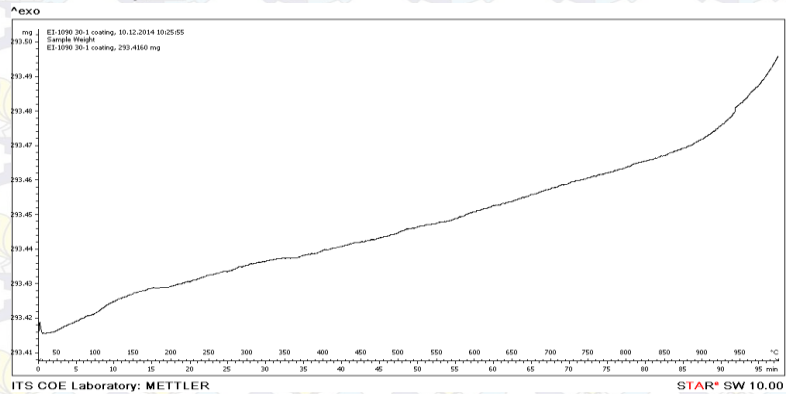
### 3. Hasil Pengujian TGA (*Thermogravimetri*)

#### a. Grafik Pertambahan Massa terhadap Temperatur

Tanpa coating

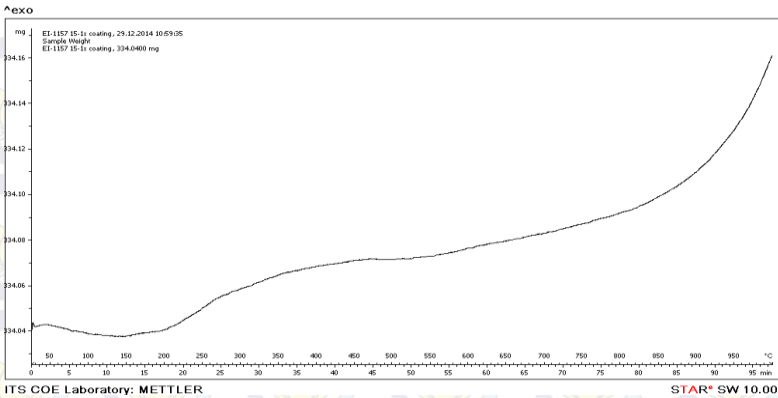


YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30%–1x

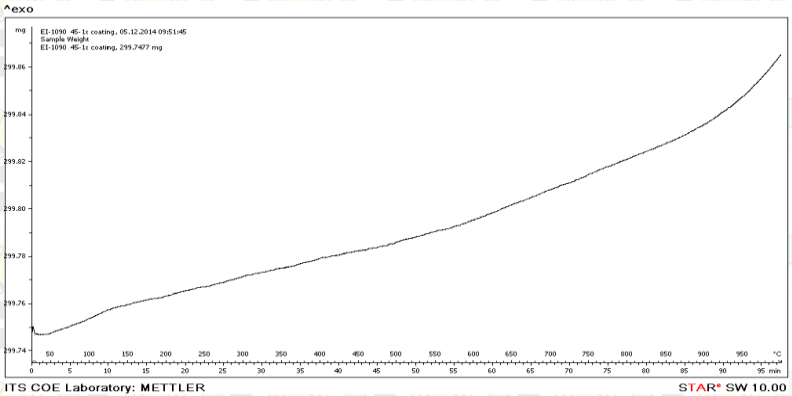




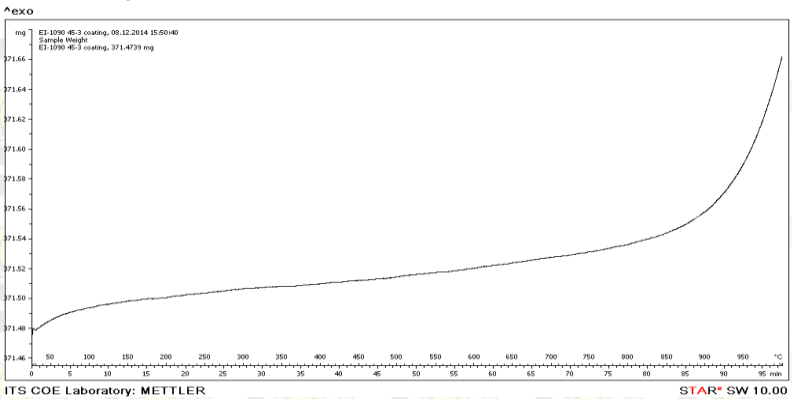
# YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15% – 1x



# YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% – 1x

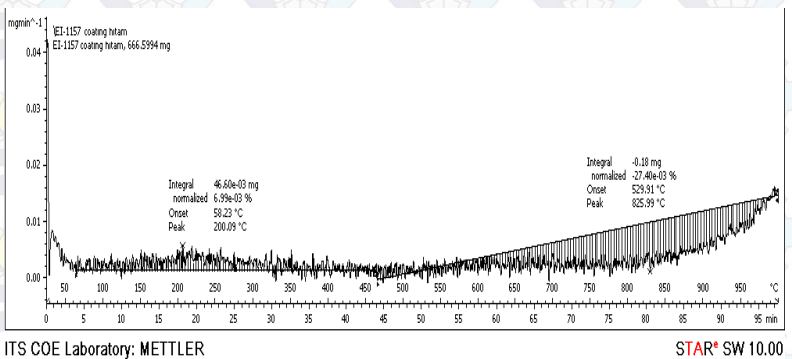


# YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45%– 3x

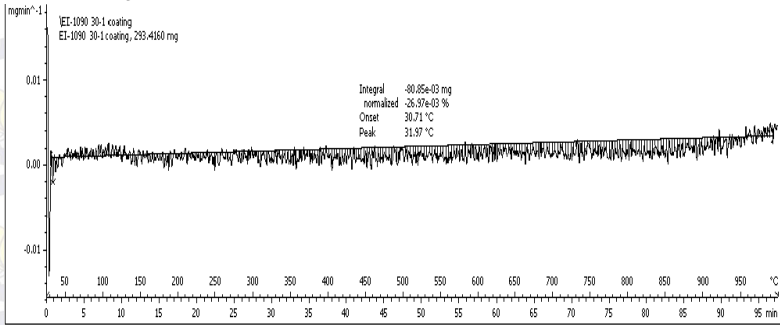


## b. 1<sup>st</sup> Derivative

Tanpa coating



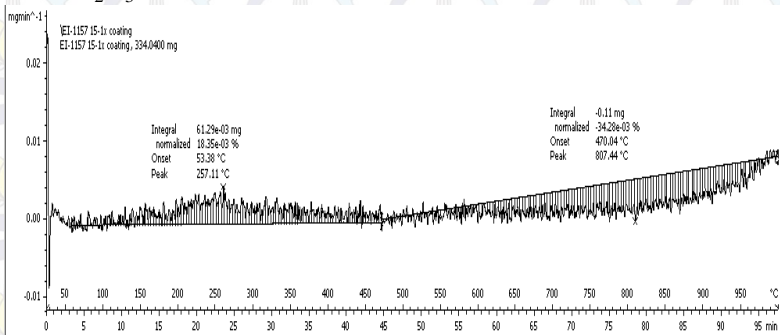
### YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% – 1x



ITS COE Laboratory: METTLER

STAR® SW 10.00

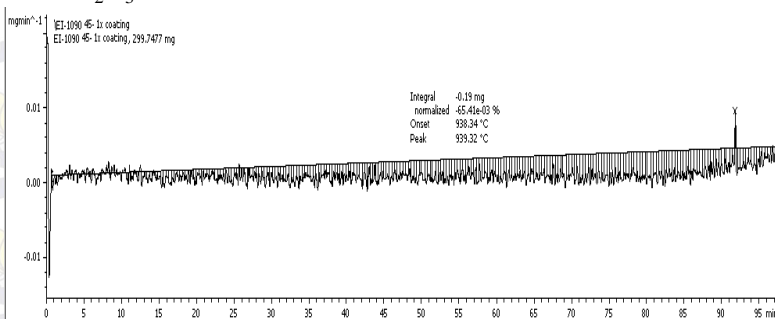
### YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15% – 1x



ITS COE Laboratory: METTLER

STAR® SW 10.00

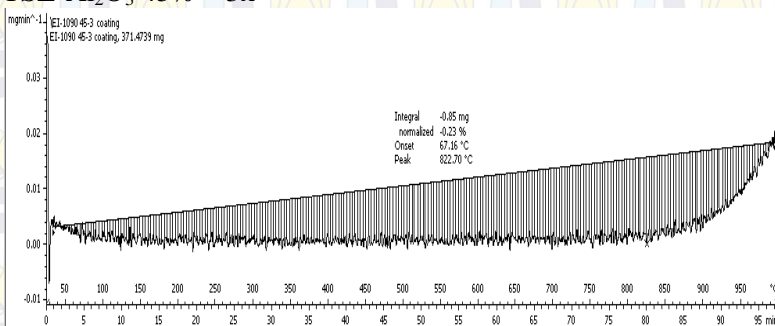
### YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% – 1x



ITS COE Laboratory: METTLER

STAR® SW 10.00

### YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% – 3x



ITS COE Laboratory: METTLER

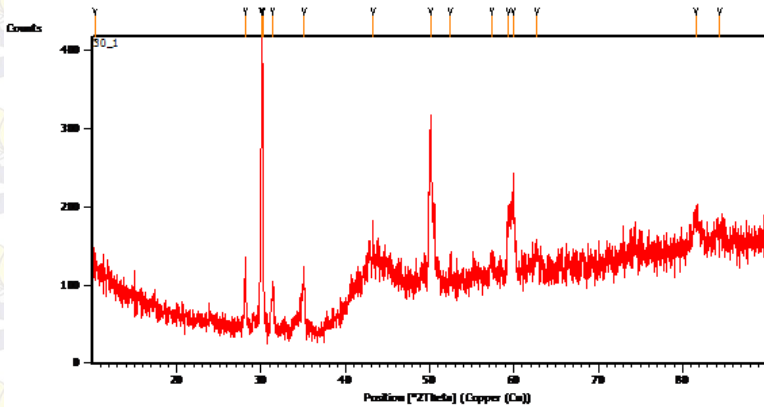
STAR® SW 10.00



## 4. Hasil Pengujian XRD

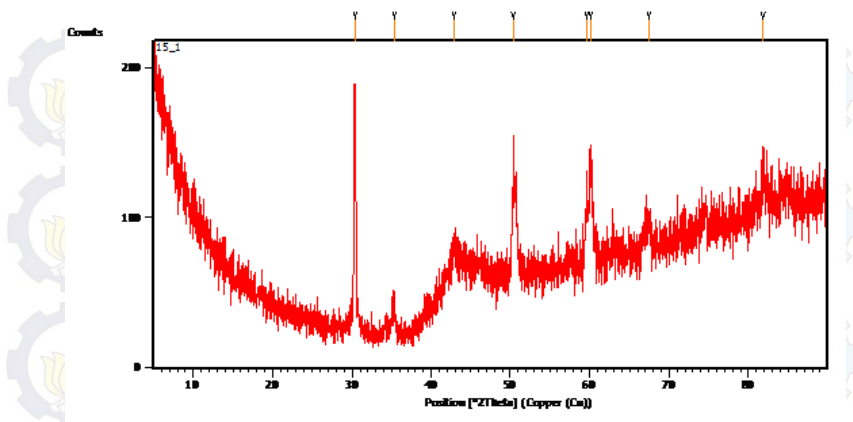
### a. Hasil Pengujian XRD Sebelum Uji Termal

YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% – 1x



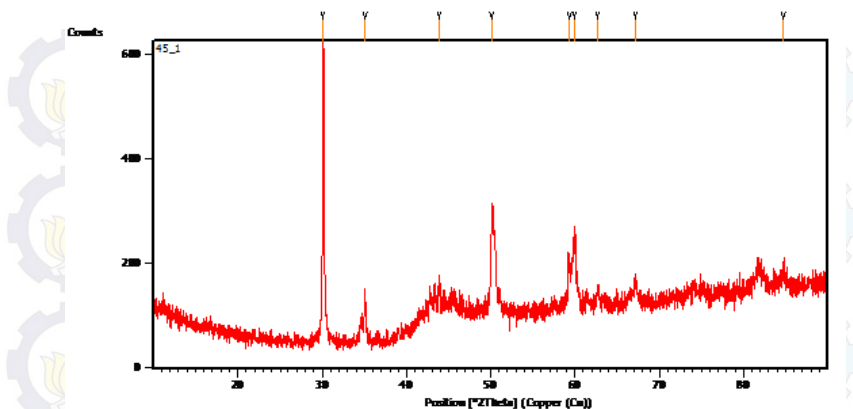
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
10.3114	16.03	0.5353	8.57907	4.44
28.1229	76.79	0.1673	3.17307	21.29
30.0673	360.75	0.0816	2.96970	100.00
30.1580	295.20	0.1004	2.96343	81.83
31.3910	57.84	0.2007	2.84978	16.03
35.0903	78.06	0.1673	2.55737	21.64
43.2907	41.97	0.2007	2.09005	11.63
50.1052	192.49	0.3011	1.82061	53.36
52.4942	31.35	0.1004	1.74324	8.69
57.4417	20.42	0.4015	1.60430	5.66
59.4169	73.63	0.2676	1.55561	20.41
59.9283	108.21	0.2676	1.54355	30.00
62.7859	25.41	0.4015	1.48000	7.04
81.5448	39.60	0.5353	1.18051	10.98
84.4080	17.72	0.8029	1.14762	4.91

# YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15% – 1x



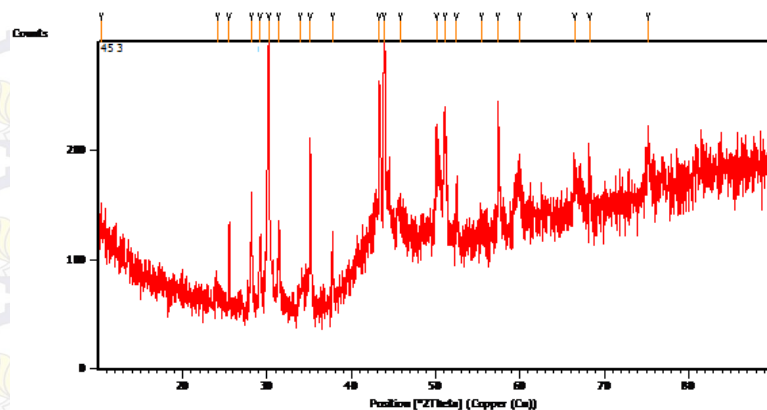
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
30.3978	145.49	0.2342	2.94059	100.00
35.3449	19.59	0.2007	2.53953	13.46
42.9060	18.76	0.5353	2.10790	12.89
50.3723	65.69	0.3346	1.81158	45.15
59.6146	46.05	0.2007	1.55115	31.65
60.2189	67.39	0.3346	1.53911	46.32
67.4470	18.94	0.8029	1.38861	13.02
82.7714	31.38	0.2676	1.17662	21.57

# YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45%– 1x



Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
30.1013	554.41	0.1171	2.96888	100.00
35.0931	92.53	0.2007	2.55717	16.69
43.8655	39.03	0.2676	2.06399	7.04
50.1278	173.56	0.2342	1.81984	31.30
59.3559	81.23	0.2007	1.55706	14.65
59.9726	129.88	0.3346	1.54251	23.43
62.7076	28.40	0.4015	1.48166	5.12
67.1852	37.17	0.4015	1.39338	6.70
84.7806	21.44	0.8029	1.14352	3.87

YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45%– 3x

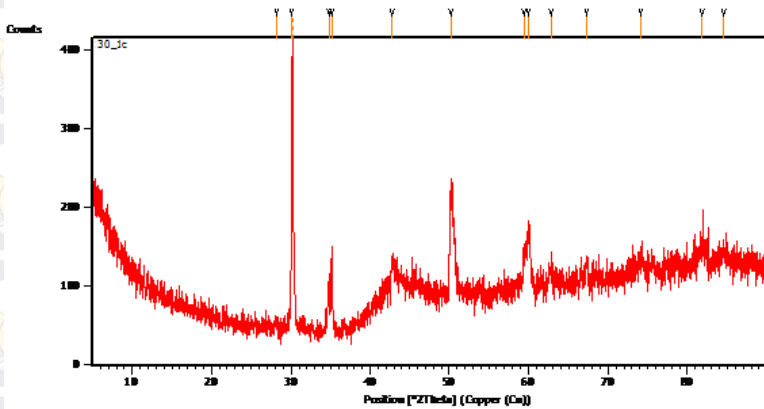


Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
10.3362	16.95	0.8029	8.55854	6.93
24.1292	11.51	0.4015	3.68843	4.71
25.5280	71.27	0.0836	3.48942	29.14
28.1314	102.90	0.1171	3.17213	42.07
29.1557	54.45	0.2007	3.06298	22.26
30.1402	244.60	0.1506	2.96514	100.00
31.4157	80.56	0.1004	2.84760	32.94
33.9890	18.50	0.4015	2.63767	7.56
35.0885	155.29	0.1171	2.55749	63.49
37.7333	51.38	0.1004	2.38410	21.01
43.3063	143.28	0.1004	2.08934	58.58
43.8948	170.58	0.2342	2.06268	69.74
45.8679	20.88	0.5353	1.97844	8.53
50.1038	89.93	0.2007	1.82066	36.77
51.1708	105.20	0.1673	1.78517	43.01
52.5192	55.73	0.1004	1.74247	22.78
55.4538	14.62	0.6691	1.65701	5.98
57.4590	102.98	0.0612	1.60254	42.10
60.0165	39.37	0.4684	1.54149	16.09
66.4709	41.13	0.2676	1.40661	16.81
68.2688	28.99	0.2676	1.37389	11.85
75.2217	42.73	0.2676	1.26322	17.47



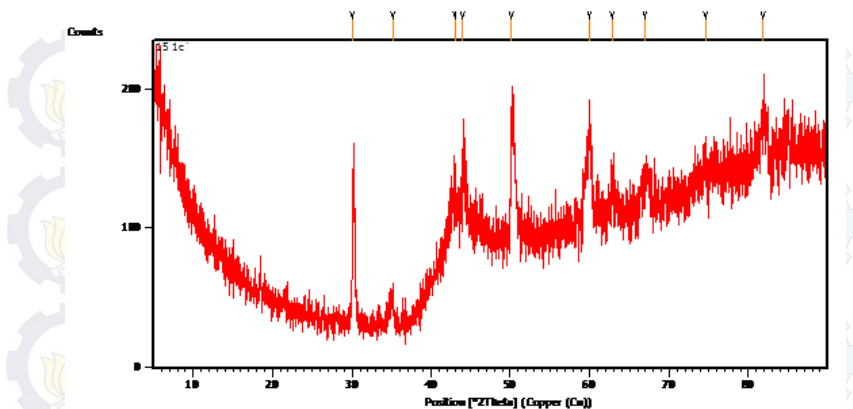
## b. Hasil Pengujian XRD Setelah Uji Termal

YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% – 1x



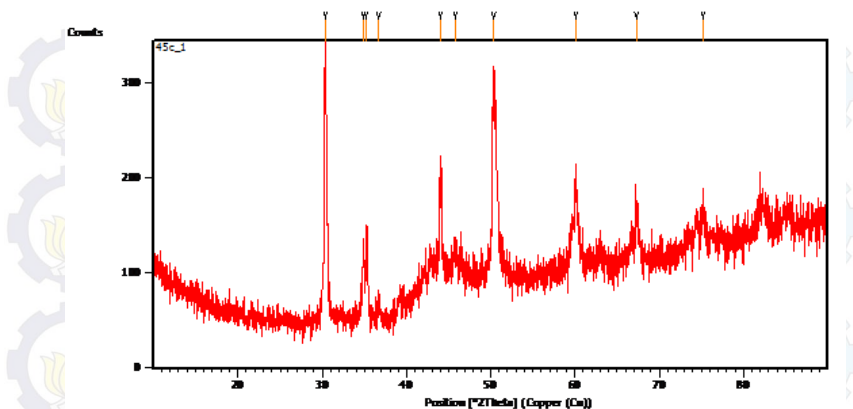
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
28.2325	12.46	0.3346	3.16100	3.52
30.1220	334.46	0.1020	2.96443	94.41
30.2223	354.25	0.0612	2.96216	100.00
34.7542	59.69	0.2856	2.57919	16.85
35.1208	102.41	0.2040	2.55310	28.91
42.7650	36.98	0.2448	2.11277	10.44
50.2400	125.17	0.5712	1.81454	35.33
59.4166	38.52	0.4080	1.55432	10.87
60.0037	66.10	0.4080	1.54051	18.66
62.7711	23.00	0.4896	1.47909	6.49
67.2936	20.72	0.3264	1.39025	5.85
75.1683	26.62	0.4080	1.27747	7.51
81.8181	30.09	0.9792	1.17628	8.49
84.5520	13.56	0.9792	1.14508	3.83

# YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15% – 1x



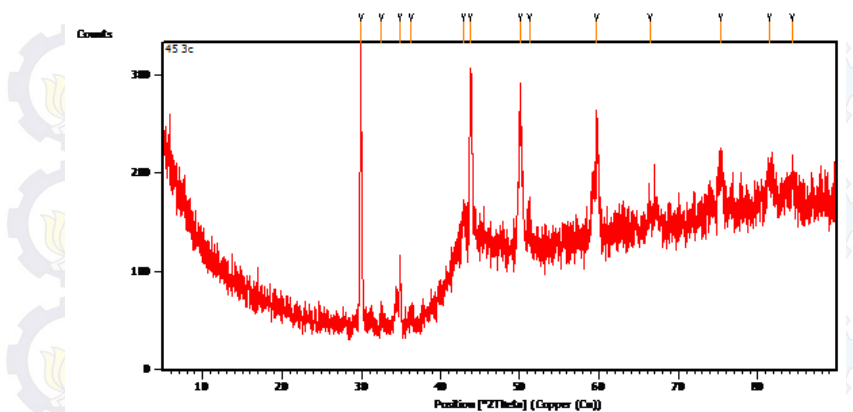
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
30.0401	75.01	0.1171	2.97479	100.00
35.1551	26.95	0.2007	2.55280	35.93
42.9325	31.16	0.4015	2.10666	41.55
44.8533	50.82	0.2676	2.05562	67.75
50.1632	68.94	0.1673	1.81864	91.91
59.9677	71.00	0.2676	1.54263	94.66
62.7965	28.12	0.2007	1.47977	37.49
66.9962	17.28	0.8029	1.39686	23.04
75.5476	20.29	0.4015	1.27296	27.06
81.8491	35.36	0.8029	1.17689	47.15

# YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% – 1x



Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
30.3928	274.61	0.2007	2.94106	100.00
34.8798	65.49	0.2007	2.57232	23.85
35.2707	90.95	0.2342	2.54470	33.12
36.7187	19.13	0.4015	2.44761	6.97
44.0179	100.63	0.3346	2.05720	36.64
45.7865	26.16	0.4015	1.98176	9.53
50.4142	200.11	0.2676	1.81017	72.87
60.1252	88.80	0.2676	1.53896	32.33
67.3289	45.50	0.3346	1.39076	16.57
75.2442	29.94	0.4015	1.26290	10.90

# YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% – 3x

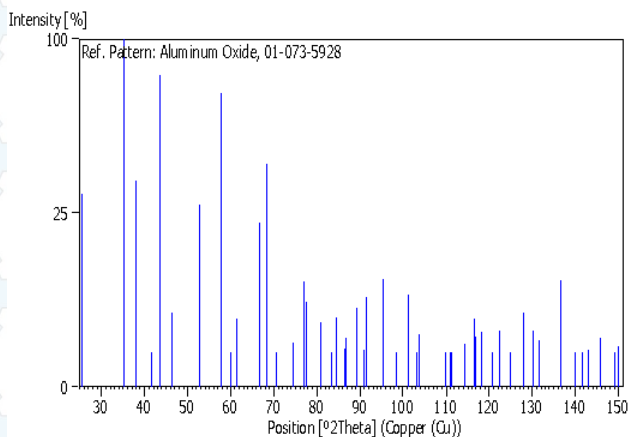


Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
29.9454	269.15	0.1171	2.98397	100.00
32.5473	14.25	0.4015	2.75113	5.29
34.8251	64.50	0.1673	2.57623	23.97
36.3038	10.04	0.5353	2.47462	3.73
42.9181	42.05	0.4015	2.10733	15.62
44.8370	155.42	0.2676	2.06796	57.74
50.0440	142.30	0.3346	1.82269	52.87
51.2515	31.84	0.4015	1.78255	11.83
59.6855	119.80	0.1338	1.54924	44.51
66.3547	19.08	0.3346	1.40879	7.09
75.3232	46.62	0.4684	1.26177	17.32
81.4687	28.81	0.6691	1.18142	10.71
84.2561	21.79	0.8029	1.14930	8.10



### c. Kartu PDF Analisa XRD

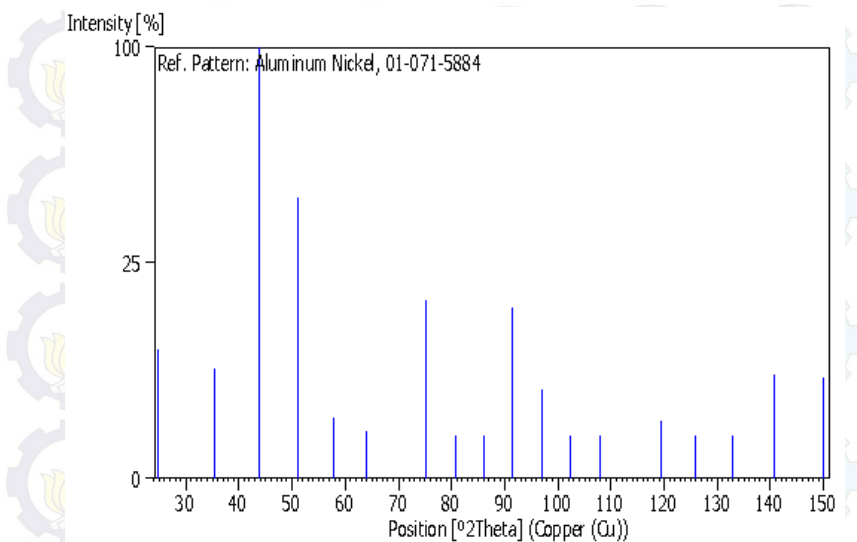
**Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (01-073-5928)**



#### **Peaklist**

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	0	1	2	3.47400	25.622	30.9
2	1	0	4	2.54660	35.213	100.0
3	1	1	0	2.37520	37.847	35.1
4	0	0	6	2.16170	41.751	0.3
5	1	1	3	2.08180	43.433	80.6
6	2	0	2	1.96080	46.264	4.5
7	0	2	4	1.73700	52.650	27.3
8	1	1	6	1.59870	57.610	71.7
9	2	1	1	1.54390	59.859	0.1
10	1	2	2	1.51210	61.251	3.7
11	0	1	8	1.50840	61.417	3.8
12	2	1	4	1.40210	66.650	22.4
13	3	0	0	1.37140	68.345	41.1
14	1	2	5	1.33370	70.559	0.1
15	2	0	8	1.27330	74.452	1.6
16	1	0	10	1.23700	77.030	9.1
17	1	1	9	1.23210	77.393	5.9
18	2	2	0	1.18760	80.875	3.5
19	0	3	6	1.15800	83.395	0.2
20	2	2	3	1.14520	84.541	4.0
21	3	1	2	1.12380	86.541	1.2
22	1	2	8	1.12220	86.695	2.0
23	0	2	10	1.09710	89.195	5.2
24	0	0	12	1.08090	90.901	1.1

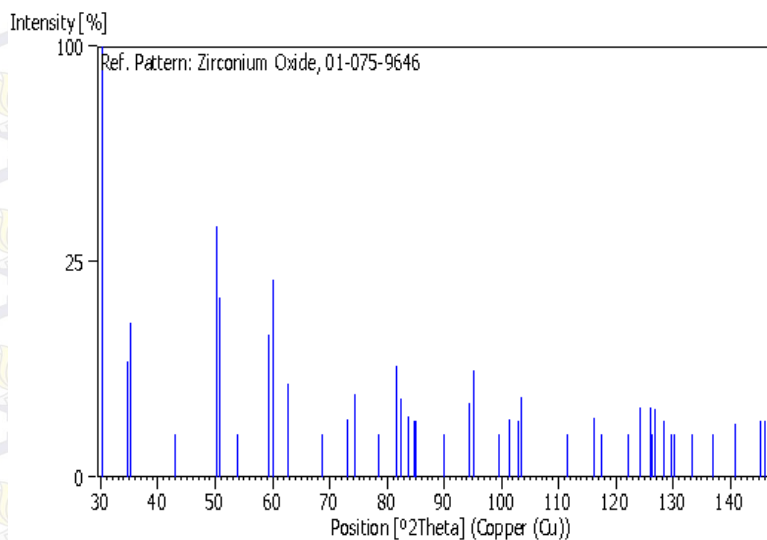
# AlNi<sub>3</sub> (01-071-5884)



## Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	1	0	0	3.56700	24.943	9.0
2	1	1	0	2.52220	35.565	6.5
3	1	1	1	2.05940	43.930	100.0
4	2	0	0	1.78350	51.177	42.5
5	2	1	0	1.59520	57.748	2.0
6	2	1	1	1.45620	63.873	1.2
7	2	2	0	1.26110	75.297	17.1
8	3	0	0	1.18900	80.760	0.5
9	3	1	0	1.12800	86.140	0.3
10	3	1	1	1.07550	91.487	15.6
11	2	2	2	1.02970	96.849	4.3
12	3	2	0	0.98930	102.271	0.1
13	3	2	1	0.95330	107.809	0.2
14	4	0	0	0.89180	119.483	1.8
15	4	1	0	0.86510	125.851	0.1
16	4	1	1	0.84080	132.740	0.1
17	3	3	1	0.81830	140.556	5.8
18	4	2	0	0.79760	149.932	5.5

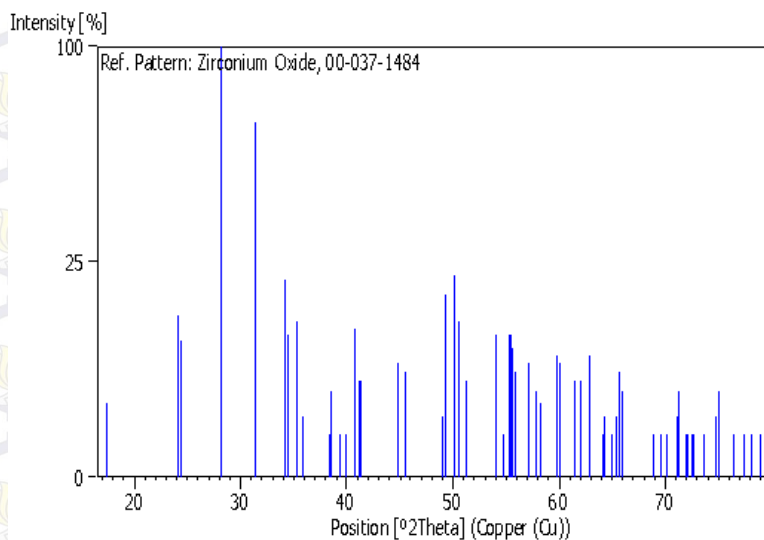
## t-ZrO<sub>2</sub>(01-075-9646)



### Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	1	0	1	2.95670	30.203	100.0
2	0	0	2	2.58800	34.632	7.2
3	1	1	0	2.54720	35.205	12.8
4	1	0	2	2.10180	42.999	0.4
5	1	1	2	1.81540	50.215	34.0
6	2	0	0	1.80120	50.638	17.3
7	2	0	1	1.70110	53.850	0.1
8	1	0	3	1.55610	59.342	11.0
9	2	1	1	1.53820	60.103	21.0
10	2	0	2	1.47840	62.804	4.7
11	2	1	2	1.36770	68.556	0.1
12	0	0	4	1.29400	73.066	1.8
13	2	2	0	1.27360	74.432	3.7
14	1	0	4	1.21780	78.475	0.1
15	2	1	3	1.17750	81.715	6.7
16	3	0	1	1.16970	82.378	3.3
17	1	1	4	1.15370	83.776	2.0
18	2	2	2	1.14270	84.769	1.7
19	3	1	0	1.13920	85.091	1.7
20	3	0	2	1.08920	90.018	0.1

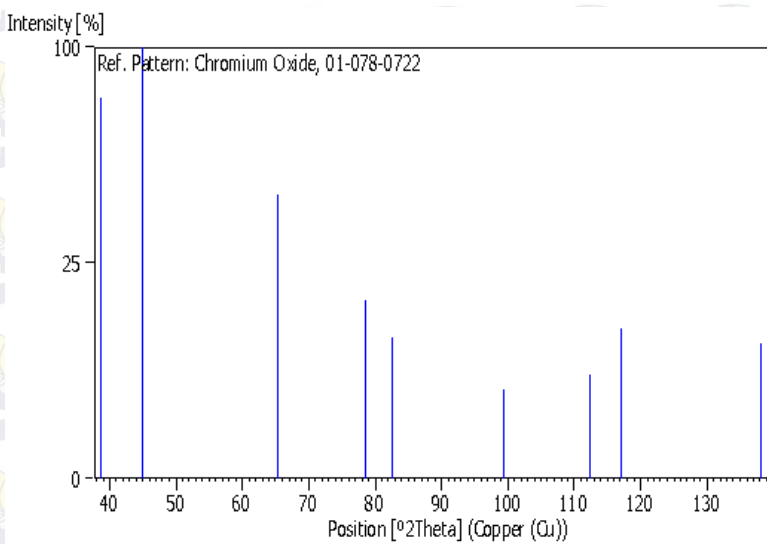
## m-ZrO<sub>2</sub> (00-037-1484)



No.	h	k	l	d [Å]	2Theta(deg)	I [%]
1	0	0	1	5.08700	17.419	3.0
2	1	1	0	3.69760	24.048	14.0
3	0	1	1	3.63910	24.441	10.0
4	-1	1	1	3.16470	28.175	100.0
5	1	1	1	2.84060	31.468	68.0
6	2	0	0	2.62270	34.160	21.0
7	0	2	0	2.60620	34.383	11.0
8	0	0	2	2.53990	35.309	13.0
9	-2	0	1	2.49940	35.901	2.0
10	-2	1	0	2.34250	38.396	1.0
11	1	2	0	2.33400	38.542	4.0
12	0	1	2	2.28450	39.411	1.0
13	-2	1	1	2.25270	39.991	1.0
14	-1	1	2	2.21380	40.724	12.0
15	2	0	1	2.19190	41.150	5.0
16	-1	2	1	2.18050	41.375	5.0
17	2	1	1	2.02030	44.826	7.0
18	-2	0	2	1.99100	45.522	6.0
19	-2	1	2	1.85930	48.950	2.0
20	2	2	0	1.84810	49.266	18.0
21	0	2	2	1.81870	50.117	22.0
22	-2	2	1	1.80380	50.560	13.0
23	-1	2	2	1.78300	51.192	5.0
24	0	0	3	1.69370	54.105	11.0
25	2	2	1	1.67720	54.681	1.0
26	1	2	2	1.66070	55.270	11.0
27	3	1	0	1.65710	55.401	11.0
28	-3	1	1	1.65240	55.572	9.0
29	0	3	1	1.64390	55.884	6.0

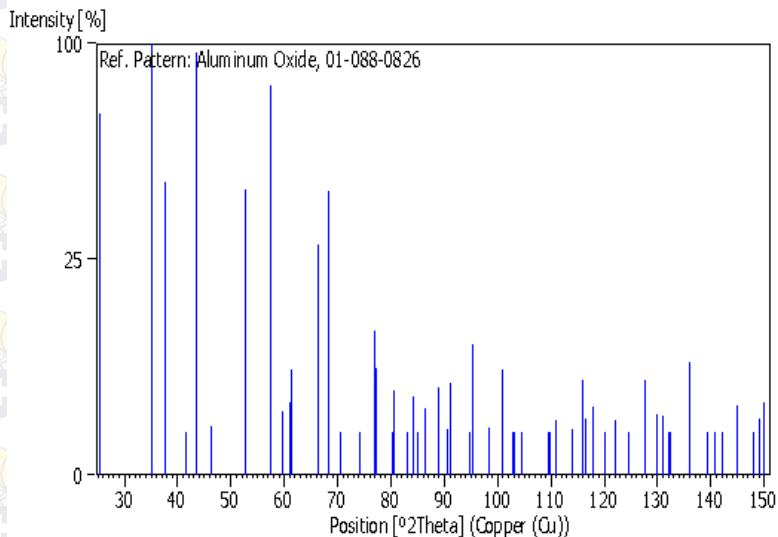


## CrO<sub>87</sub> (01-078-0722)



No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	1	1	1	2.33250	38.567	78.1
2	2	0	0	2.02000	44.833	100.0
3	2	2	0	1.42840	65.269	43.6
4	3	1	1	1.21810	78.452	17.1
5	2	2	2	1.16620	82.679	10.8
6	4	0	0	1.01000	99.401	4.3
7	3	3	1	0.92680	112.432	5.8
8	4	2	0	0.90340	117.006	12.0
9	4	2	2	0.82470	138.146	9.9

# Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (01-088-0826)

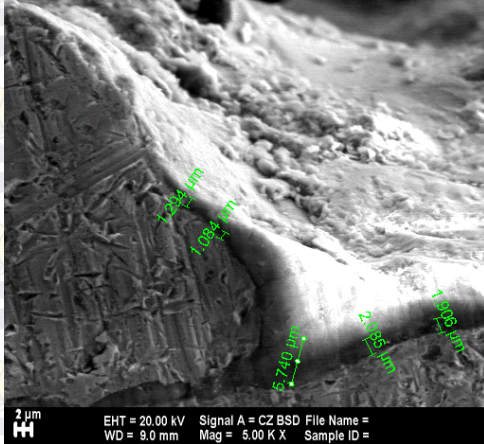


No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	1	2	3.48140	25.566	70.4
2	1	0	4	2.55200	35.137	100.0
3	1	1	0	2.38040	37.762	46.0
4	0	0	6	2.16620	41.660	0.5
5	1	1	3	2.08620	43.337	95.8
6	2	0	2	1.96500	46.159	1.3
7	0	2	4	1.74070	52.530	43.8
8	1	1	6	1.60210	57.476	82.1
9	2	1	1	1.54720	59.718	2.2
10	1	2	2	1.51540	61.103	2.8
11	0	1	8	1.51150	61.278	6.0
12	2	1	4	1.40510	66.490	28.7
13	3	0	0	1.37430	68.181	43.3
14	1	2	5	1.33650	70.389	1.0
15	2	0	8	1.27600	74.268	0.9
16	1	0	10	1.23960	76.838	11.1
17	1	1	9	1.23470	77.200	6.2
18	2	1	7	1.19360	80.385	0.6
19	2	2	0	1.19020	80.662	3.9
20	0	3	6	1.16040	83.184	0.4
21	2	2	3	1.14770	84.315	3.3
22	1	3	1	1.13910	85.100	0.2
23	3	1	2	1.12620	86.311	2.4
24	1	2	8	1.12460	86.464	1.7
25	0	2	10	1.09940	88.959	4.1

## 5. Hasil Pengujian SEM

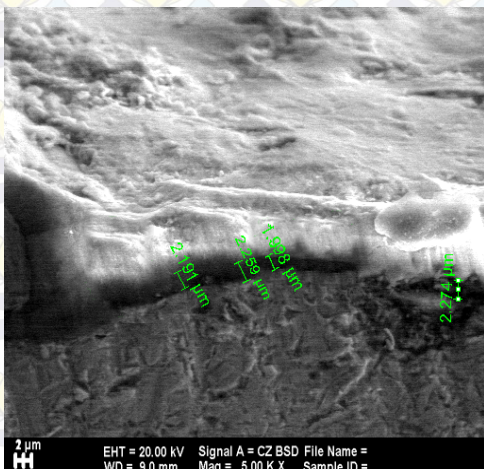
### a. Tebal TGO Setelah *Flame Spray*

YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% - 1x



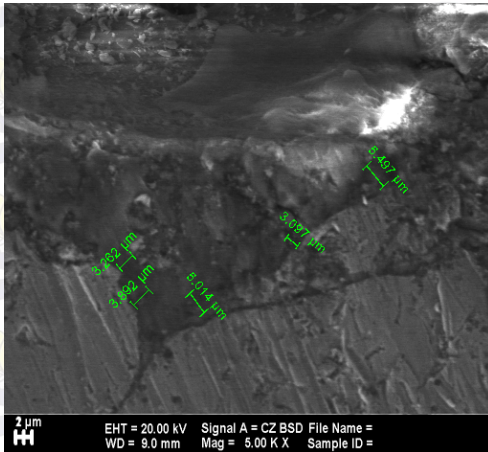
$$\text{TGO rata-rata} = \frac{(1.294 + 1.084 + 2.870 + 2.085 + 1.906)}{5} = 1.848 \mu\text{m}$$

YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15% - 1x



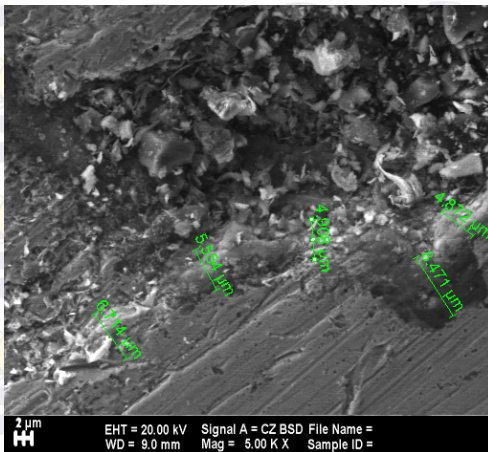
$$\text{TGO rata-rata} = \frac{(2.191 + 2.259 + 1.998 + 2.274)}{4} = 2.1802 \mu\text{m}$$

YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 1x



$$\text{TGO rata-rata} = \frac{(5.014 + 3.892 + 3.262 + 3.097 + 3.497)}{5} = 4.152 \mu\text{m}$$

YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 3x

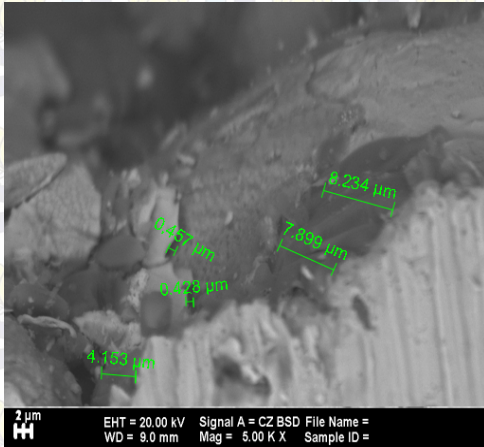


$$\text{TGO rata-rata} = \frac{(6.714 + 5.554 + 4.908 + 8.471 + 4.812)}{5} = 6.092 \mu\text{m}$$



## b. Tebal TGO Setelah Uji Termal

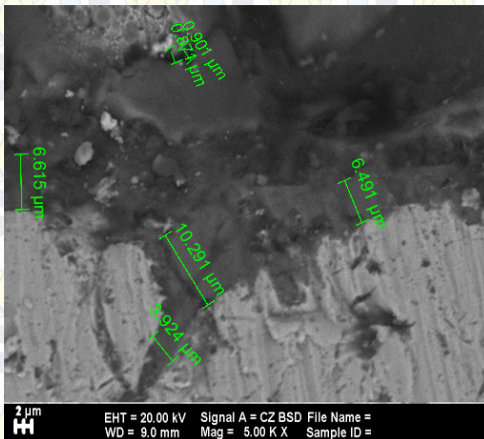
YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% - 1x



$$\text{TGO rata-rata} = \frac{(4.153 + 7.899 + 8.234)}{3} = 6.762 \mu\text{m}$$

$$\text{Retak rata-rata} = \frac{(0.457 + 0.428)}{2} = 0.4425 \mu\text{m}$$

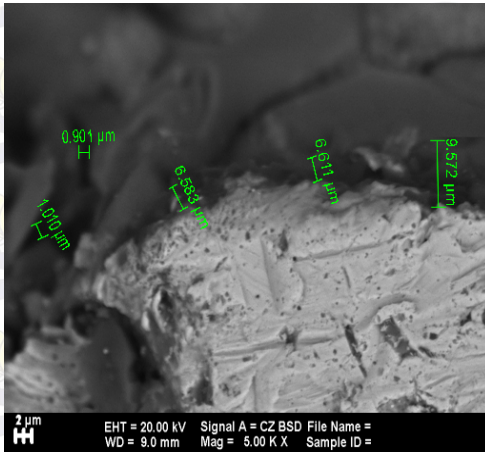
YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15% - 1x



$$\text{TGO rata-rata} = \frac{(6.615 + 10.291 + 6.491 + 3.924)}{4} = 6.83 \mu\text{m}$$

$$\text{Retak rata-rata} = \frac{(0.871 + 0.901)}{2} = 0.886 \mu\text{m}$$

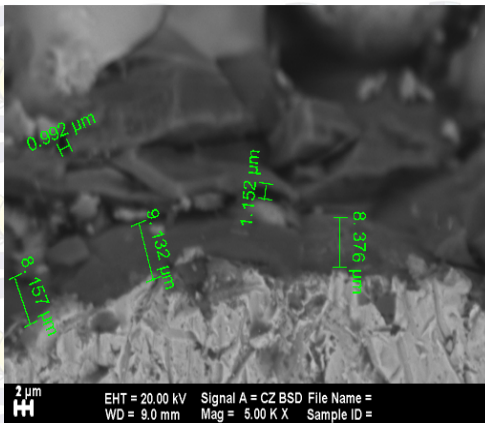
YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 1x



$$\text{TGO rata-rata} = (6.583+6.611+9.572)/3 = 7.588 \mu\text{m}$$

$$\text{Retak rata-rata} = (0.901+1.100)/2 = 0.955 \mu\text{m}$$

YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 3x

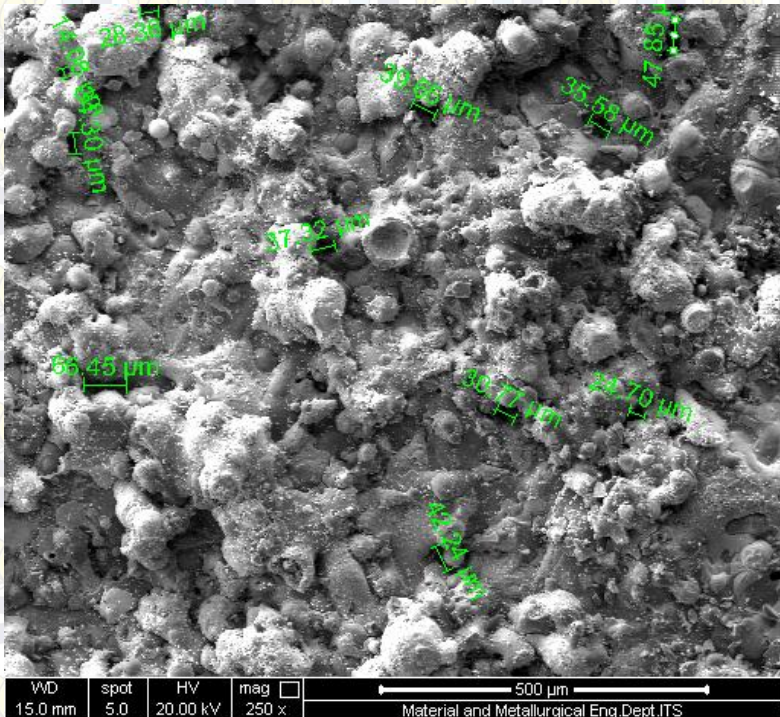


$$\text{TGO rata-rata} = (8.157+9.132+8.376)/3 = 8.555 \mu\text{m}$$

$$\text{Retak rata-rata} = (1.152+0.992)/2 = 1.072 \mu\text{m}$$

### c. Ukuran Porositas Permukaan *Coating*

YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15% - 1x



$$\text{Luasan gambar} = 1191 \times 1025 = 1220775 \mu\text{m}^2$$

Luasan porositas (diasumsikan lingkaran)

$$= \frac{1}{4}\pi(30.77+24.70+56.45+37.32+35.58+39.65+47.85+22.36)^2$$

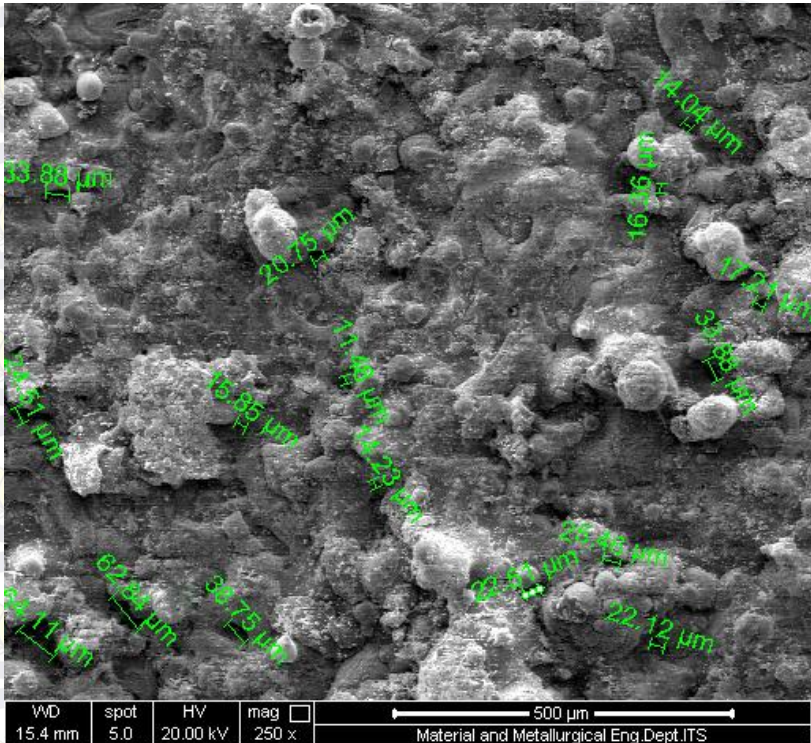
$$= 68201.07 \mu\text{m}^2$$

% Porositas = (Luasan Porositas / Luasan Total) x 100%

$$= (68201.07 / 1.220.775) \times 100\%$$

$$= 5.58\%$$

YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15% - 2x



Luasan gambar = 1191 x 1025 = 1220775 μm<sup>2</sup>

Luasan porositas (diasumsikan lingkaran)

$$= \frac{1}{4} \pi (33.88 + 14.04 + 16.36 + 33.88 + 11.48 + 15.85 + 22.12 + 62.84 + 24.11 + 15.85 + 22.51)^2$$

$$= 75905.88 \mu\text{m}^2$$

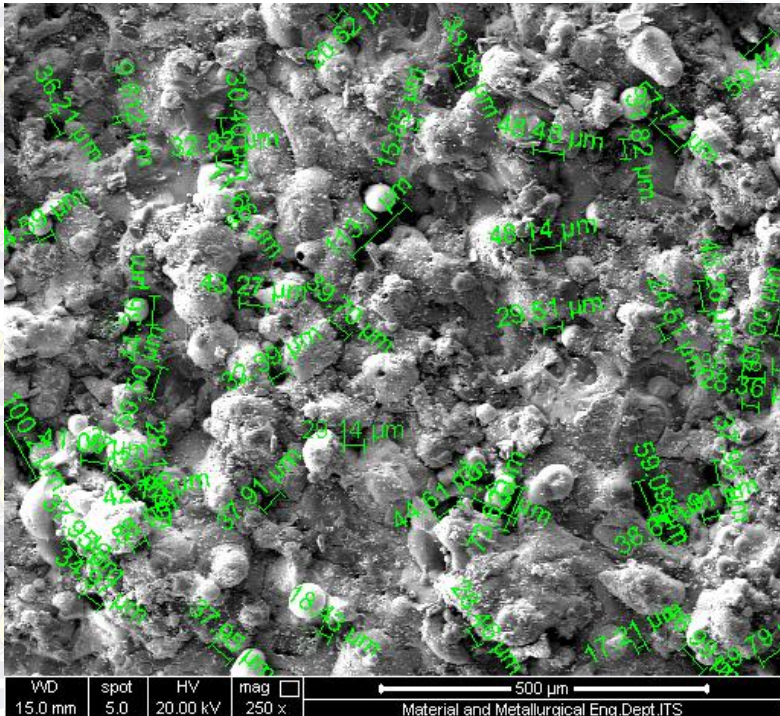
% Porositas = (Luasan Porositas / Luasan Total) x 100%

$$= (58329.28 / 1220775) \times 100 \%$$

$$= 6.22 \%$$



YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15% - 3x



$$\text{Luasan gambar} = 1191 \times 1025 = 1.220.775 \mu\text{m}^2$$

Luasan porositas (diasumsikan lingkaran)

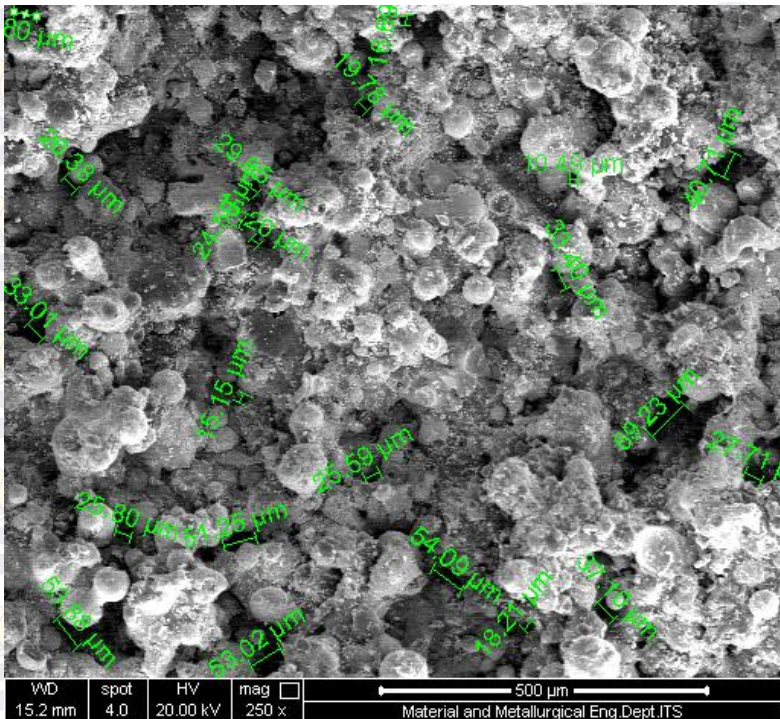
$$\begin{aligned} &= \frac{1}{4}\pi(34.91+4.59+9.612+30.40+43.27+32.39+37.91+20.14+113.1 \\ &\quad +39.38+59.44+17.21+29.51+9.612+33.36)^2 \\ &= 153683.015 \end{aligned}$$

$$\% \text{ Porositas} = (\text{Luasan Porositas} / \text{Luasan Total}) \times 100\%$$

$$= (153683.015 / 1.220.775) \times 100 \%$$

$$= 12.59 \%$$

YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% - 1x



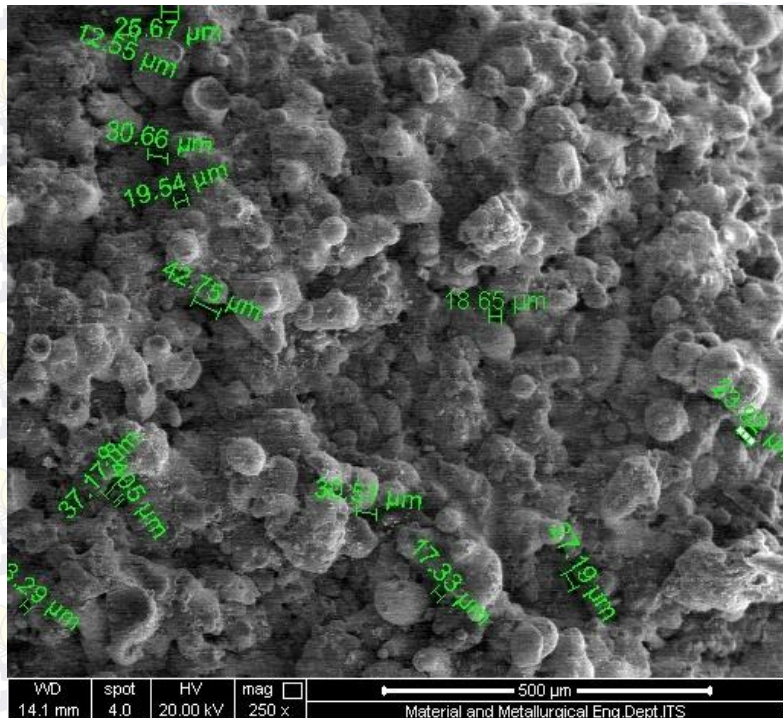
$$\text{Luasan gambar} = 1191 \times 1025 = 1220775 \mu\text{m}^2$$

Luasan porositas (diasumsikan lingkaran)

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{4}\pi(26.38+33.01+19.78+15.15+25.80+25.59+53.33+53.02+69.2 \\ &\quad 3+27.71+40.71)^2 \\ &= 119263.1 \mu\text{m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ Porositas} &= (\text{Luasan Porositas} / \text{Luasan Total}) \times 100\% \\ &= (119263.1 / 1220775) \times 100\% \\ &= 9.769\% \end{aligned}$$

YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% - 2x



$$\text{Luasan gambar} = 1191 \times 1025 = 1220775 \mu\text{m}^2$$

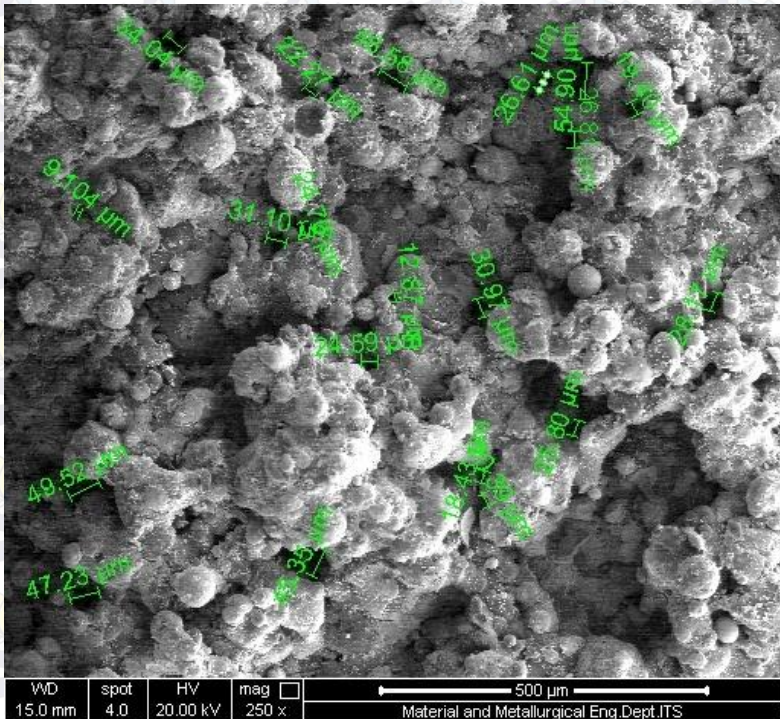
Luasan porositas (diasumsikan lingkaran)

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{4}\pi(12.55+25.67+30.66+19.54+42.75+37.17+3.29+30.51+17.33 \\ &\quad +27.19+18.65+23.92)^2 \\ &= 65701.69 \mu\text{m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ Porositas} &= (\text{Luasan Porositas} / \text{Luasan Total}) \times 100\% \\ &= (65701.69 / 1220775) \times 100\% \\ &= 5.38\% \end{aligned}$$



YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% - 3x



$$\text{Luasan gambar} = 1191 \times 1025 = 1220775 \mu\text{m}^2$$

Luasan porositas (diasumsikan lingkaran)

$$= \frac{1}{4} \pi$$

$$(34.04 + 9.104 + 31.10 + 49.52 + 47.23 + 24.59 + 31.10 + 22.27 + 30.97 + 25.80 + 28.17 + 26.61 + 54.90)^2$$

$$= 135528.69 \mu\text{m}^2$$

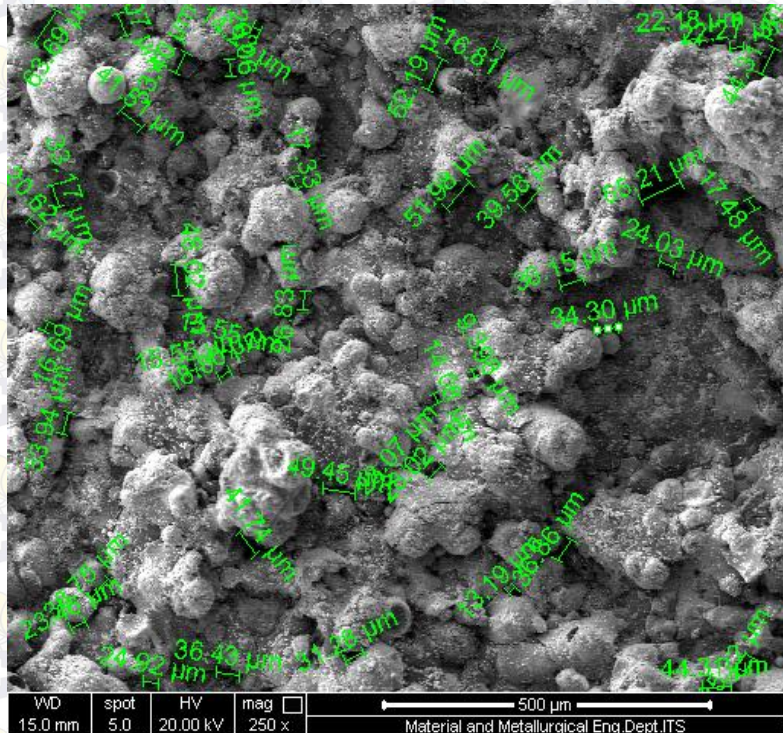
$$\% \text{ Porositas} = (\text{Luasan Porositas} / \text{Luasan Total}) \times 100\%$$

$$= (135528.69 / 1220775) \times 100\%$$

$$= 11.10\%$$



YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 1x



Luasan gambar = 1191 x 1025 = 1220775 μm<sup>2</sup>

Luasan porositas (diasumsikan lingkaran)

$$= \frac{1}{4} \pi (63.69 + 33.17 + 20.62 + 16.69 + 33.94 + 36.43 + 41.74 + 49.45 + 55.21 + 51.98 + 36.15 + 36.86 + 13.19 + 34.40 + 18.80 + 62.19)^2$$

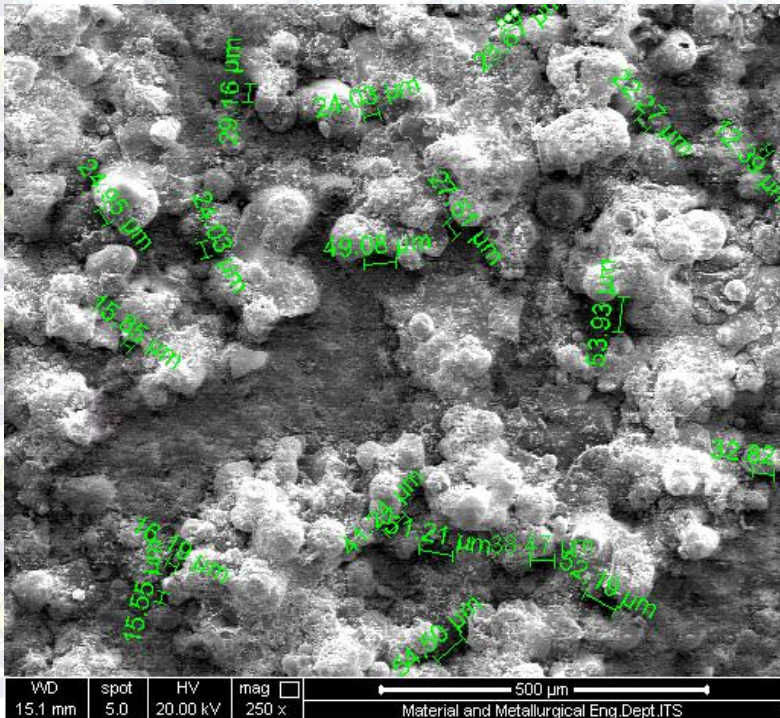
$$= 117900,03 \mu\text{m}^2$$

% Porositas = (Luasan Porositas / Luasan Total) x 100%

$$= (117900,03 / 1220775) \times 100\%$$

$$= 9.68\%$$

YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 2x



$$\text{Luasan gambar} = 1191 \times 1025 = 1220775 \mu\text{m}^2$$

Luasan porositas (diasumsikan lingkaran)

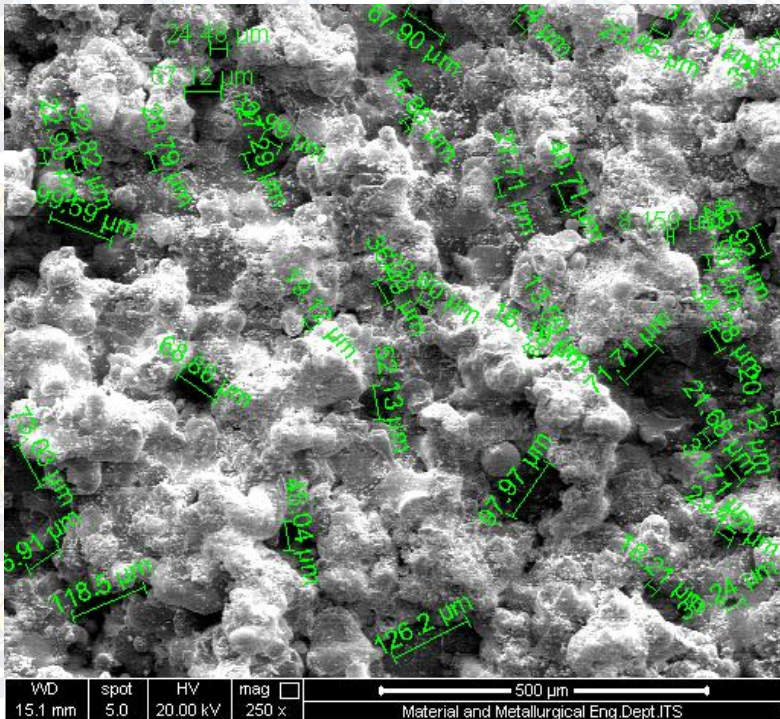
$$= \frac{1}{4}\pi(29.16+24.03+24.05+15.85+15.55+41.24+54.50+52.19+51.2 \\ +1+53.93+32.82+21.27+12.39+25.67+49.08)^2 \\ = 198665.4 \mu\text{m}^2$$

$$\% \text{ Porositas} = (\text{Luasan Porositas} / \text{Luasan Total}) \times 100\%$$

$$= (198665.4 / 1220775) \times 100\%$$

$$= 16.27\%$$

YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 3x



$$\text{Luasan gambar} = 1191 \times 1025 = 1220775 \mu\text{m}^2$$

Luasan porositas (diasumsikan lingkaran)

$$= \frac{1}{4}\pi(22.90+32.82+99.59+28.79+24.48+68.86+71.71+13.21+52.13+19.13+10.71+97.97)^2$$

$$= 230977.19 \mu\text{m}^2$$

$$\% \text{ Porositas} = (\text{Luasan Porositas} / \text{Luasan Total}) \times 100\%$$

$$= (230977.19 / 1220775) \times 100\%$$

$$= 18.9\%$$



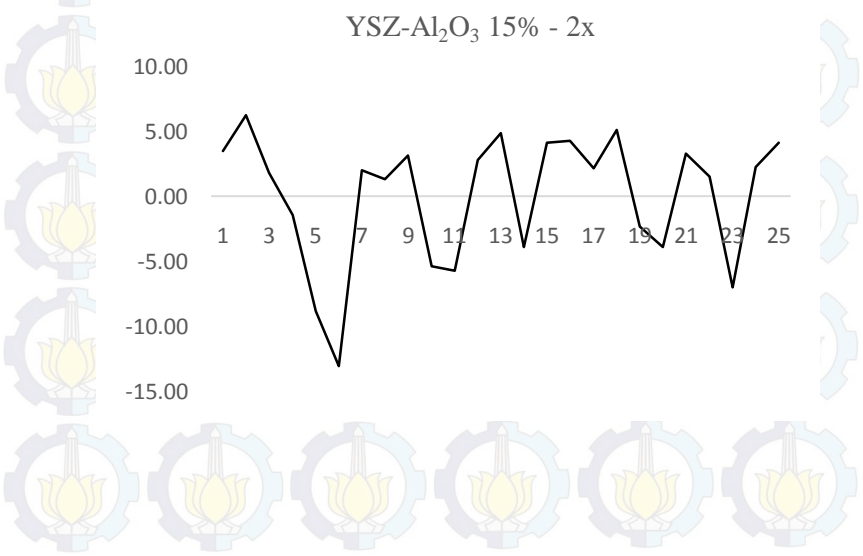
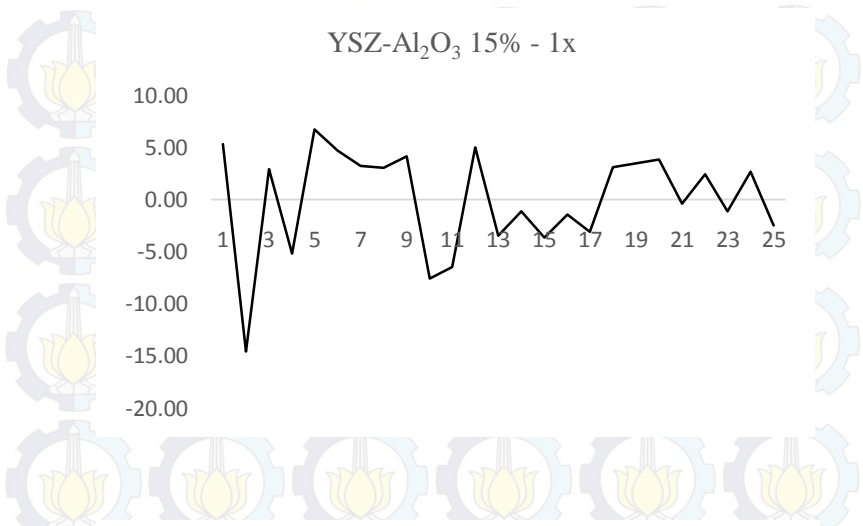
## 6. Hasil Pengujian Kekasaran Permukaan

**Tabel 6.1** Hasil Pengujian Kekasaran Permukaan

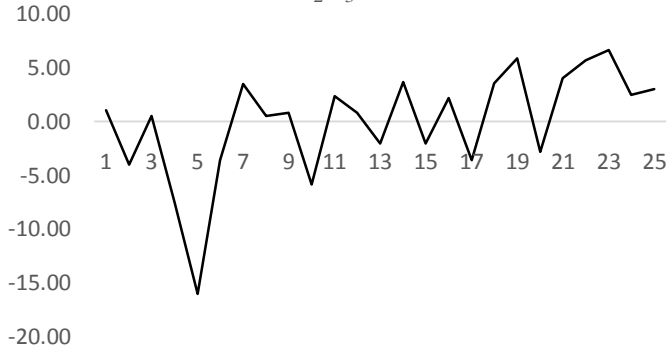
No.	15% 1x	15% 2x	15% 3x	30% 1x	30% 2x	30% 3x	45% 1x	45% 2x	45% 3x
1	145	168	192	179	304	495	270	210	300
2	470	134	270	139	302	470	164	354	242
3	184	188	200	132	326	384	288	228	322
4	317	228	324	252	392	417	160	232	324
5	122	318	455	401	290	422	310	340	135
6	155	370	264	292	301	605	280	258	240
7	179	186	155	116	259	179	136	252	190
8	182	194	200	132	167	132	173	154	154
9	164	172	196	315	196	114	162	294	394
10	356	276	298	231	225	356	164	218	432
11	338	280	172	200	177	438	314	296	272
12	150	176	196	136	148	150	318	214	228
13	288	151	240	131	184	188	194	204	258
14	250	258	152	115	86	190	137	182	506
15	291	160	240	294	174	291	235	160	344
16	255	158	175	154	158	455	162	256	308
17	282	184	264	139	198	282	371	220	430
18	181	148	154	124	137	131	186	212	262
19	175	239	118	303	135	175	188	188	448
20	169	258	252	360	218	169	156	308	334
21	238	170	146	260	197	338	210	316	336
22	192	192	121	241	212	292	168	305	378
23	250	296	106	220	248	250	161	206	284
24	188	183	170	300	140	288	234	254	234
25	272	160	162	302	116	322	290	172	248
Rata-rata	231.7	209.9	208.9	218.7	211.6	301.3	217.2	241.3	304.1



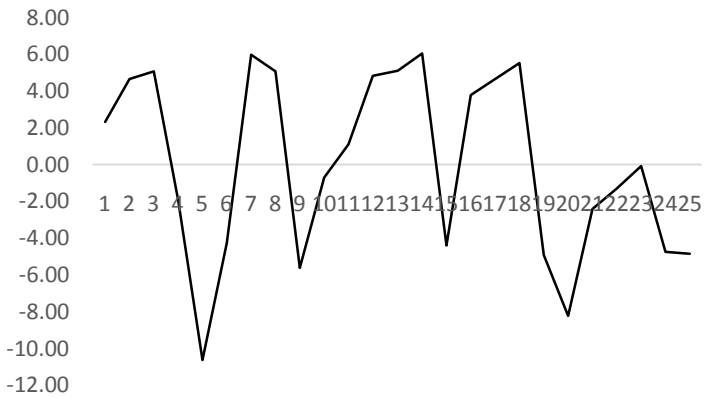
**Grafik 6.1** Kekasaran Permukaan pada Setiap Sampel



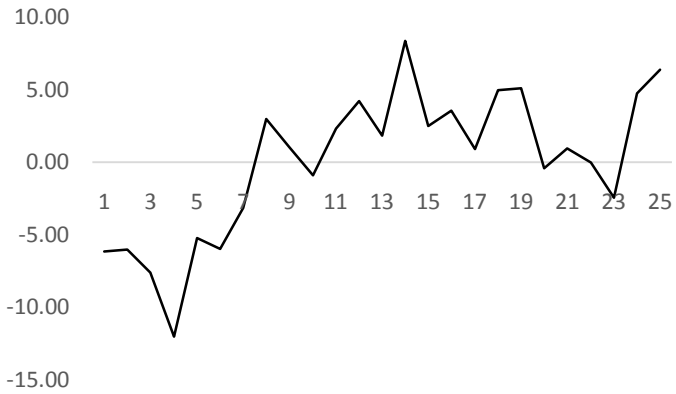
YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15% - 3x



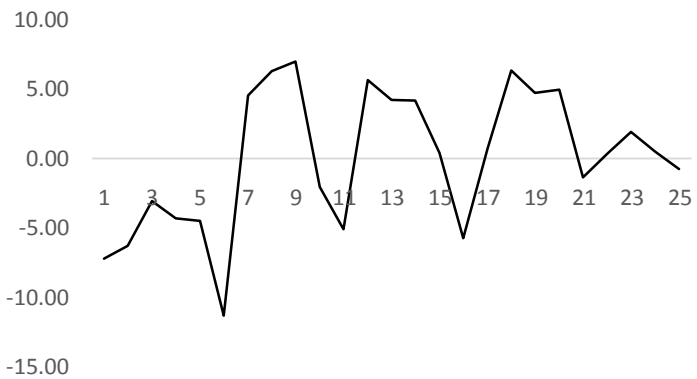
YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% - 1x



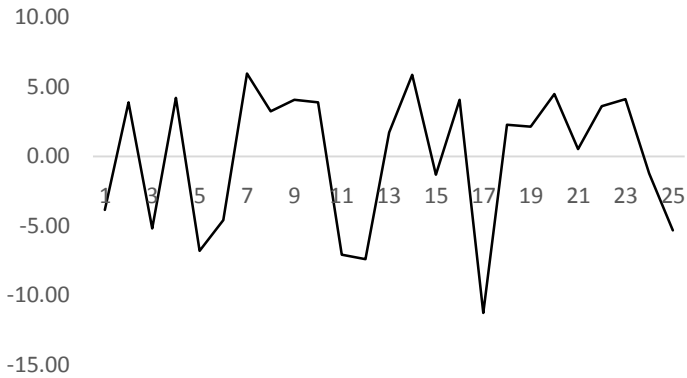
YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% - 2x



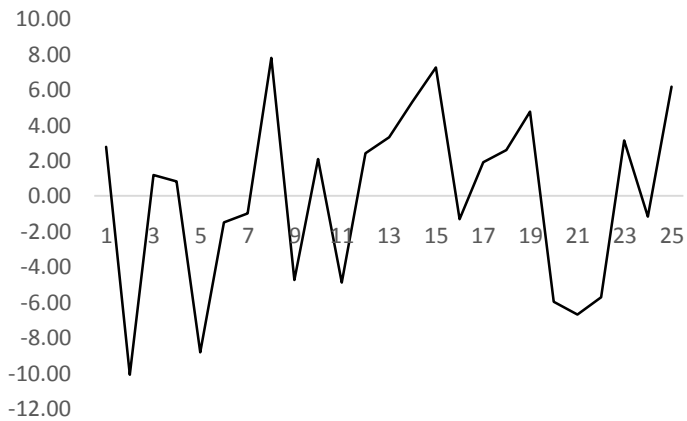
YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% - 3x



YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 1x

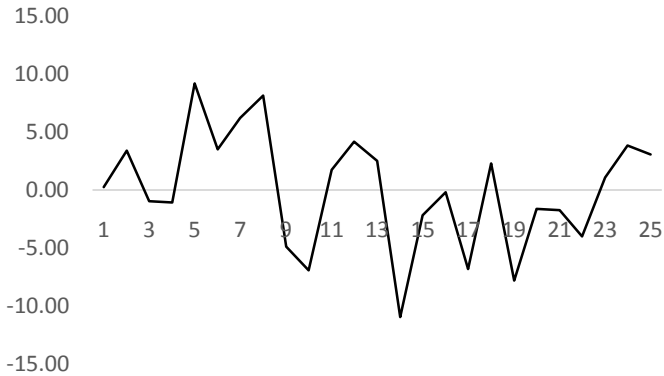


YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 2x





### YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% - 3x



Perhitungan presentase kedalaman porositas

Rumus:

$$\% \text{ Porositas} = \frac{\text{banyak nilai yang berada dibawah nilai nol}}{\text{Jumlah total titik kekasaran}} \times 100\%$$

$$\% \text{ Porositas}_{15\% - 1x} = \frac{11}{25} \times 100\% = 44 \%$$

$$\% \text{ Porositas}_{15\% - 2x} = \frac{9}{25} \times 100\% = 36 \%$$

$$\% \text{ Porositas}_{15\% - 3x} = \frac{10}{25} \times 100\% = 40 \%$$

$$\% \text{ Porositas}_{30\% - 1x} = \frac{11}{25} \times 100\% = 44 \%$$

$$\% \text{ Porositas}_{30\% - 2x} = \frac{8}{25} \times 100\% = 32 \%$$

$$\% \text{ Porositas}_{30\% - 3x} = \frac{10}{25} \times 100\% = 40 \%$$

$$\% \text{ Porositas}_{45\% - 1x} = \frac{10}{25} \times 100\% = 40 \%$$

$$\% \text{ Porositas}_{45\% - 2x} = \frac{10}{25} \times 100\% = 40 \%$$

$$\% \text{ Porositas}_{45\% - 3x} = \frac{12}{25} \times 100\% = 48 \%$$

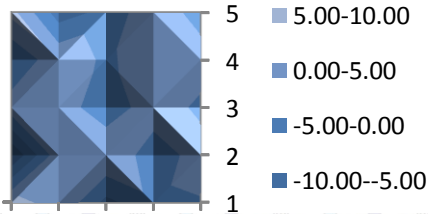
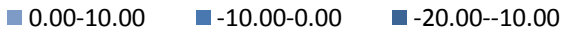
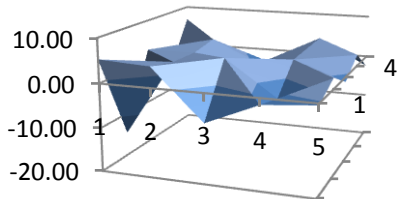
**Tabel 6.2** Presentase Kedalaman Porositas pada Setiap Sampel

Komposisi YSZ- $\text{Al}_2\text{O}_3$	Sapuan	Porositas (%)
15%	1x	44
	2x	36
	3x	40
30%	1x	44
	2x	32
	3x	40
45%	1x	40
	2x	40
	3x	48

## YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15%– 1x

**Tabel 6.3** Nilai Porositas Setelah Didistribusi Normal

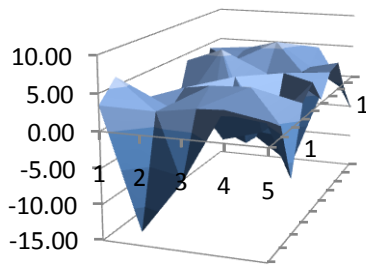
	1	2	3	4	5
1	5.31	4.70	-6.50	-1.42	-0.38
2	-14.58	3.23	5.00	-3.08	2.43
3	2.92	3.04	-3.44	3.10	-1.12
4	-5.22	4.14	-1.12	3.47	2.68
5	6.71	-7.61	-3.63	3.84	-2.47



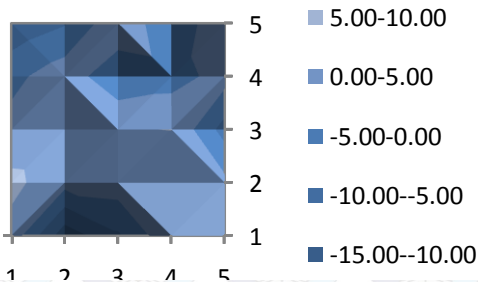
## YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15% – 2x

**Tabel 6.4** Nilai Porositas Setelah Didistribusi Normal

	1	2	3	4	5
1	3.43	-13.10	-5.74	4.25	3.26
2	6.21	1.95	2.77	2.12	1.46
3	1.79	1.30	4.82	5.06	-7.05
4	-1.48	3.10	-3.94	-2.38	2.20
5	-8.85	-5.41	4.08	-3.94	4.08



■ 5.00-10.00     
 ■ 0.00-5.00     
 ■ -5.00-0.00

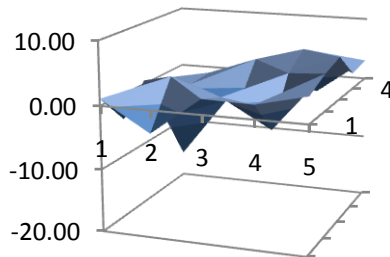




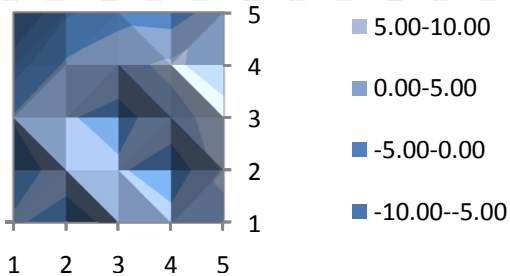
## YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15% – 3x

**Tabel 6.5** Nilai Porositas Setelah Didistribusi Normal

	1	2	3	4	5
1	1.10	-3.58	2.40	2.20	4.09
2	-3.97	3.50	0.84	-3.58	5.71
3	0.58	0.58	-2.02	3.57	6.69
4	-7.49	0.84	3.70	5.91	2.53
5	-16.00	-5.79	-2.02	-2.80	3.05



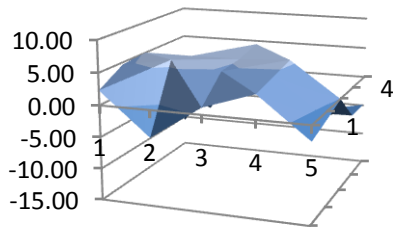
■ 0.00-10.00   
 ■ -10.00-0.00   
 ■ -20.00--10.00



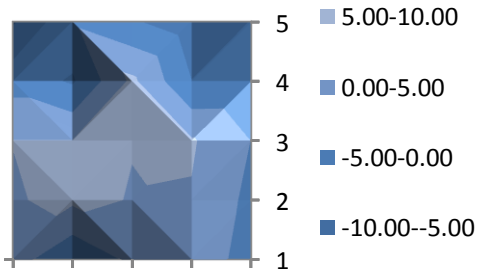
## YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% – 1x

**Tabel 6.5** Nilai Porositas Setelah Didistribusi Normal

	1	2	3	4	5
1	2.32	-4.28	1.09	3.78	-2.41
2	4.65	5.99	4.83	4.65	-1.30
3	5.06	5.06	5.12	5.53	-0.07
4	-1.94	-5.62	6.05	-4.92	-4.74
5	-10.63	-0.72	-4.39	-8.24	-4.86



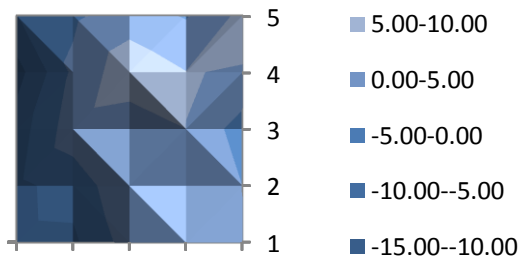
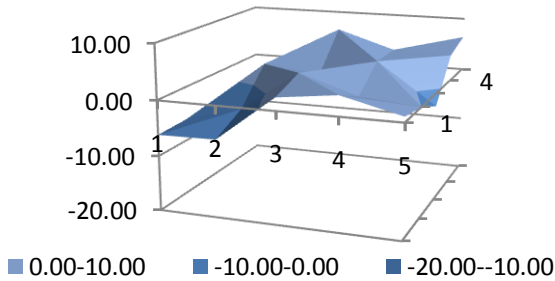
■ 5.00-10.00    ■ 0.00-5.00    ■ -5.00-0.00



## YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% – 2x

**Tabel 6.6** Nilai Porositas Setelah Didistribusi Normal

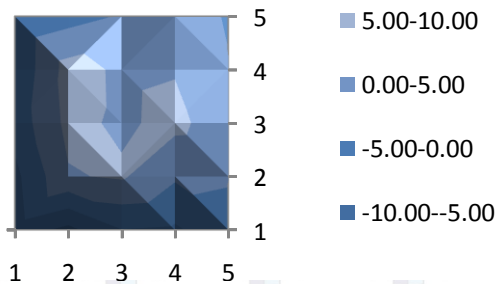
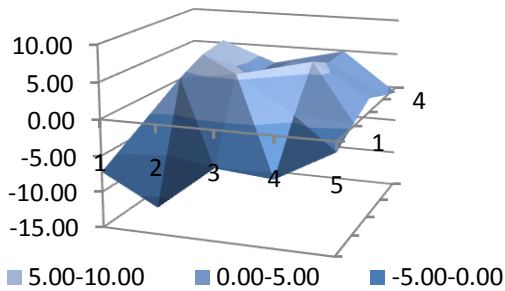
	1	2	3	4	5
1	-6.17	-5.97	2.31	3.58	0.97
2	-6.03	-3.16	4.25	0.91	-0.03
3	-7.64	2.98	1.84	4.98	-2.43
4	-12.04	1.04	8.38	5.11	4.78
5	-5.23	-0.89	2.51	-0.43	6.38



## YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30% – 3x

**Tabel 6.7** Nilai Porositas Setelah Didistribusi Normal

	1	2	3	4	5
1	-7.21	-11.31	-5.09	-5.72	-1.37
2	-6.28	4.55	5.63	0.72	0.35
3	-3.08	6.30	4.22	6.34	1.91
4	-4.31	6.97	4.14	4.70	0.50
5	-4.49	-2.04	0.38	4.93	-0.77

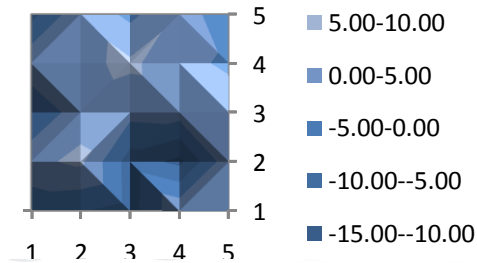
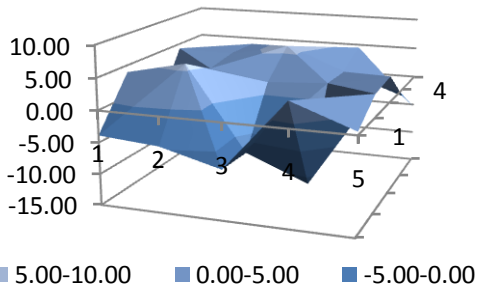




## YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% – 1x

**Tabel 6.8** Nilai Porositas Setelah Didistribusi Normal

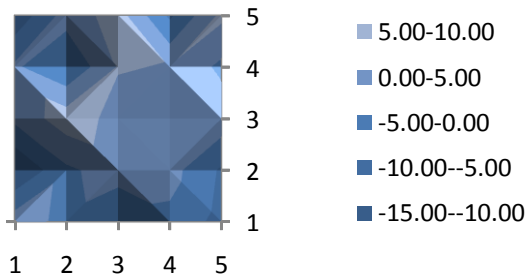
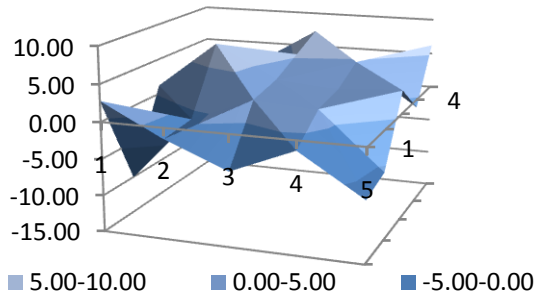
	1	2	3	4	5
1	-3.87	-4.61	-7.10	4.06	0.53
2	3.91	5.96	-7.40	-11.29	3.62
3	-5.20	3.25	1.71	2.29	4.13
4	4.20	4.06	5.89	2.15	-1.23
5	-6.81	3.91	-1.30	4.50	-5.34



## YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% – 2x

**Tabel 6.9** Nilai Porositas Setelah Didistribusi Normal

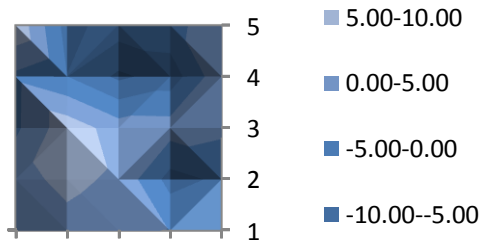
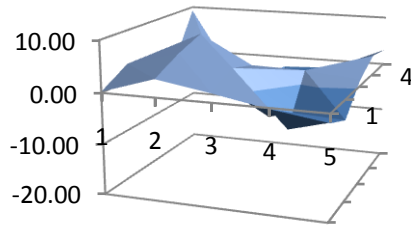
	1	2	3	4	5
1	2.80	-1.49	-4.89	-1.31	-6.68
2	-10.08	-0.96	2.44	1.91	-5.70
3	1.19	7.81	3.34	2.62	3.16
4	0.83	-4.71	5.31	4.77	-1.13
5	-8.83	2.09	7.27	-5.96	6.20



## YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 45% – 3x

**Tabel 6.10** Nilai Porositas Setelah Didistribusi Normal

	1	2	3	4	5
1	0.22	3.49	1.75	-0.21	-1.73
2	3.38	-6.21	4.14	-6.85	-4.02
3	-0.97	8.17	2.51	2.29	1.09
4	-1.08	-4.89	-10.98	-7.83	3.82
5	9.20	-6.96	-2.17	-1.63	3.05







## BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Kota Surabaya pada tanggal 13 Agustus 1992. Penulis merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara pasangan Suwadi dan Mujiati. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di SDN Jemur Wonosari II/525 Surabaya, SMP Negeri 13 Surabaya, dan SMA Negeri 16 Surabaya. Setelah lulus SMA pada tahun 2011 penulis diterima di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Institut

Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya melalui jalur Undangan. Semasa kuliah penulis aktif mengikuti kegiatan organisasi baik di dalam maupun di luar kampus. Penulis pernah menjabat sebagai Staff Biro Keprofesian Departemen Keprofesian dan Kesejahteraan Mahasiswa (PROKESMA) HMMT FTI- ITS tahun kepengurusan 2012/2013, dan Sekretaris Departemen Keprofesian dan Kesejahteraan Mahasiswa (PROKESMA) HMMT FTI-ITS tahun kepengurusan 2013/2014..

Penulis memiliki pengalaman kerja praktek di PT Semen Indonesia pada bulan Agustus 2014. Selama kerja praktek penulis menangani masalah analisa *spalling* hasil pengelasan FCAW pada *Hydraulic Roll Crusher* di PT Semen Indonesia Pabrik Tuban.

Tugas akhir yang diambil penulis dalam topik Material Inovatif berjudul “Pengaruh Komposisi dan Variasi Jumlah Sapuan Komposit YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Terhadap Ketahanan Termal dan Kekuatan Lekat pada YSZ/YSZ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> *Double Layer* TBC Untuk Aplikasi Nosel Roket.”

*Email: ratna.agustina@yahoo.co.id*