

TUGAS AKHIR - TL 141584

**PENGARUH *THERMAL CYCLE* TERHADAP  
KETAHANAN ABRASIF DAN ADHESI PELAPISAN  
NiCrWCFe PADA SS 304 DENGAN METODE  
*THERMAL ARC SPRAY***

PANJI HARGA SUSILA  
NRP. 2713 100 110

Dosen Pembimbing  
Dr. Agung Purniawan, ST., M.Eng.  
Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si.

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2017



**TUGAS AKHIR - TL141584**

**PENGARUH *THERMAL CYCLE* TERHADAP  
KETAHANAN ABRASIF DAN ADHESI  
PELAPISAN NiCrWFe PADA SS 304 DENGAN  
METODE *THERMAL ARC SPRAY***

Panji Harga Susila  
NRP 2713 100 110

Dosen Pembimbing :  
Dr. Agung Purniawan, ST., M.Eng.  
Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si.

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2017

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



**FINAL PROJECT - TL141584**

# **EFFECT OF THERMAL CYCLE ON ABRASIVE AND ADHESIVE RESISTANCE TO NiCrWCF<sub>e</sub> COATED ON SS 304 WITH THERMAL ARC SPRAY METHOD**

Panji Harga Susila  
NRP 2713 100 110

Advisor:

Ir Dr. Agung Purniawan, ST., M.Eng.

Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si.

MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya  
2017

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

**PENGARUH *THERMAL CYCLE* TERHADAP  
KETAHANAN ABRASIF DAN ADHESI PELAPISAN  
NiCrWCFe PADA SS 304 DENGAN METODE  
*THERMAL ARC SPRAY***

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Bidang Studi Metalurgi Manufaktur  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**Panji Harga Susila**

NRP. 2713 100 110

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Agung Purniawan, ST., M.Eng . . . . . (Pembimbing I)
2. Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si. . . . . (Pembimbing II)



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

**PENGARUH *THERMAL CYCLE* TERHADAP  
KETAHANAN ABRASIF DAN ADHESI PELAPISAN  
NiCrWCFE PADA SS 304 DENGAN METODE  
*THERMAL ARC SPRAY***

Nama : Panji Harga Susila  
NRP : 2713100110  
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi  
Pembimbing : Dr. Agung Purniawan, ST. M.Eng  
Hariyati Purwaningsih S.Si., M.Si.

**Abstrak**

Pelapisan logam dengan metode *thermal arc spray* merupakan solusi untuk perlindungan material terhadap lingkungan khususnya pada *boiler*. Erosi pada *superheater tube* yang merupakan komponen dari *coal fired-boiler* disebabkan oleh partikel debu (*fly ash*) yang berasal dari pembakaran batu bara. Penelitian ini mensimulasikan kondisi atmosfer *boiler* yang beroperasi pada temperatur tinggi dengan suatu metode *thermal cycle* yang bertujuan untuk menganalisis pengaruh *thermal cycle* pada pelapisan NiCrWCFe dengan metode *thermal arc spray* terhadap struktur mikro dan sifat mekanik. *Thermal cycle* meningkatkan ketahanan abrasi lapisan dengan pengurangan berat hingga sebesar 0,0152 g/cm<sup>2</sup> di 10-cycle dibandingkan dengan tanpa cycle sebesar 0,5310 g/cm<sup>2</sup>. Pada hasil SEM, *thermal cycle* menurunkan porositas hingga mencapai 2,358% di 10-cycle. Uji XRD dan EDS menampilkan terbentuknya senyawa oksida seperti CrO, FeO, dan FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. *Thermal cycle* meningkatkan kekuatan adhesi lapisan dibuktikan dengan hasil uji *pull-off* di 10-cycle mencapai 11,24 MPa. *Thermal cycle* juga meningkatkan kekerasan mikro dan mencapai 883,7 Hv di 5-cycle tetapi *thermal cycle* juga menurunkan nilai kekasaran permukaan hingga pada 10-cycle mencapai 8,49 μm.

***Kata kunci : Boiler, Thermal Arc-spray, NiCrWCFe, Thermal Cycle***

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# **EFFECT OF THERMAL CYCLE ON ABRASIVE AND ADHESIVE RESISTANCE TO NiCrWCF<sub>e</sub> COATED ON SS 304 WITH THERMAL ARC SPRAY METHOD**

Student Name : Panji Harga Susila  
Student ID : 2713100110  
Department : Materials and Metallurgical Engineering  
Advisor : Dr. Agung Purniawan, ST. M.Eng  
Hariyati Purwaningsih S.Si., M.Si.

## **Abstract**

Metallic coating with thermal arc spray method is a solution to protect materials from the environment, especially in boiler. Erosion occurred on superheater tube that is a component from coal-fired boiler caused by flying ash from coal combustion. The boiler atmosphere condition that operate at high temperature is simulated on this study with thermal cycle method and the purpose of this study is to analyze the effect of thermal cycle on NiCrWCF<sub>e</sub> coating with thermal arc spray method on it's micro structure and mechanical properties. Thermal cycle increased the abrasive resistance of coating with the lowest weight loss results is at 10<sup>th</sup>-cycle with 0,0152 g/cm<sup>2</sup> rather than without thermal cycle with 0,531 g/cm<sup>2</sup>. SEM result showed that thermal cycle decrease the porosity until 2,358% at 10<sup>th</sup>- cycle. XRD and EDS test showed that the coating formed oxide compound like CrO , FeO, and FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. Thermal cycle increased the adhesive strength of coating, proved by pull-off test results at 10<sup>th</sup>-cycle reached 11,24 MPa. Thermal cycle also increased the micro hardness value that reached 883,7 Hv at 5<sup>th</sup>-cycle but thermal cycle also decreased the surface roughness until at 10<sup>th</sup>- cycle with 8,49 μm.

***Keyword : Boiler, Thermal Arc-spray, NiCrWCF<sub>e</sub>, Thermal Cycle***

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat, anugerah, serta karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir serta menyusun laporan Tugas Akhir dengan judul **“Pengaruh *Thermal Cycle* Terhadap Ketahanan Abrasif dan Adhesi Pelapisan NiCrWCFE pada SS 304 dengan Metode *Thermal Arc Spray*”**. Laporan tugas akhir ini dibuat untuk melengkapi Mata Kuliah Tugas Akhir yang menjadi salah satu syarat kelulusan mahasiswa di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, laporan tugas akhir ini tidak dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada pihak yang telah memberikan dukungan, bimbingan, dan kesempatan kepada penulis hingga laporan tugas akhir ini dapat diselesaikan, diantaranya:

1. Kedua orang tua dan keluarga yang telah memberikan banyak doa, dukungan, semangat, cinta kasih, motivasi, dan inspirasi.
2. Dr. Agung Purniawan, ST, M,Eng dan Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir penulis yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu selama pengerjaan tugas akhir ini.
3. Pak Larasanto dan segenap rekan-rekan CV. Cipta Agung yang telah membantu selama pengerjaan tugas akhir ini.
4. Dr. Agung Purniawan, ST., M,Eng selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.
5. Dr. Eng. Hosta Ardhyanta ST., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
6. Dian Mughni Felicia, ST., M.Sc. selaku dosen wali yang sangat mengayomi selama penulis menjalani pendidikan di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi.

7. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS yang telah membimbing penulis hingga terciptanya laporan ini.
8. Rekan-rekan mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi angkatan 2013, 2014, dan 2015.
9. Serta seluruh pihak yang belum bisa dituliskan satu per satu oleh penulis. Terimakasih atas dukungan dan bantuan teman-teman sekalian.

Penulis berharap laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi seluruh pihak yang membaca. Penulis juga menyadari masih terdapat banyak kekurangan dalam penulisan laporan tugas akhir ini, sehingga penulis sangat menerima kritik dan saran dari para pembaca yang dapat membangun demi kesempurnaan laporan tugas akhir ini.

Surabaya, 13 Januari 2017  
Penulis,

Panji Harga Susila  
2713100110

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	<b>v</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ix</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xix</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</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>	
2.1 <i>Boiler</i> .....	5
2.2 Baja Tahan Karat ( <i>Stainless Steel</i> ).....	7
2.3 Pelapisan ( <i>Coating</i> ) .....	10
2.4 <i>Nickel-Aluminium Bond Coat</i> .....	11
2.5 <i>Nickel Chrome Tungsten Carbide Iron Top Coat</i> .....	12
2.6 <i>Thermal Spray</i> .....	14
2.7 Abrasi .....	17
2.8 <i>Thermal Cycle</i> .....	17
2.9 Difusi .....	18
2.9.1 Difusi Vakansi .....	18
2.9.2 Difusi Interstiti .....	19
2.10 Penelitian Sebelumnya .....	20
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b>	
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	23
3.2 Bahan Penelitian.....	24
3.2.1 <i>Stainless steel AISI 304</i> .....	24
3.2.2 <i>NiAl (wire 75 B) - Bond Coat</i> .....	24
3.2.3 <i>TAFA 97 MXC (NiCrWCFe) – Top Coat</i> .....	24

3.3	Alat Penelitian .....	26
3.3.1	Gerinda potong .....	26
3.3.2	Alat <i>Wire Arc Spray</i> .....	26
3.3.3	Alat Uji Kekasaran Permukaan ( <i>Surface Roughness Tester</i> ) .....	27
3.3.4	Alat <i>Sandblast</i> .....	29
3.3.5	Alat Uji <i>Pull-Off</i> .....	29
3.3.6	Alat Uji Laju Abrasi .....	29
3.3.7	Alat SEM.....	30
3.3.8	Alat Pengujian Kekerasan ( <i>Micro Vickers Hardness</i> ).....	30
3.3.9	Pengujian XRD.....	31
3.3.1	<i>Muffle Furnace</i> .....	31
3.4	Metode Penelitian .....	32
3.4.1	Preparasi Sampel <i>Stainless Steel</i> AISI 304 .....	32
3.4.2	Proses Pelapisan .....	33
3.4.3	Proses <i>Thermal Cycle</i> .....	34
3.5	Pengujian.....	35
3.5.1	Morfologi dan Komposisi Hasil <i>Coating</i> .....	35
3.5.2	Pengamatan Senyawa dan Unsur .....	36
3.5.3	<i>Surface Roughness Test</i> .....	37
3.5.4	Kekuatan Adhesi <i>Coating</i> .....	37
3.5.5	Ketahanan Abrasi .....	37
3.5.6	Kekerasan <i>Micro Vickers</i> .....	37
3.6	Rancangan Penelitian .....	38
<b>BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN</b>		
4.1	Analisis Pengujian Makrostruktur .....	39
4.1.1	Hasil <i>Grit Blasting</i> .....	39
4.1.2	Hasil Proses <i>Thermal Arc Spray</i> dan <i>Thermal Cycle</i> .....	40
4.2	Analisis Pengujian Mikrostruktur .....	41
4.2.1	Hasil Analisis Morfologi Permukaan Lapisan <i>Coating (top view)</i> .....	41
4.2.2	Hasil Analisis Morfologi Penampang Melintang Lapisan <i>Coating (cross-section)</i> .....	47

4.2.3 Hasil Pengujian SEM dan EDS.....	49
4.3 Analisis Hasil XRD .....	51
4.4 Analisis Pengujian Kekasaran.....	54
4.5 Analisis Pengujian Kekerasan <i>Micro Vickers</i> .....	56
4.6 Analisis Pengujian Abrasi.....	59
4.7 Analisis Pengujian Daya Lekat .....	61
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
5.1 Kesimpulan.....	67
5.2 Saran.....	67
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>xxi</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>xxv</b>
<b>BIODATA PENULIS .....</b>	<b>xliv</b>

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b>	Gambaran Sederhana pada sistem <i>fire tube boiler</i> .....	5
<b>Gambar 2. 2</b>	<i>Watertube boiler</i> dengan bahan bakar <i>coal</i> .....	6
<b>Gambar 2. 3</b>	Diagram fasa baja 18%Cr, 8%Ni .....	9
<b>Gambar 2. 4</b>	Diagram fasa Fe-W .....	12
<b>Gambar 2. 5</b>	(a) <i>Fused tungsten carbide</i> dengan metode <i>thermal plasma</i> busur. (b) Mikrostruktur pelapisan WC-based .....	13
<b>Gambar 2. 6</b>	Skematik yang dihasilkan oleh dua kawat bermuatan listrik meleleh di <i>nozzle</i> dari pistol semprot EAW .....	15
<b>Gambar 2. 7</b>	Contoh skema mekanisme difusi (a) difusi vakansi (b) difusi interstiti .....	19
<b>Gambar 2. 8</b>	Kurva komparasi nilai <i>wear rate</i> .....	20
<b>Gambar 2. 9</b>	Grafik <i>abrasive wear</i> hasil <i>coating</i> .....	22
<b>Gambar 3. 1</b>	Diagram alir penelitian.....	23
<b>Gambar 3. 2</b>	TAFA 97 MXC (NiCrWCFe) wire.....	25
<b>Gambar 3. 3</b>	Alat <i>wire arc spray</i> .....	26
<b>Gambar 3. 4</b>	<i>Surface Roughness Tester</i> .....	27
<b>Gambar 3. 5</b>	Alat <i>sandblast</i> .....	28
<b>Gambar 3. 6</b>	Alat uji <i>pull-off</i> .....	29
<b>Gambar 3. 7</b>	Alat uji abrasi .....	29
<b>Gambar 3. 8</b>	Alat uji <i>scanning electron microscope</i> .....	30
<b>Gambar 3. 9</b>	Alat uji kekerasan <i>micro vickers</i> .....	30
<b>Gambar 3. 10</b>	Alat XRD PAN analitical .....	31
<b>Gambar 3. 11</b>	<i>Muffle furnace</i> .....	32
<b>Gambar 3. 12</b>	Hasil <i>sand blasting</i> .....	33
<b>Gambar 3. 13</b>	Proses <i>thermal arc spray</i> .....	34
<b>Gambar 3. 14</b>	Kurva <i>thermal cycle</i> .....	35
<b>Gambar 4. 1</b>	Permukaan substrat (a) sebelum (b) sesudah <i>abrasive grit blasting</i> .....	39
<b>Gambar 4. 2</b>	Pengamatan visual (a) tanpa <i>thermal cycle</i> (b) 1x <i>cycle</i> (c) 5x <i>cycle</i> (d) 10x <i>cycle</i> .....	40

<b>Gambar 4. 3</b>	Hasil SEM <i>top view</i> dengan perbesaran 500x (a) tanpa <i>thermal cycle</i> (b) 1x <i>cycle</i> (c) 5x <i>cycle</i> (d) 10x <i>cycle</i> .....	42
<b>Gambar 4. 4</b>	Hasil SEM <i>top view</i> dengan perbesaran 100x (a) tanpa <i>thermal cycle</i> (b) 1x <i>cycle</i> (c) 5x <i>cycle</i> (d) 10x <i>cycle</i> .....	43
<b>Gambar 4. 5</b>	Grafik porositas permukaan <i>coating</i> terhadap jumlah <i>thermal cycle</i> dengan imagej .....	45
<b>Gambar 4. 6</b>	Hasil perhitungan porositas dengan imagej (a) tanpa <i>thermal cycle</i> (b) 1x <i>cycle</i> (c) 5x <i>cycle</i> (d) 10x <i>cycle</i> .....	46
<b>Gambar 4. 7</b>	Hasil uji SEM <i>cross-section area</i> dengan perbesaran 100 x (a) <i>as-coated</i> (b) 1x <i>cycle</i> (c) 5x <i>cycle</i> (d) 10x <i>cycle</i> .....	48
<b>Gambar 4. 8</b>	Hasil pengujian SEM dan EDS dengan perbesaran 500x (a) <i>as-coated</i> (b) 1x <i>cycle</i> (c) 5x <i>cycle</i> (d) 10x <i>cycle</i> .....	50
<b>Gambar 4. 9</b>	Plot grafik hasil XRD <i>coating</i> NiCrWCFe (a) <i>as-coated</i> (b) 1x <i>cycle</i> (c) 5x <i>cycle</i> (d) 10x <i>cycle</i> .....	52
<b>Gambar 4. 10</b>	Plot <i>peak</i> pertama hasil XRD material <i>coating</i> NiCrWCFe (A) <i>as-coated</i> (B) 1x <i>cycle</i> (C) 5x <i>cycle</i> (D) 10x <i>cycle</i> . .....	53
<b>Gambar 4. 11</b>	Grafik uji kekasaran terhadap <i>thermal cycle</i> .....	55
<b>Gambar 4. 12</b>	Grafik uji kekerasan <i>micro vickers</i> terhadap jumlah <i>thermal cycle</i> . .....	57
<b>Gambar 4. 13</b>	Grafik pengaruh jumlah <i>cycle</i> terhadap <i>weight loss</i> .....	61
<b>Gambar 4. 14</b>	Tampak atas hasil uji <i>pull off</i> .....	62
<b>Gambar 4. 15</b>	Grafik kekuatan adhesi terhadap <i>thermal cycle</i> ..	63
<b>Gambar 4. 16</b>	Permukaan hasil pengujian <i>pull off</i> (a) <i>as-coated</i> (b) 1x <i>cycle</i> (c) 5x <i>cycle</i> (d) 10 <i>cycle</i> ..	65

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2. 1</b> Data dan contoh <i>stainless steel</i> feritik, austenitik, dan martensitik .....	8
<b>Tabel 2. 2</b> Parameter <i>spray</i> dan komposisi <i>powder</i> .....	21
<b>Tabel 3. 1</b> Komposisi kimia <i>stainless steel</i> AISI 304.....	24
<b>Tabel 3. 2</b> Komposisi kimia NiAl <i>wire</i> 75 B.....	24
<b>Tabel 3. 3</b> Komposisi kimia TAFA 97 MXC <i>wire-top coat</i> .....	25
<b>Tabel 3. 4</b> Properties fisik <i>wire</i> 97 MXC .....	25
<b>Tabel 3. 5</b> Spesifikasi peralatan <i>abrasive grit blasting</i> tipe NOB35CE .....	28
<b>Tabel 3. 6</b> Rancangan pengujian .....	38
<b>Tabel 4. 1</b> Hasil perhitungan densitas porositas terhadap <i>thermal cycle</i> .....	44
<b>Tabel 4. 2</b> Hasil perhitungan porositas terhadap <i>thermal cycle</i> ..	45
<b>Tabel 4. 3</b> Data pengujian EDS pada permukaan sampel terhadap <i>thermal cycle</i> .....	49
<b>Tabel 4. 4</b> Data hasil uji kekasaran terhadap <i>thermal cycle</i> .....	55
<b>Tabel 4. 5</b> Data pengujian <i>micro vickers</i> terhadap <i>thermal cycle</i> .....	58
<b>Tabel 4. 6</b> Data hasil pengujian ketahanan abrasi terhadap <i>thermal cycle</i> .....	59
<b>Tabel 4. 7</b> Hasil pengujian adhesi terhadap <i>thermal cycle</i> .....	64

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), industri kimia dan beberapa industri lain banyak menggunakan ketel uap (*boiler*) sebagai salah satu alat penghasil uap dengan temperatur tinggi. Pada dasarnya boiler adalah alat yang berfungsi untuk memanaskan air dengan menggunakan panas dari hasil pembakaran bahan bakar, panas hasil pembakaran selanjutnya panas hasil pembakaran dialirkan ke air sehingga menghasilkan steam (uap air yang memiliki temperatur tinggi). Dari pengertian tersebut berarti kita dapat menyimpulkan bahwa boiler berfungsi untuk memproduksi steam (uap) yang dapat digunakan untuk proses/kebutuhan selanjutnya. *Boiler* modern terbagi menjadi dua tipe yaitu, *fire tube boiler* dan *water tube boiler*. Seperti pada alat industri lainnya pada *water tube boiler* memiliki beberapa bagian komponen seperti *superheater* dan *reheater*. Material yang digunakan untuk *superheater tube* dan *reheater tube* adalah *stainless steel 304*. Dalam beberapa pengaplikasiannya material pada *superheater tube* ini mengalami beberapa kegagalan seperti korosi temperatur tinggi, erosi, terlalu panas (*overheating*), dan mengalami kelelahan (Malik dan Al-Fozan, 2013).

Pada *superheater tube* erosi atau abrasi merupakan hal yang lazim terjadi khususnya untuk *tube boiler*. Pembangkit listrik tenaga uap yang menggunakan bahan baku pembakaran batubara menghasilkan sekitar 20% debu (*ash*) dalam *boiler* yang terdeposit pada dinding *boiler*, *economizer*, dan *superheater tube*. Debu yang terdeposit ini merupakan *slag* dan *clinkers* yang berasal dari proses pembakaran seperti  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dan  $\text{V}_2\text{O}_5$  (Kumar dan Kanwar, 2012). Akibat permasalahan tersebut perlu adanya solusi untuk mencegah erosi/abrasi pada yaitu dengan pelapisan menggunakan material dengan tingkat keausan lebih tinggi. *Nickel chrome tungsten carbide iron* (TAF 97 MXC wire) merupakan bahan pelapisan yang sesuai untuk permasalahan ini karena selain tahan pada

---



temperatur operasi tinggi juga memiliki tingkat ketahanan abrasi yang lebih baik karena memiliki paduan unsur *tungsten*. Pelapisan (*coating*) adalah proses penambahan atau penumpukan material pada permukaan material lain dengan tujuan untuk melindungi permukaan dari lingkungan yang mungkin menyebabkan korosi atau deterioratif (merusak). Dalam penelitian ini teknik pelapisan yang digunakan adalah *thermal arc spray*. *Arc spray* termasuk dalam *thermal spraying* yang merupakan salah satu teknik rekayasa permukaan, yaitu dengan mendepositkan partikulat dalam bentuk cair, semi-cair, atau padat ke substrat atau sekelompok proses dimana material pelapis (*feedstock material*) dipanaskan dan didorong sebagai partikel individu atau *droplets* ke suatu permukaan (*base material/substrat*) (Pawlowski, 2008).

Untuk mengetahui bagaimana hasil pelapisan NiCrWCFE pada material *superheater tube* yaitu, *stainless steel 304* maka pada penelitian ini mensimulasikan dengan suatu metode proses *thermal cycle* yang sesuai dengan kondisi operasional *water tube boiler*. *Thermal cycle* merupakan salah satu metode untuk mensimulasikan hasil ketahanan lapisan yang telah diberikan terutama terhadap ketahanan abrasi dan daya lekat dari lapisan. Penelitian ini dilakukan untuk membandingkan dan menganalisa pengaruh simulasi yang dilakukan dengan metode *thermal cycle* terhadap ketahanan *abrasive* dan *adhesive* dari *stainless steel* tipe 304 yang telah diberi lapisan paduan *nickel chrome tungsten carbide iron* dengan metode pelapisan *thermal arc spray*.

## 1.2 Perumusan Masalah

Dengan uraian pada latar belakang, maka didapatkan permasalahan yang dicari, yaitu :

1. Bagaimana pengaruh *thermal cycle* terhadap struktur mikro pada hasil *coating SS 304* dengan NiCrWCFE dengan metode *thermal arc spray*?
2. Bagaimana pengaruh *thermal cycle* terhadap sifat mekanik pada hasil *coating SS 304* dengan NiCrWCFE dengan metode *thermal arc spray*?

---

## BAB I PENDAHULUAN



---

### 1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian dan pembahasan menjadi terarah dan memberikan kejelasan analisis permasalahan, maka dilakukan pembatasan permasalahan sebagai berikut :

1. Pengaruh lingkungan sekitar diabaikan
2. Jarak *nozzle* pada proses *thermal spray* dianggap sama
3. Sudut *nozzle* pada proses *thermal spray* dianggap sama
4. *Feed Pressure* dianggap konstan
5. Spesimen uji dianggap homogen atau tanpa cacat

### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Menganalisa pengaruh *thermal cycle* terhadap struktur mikro pada hasil *coating SS 304* dengan NiCrWCFe dengan metode *thermal arc spray*.
2. Menganalisa pengaruh *thermal cycle* terhadap sifat mekanik pada hasil *coating SS 304* dengan NiCrWCFe dengan metode *thermal arc spray*.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Hasil yang diperoleh dalam penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Dapat dijadikan referensi dalam pengendalian abrasif menggunakan *coating metal* pada *superheater tube boiler*.
2. Dapat dijadikan referensi proses *thermal cycling* hasil dari *metal coating* pada *boiler*.
3. Hasil penelitian dapat dijadikan informasi yang saling melengkapi dan komprehensif dengan hasil penelitian-penelitian sebelumnya terkait *metal coating*.



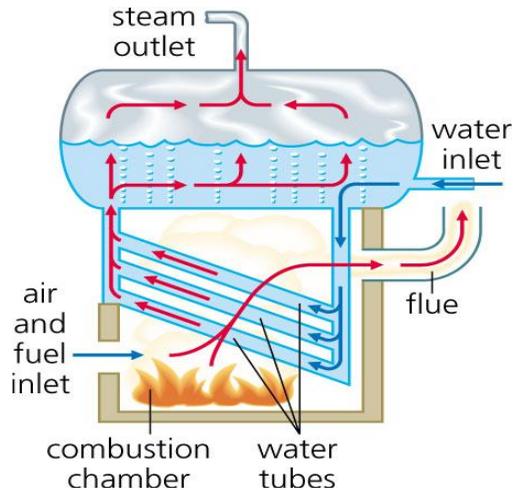
*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



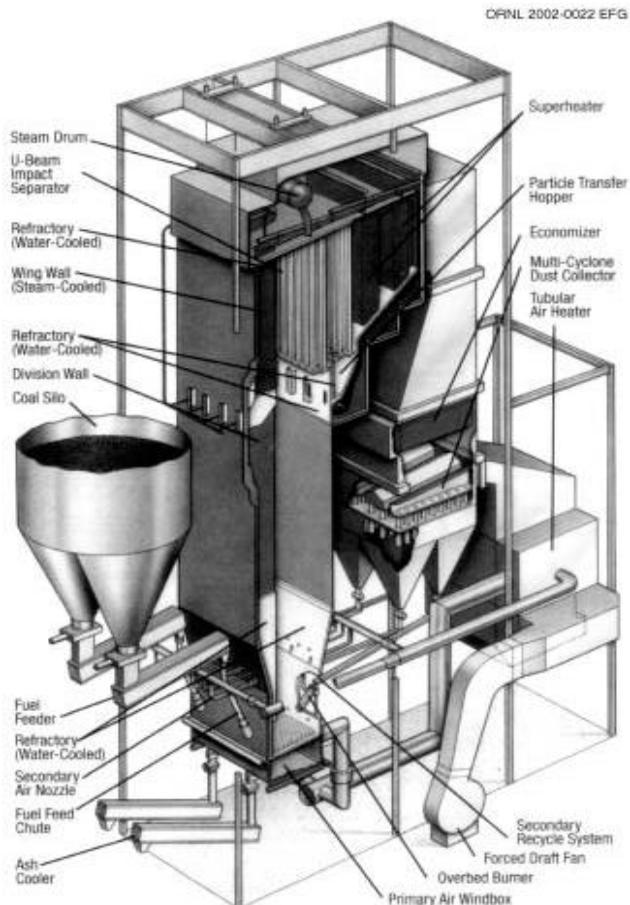
## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Boiler

Dalam *boiler* modern, terdapat dua tipe *boiler* yang dibedakan oleh perpindahan panas yang mengalir dari gas ke air pada *boiler* yaitu, *fire tube boiler* dan *water tube boiler*. Dalam *fire tube boiler* gas buang dari *furnace* terkonduksi ke saluran bagian, yang terbagi menjadi beberapa koneksi paralel *tube*. *Tube* terpasang melewati *boiler vessel*, dimana terdapat bagian *feed water*. *Tube* kemudian dipenuhi oleh air. Panas yang berasal dari gas disalurkan dari *tube* ke air yang ada dalam *container*, kemudian air tersebut dipanaskan untuk menjadi uap seperti pada Gambar 2.1. Untuk mempermudah menghafalkan konsep dapat dikatakan dalam *fire tube boiler* terdapat “api di dalam boiler”.



**Gambar 2.1** Gambaran sederhana pada sistem *fire tube boiler*  
(Teir, 2002)



**Gambar 2.2** *Watertube boiler* dengan bahan bakar *coal* (Elie Tawil, 1998)

*Tube* pada *boiler* modern dimana tempat sirkulasi air terjadi, telah di las bersama dan membentuk dinding tungku. Oleh karena itu *water tube* secara langsung terkena radiasi dan gas hasil

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



pembakaran (Gambar 2.2). Sama seperti *fire tube boiler*, *water tube boiler* dapat dikatakan adanya “air di dalam *tube*”. Komponen *boiler* modern selalu menggunakan *water tube boiler*, karena pada *fire tube boiler* kapasitasnya terbatas dan hanya sesuai dengan sistem kecil (Teir, 2002).

## 2.2 Baja Tahan Karat (*Stainless Steel*)

Baja tahan karat memiliki resistansi tinggi terhadap korosi pada berbagai macam lingkungan. Elemen paduan utama adalah kromium dengan konsentrasi minimal 11% Cr. Ketahanan korosi juga dapat ditingkatkan dengan tambahan nikel dan *molybdenum*. *Stainless steel* dibagi menjadi tiga kelas dengan dasar fase yang dominan dari mikrostrukturnya, seperti martensitik, feritik, dan austenitik. Tabel 2.1 menampilkan daftar beberapa *stainless steel* digolongkan oleh kelas, komposisi, sifat mekanik, dan aplikasinya. Jangkauan luas sifat mekanik digabung dengan ketahanan korosi yang baik membuat *stainless steel* sangat serba guna dalam pengaplikasiannya.

Martensitik *stainless steel* dapat menerima perlakuan panas sedemikian rupa maka dari itu martensit merupakan *microconstituent* yang handal. Penambahan elemen paduan dengan konsentrasi yang signifikan dapat menyebabkan perubahan dramatis dalam fase besi-besi karbida. Untuk baja tahan karat austenitik, fase austenit ( $\gamma$ ) cukup luas untuk ke temperatur kamar. Feritik *stainless steel* tersusun atas  $\alpha$ -ferit (BCC).

Austenitik dan feritik *stainless steel* dikeraskan dan dikuatkan dengan *cold work* karena kedua material tersebut tidak cocok untuk diberi perlakuan panas. Austenitik *stainless steel* merupakan yang paling tahan terhadap korosi karena komposisi kromium yang tinggi dan juga terdapat penambahan nikel. Martensitik dan feritik *stainless steel* memiliki sifat magnetik sedangkan pada austenitik tidak.

---

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



**Tabel 2.1** Data dan contoh *stainless steel* feritik, austenitik, dan martensitik. (Callister, 2007)

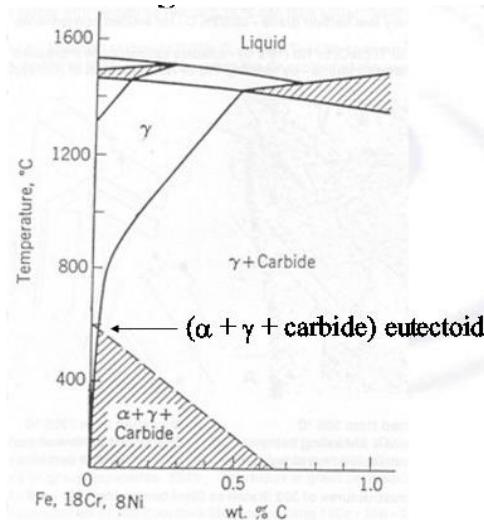
AISI Number	UNS Number	Composition (wt%) <sup>a</sup>	Condition <sup>b</sup>	Mechanical Properties			Typical Applications
				Tensile Strength [MPa (ksi)]	Yield Strength [MPa (ksi)]	Ductility [%EL in 50 mm (2 in.)]	
409 Ferritic	S40900	0.08 C, 11.0 Cr, 1.0 Mn, 0.50 Ni, 0.75 Ti	Annealed	380 (55)	205 (30)	20	Automotive exhaust components, tanks for agricultural sprays
304 Austenitic	S30400	0.08 C, 19 Cr, 9 Ni, 2.0 Mn	Annealed	515 (75)	205 (30)	40	Chemical and food processing equipment, cryogenic vessels
410 Martensitic	S41000	0.15 C, 12.5 Cr, 1.0 Mn	Annealed Q & T	485 (70) 825 (120)	275 (40) 620 (90)	20 12	Rifle barrels, cutlery, jet engine parts
17-7PH Precipitation Hardenable	S17700	0.09 C, 17 Cr, 7 Ni, 1.0 Al, 1.0 Mn	Precipitation hardened	1450 (210)	1310 (190)	1-6	Springs, knives, pressure vessels

Baja tahan karat austenitik adalah baja tahan karat paduan krom-nikel (tipe 3xx) dan krom-nikel-mangan (tipe 2xx). Berjenis austenitik, pada dasarnya bersifat non-magnetik dalam kondisi anil, dan tidak dikeraskan dengan perlakuan panas. Kandungan nikel dan krom nya lebih dari 23%. Baja tahan karat austenitik ini tidak bisa dengan mudah dilakukan *hot-worked* dan dapat dilakukan *cold-worked* dengan pengerjaan yang cepat. *Cold-working* dapat meningkatkan kekuatan mekanik dan baja tahan karat ini akan menjadi sedikit magnetic dibandingkan sebelumnya. Baja tahan karat ini sangat tahan terhadap goncangan (*shock*) dan sulit untuk dilakukan permesinan karena adanya unsur paduan sulfur dan selenium (pada tipe 303 dan 303s). Sifat baja paduan ini memiliki kekuatan pada temperatur tinggi dan tahan terhadap *scaling*. Ketahanan korosinya dari baja tahan karat austenitik ini

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



biasanya lebih baik jika dibandingkan dengan baja tahan karat feritik ataupun martensitik. Gambar 2.3 memperlihatkan penampang diagram fasa pada 18%Cr, 8%Ni. Dari diagram fasenya terlihat bahwa daerah austenit mencapai temperatur kamar, sehingga pada karbon rendah, dalam keadaan *annealed*, strukturnya terdiri dari austenit, karenanya walaupun dilakukan *quenching* tidak akan terjadi transformasi, jadi tidak dapat dikeraskan.



**Gambar 2.3** Diagram fasa baja 18%Cr, 8%Ni

Beberapa *stainless steel* sering digunakan pada temperatur tinggi dan di lingkungan yang ekstrim karena melawan oksidasi dan menjaga sifat mekaniknya dalam kondisi seperti itu; batas temperatur atas di atmosfer pengoksidasi 1000°C. Komponen yang menggunakan material ini adalah turbin gas, high temperatur *steam boiler*, *aircraft*, dan pembangkit nuklir. *Ultrahigh-strength stainless steel* (17-7PH) yang luar biasa kekuatan dan ketahanan

---

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



korosinya. Penguatan dilakukan dengan perlakuan panas pengerasan-presipitasi (Callister, 2007).

### 2.3 Pelapisan (*Coating*)

Pelapisan (*coating*) adalah proses penambahan atau penumpukan suatu material ke suatu permukaan material lain (atau material yang sama). Pada umumnya pelapisan diterapkan ke suatu permukaan dengan tujuan untuk:

1. Melindungi permukaan dan lingkungan yang mungkin menyebabkan korosi atau deterioratif (merusak).
2. Untuk meningkatkan penampilan permukaan.
3. Untuk memperbaiki permukaan atau bentuk suatu komponen tertentu dan lain-lain (Pawlowski, 2008).

Sistem pelapisan digunakan untuk melindungi material dari serangan korosi secara ekstensif. Pemilihan jenis material dan metode *coating* harus memperhatikan beberapa faktor. Material *coating* yang ideal digunakan untuk melapisi adalah sebagai berikut :

1. Logam pelapis harus lebih tahan pada lingkungan dibanding dengan logam yang dilindungi.
2. Logam pelapis tidak boleh memicu korosi setelah melapisi logam yang dilindungi.
3. Sifat mekanik dan fisik seperti kekuatan, ketahanan abrasi, ketahanan korosi, dan sifat termal harus memenuhi kondisi operasi komponen yang bersangkutan.
4. Metode pelapisan harus sesuai dengan metode fabrikasi komponen
5. Tebal pelapisan harus homogen dan tidak mengandung pori

Pelapisan terdiri dari beberapa metode pelapisan dan pemilihan metode pelapisan didasarkan pada bentuk, ukuran, kemampuan adaptasi material terhadap metode yang digunakan, tingkat adhesi dan ketersediaan alat (Prawara, 2006).

---

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Pelapisan terdiri atas bermacam-macam teknik pelapisan dan pemilihannya didasarkan atas permintaan fungsional (ukuran, bentuk, dan metalurgi substrat), kemampuan adaptasi material pelapis terhadap teknik yang digunakan, tingkat adhesi (perekatan) yang diminta, serta ketersediaan dan harga peralatannya. Teknik-teknik ini dibagi menjadi *metallic* dan *non metallic*. *Metallic coating deposition* dibagi menjadi tiga kategori. Ada tiga teknik dalam *hard facing* yaitu *cladding*, *welding*, dan *thermal spraying*.

*Coating* harus memberikan penghalang secara terus-menerus pada substrat, sebab ketidak sempurnaan *coating* bisa menyebabkan degradasi dan korosi pada substrat (Roberge, 2000).

Tingkat proteksi dari pelapisan tergantung pada sistem keseluruhan dari pelapisan yang terdiri dari jenis pelapisan, substrat logam dan preparasi permukaan. Material *coating* yang ideal digunakan untuk melapisi adalah sebagai berikut :

1. Logam pelapis harus lebih tahan terhadap serangan lingkungan dibanding dengan logam yang dilindungi.
2. Logam pelapis tidak boleh memicu korosi setelah melapisi logam yang dilindungi.
3. Sifat mekanik dan fisik seperti kekuatan, ketahanan abrasi, ketahanan korosi, dan sifat termal harus memenuhi kondisi operasi komponen yang bersangkutan.
4. Metode pelapisan harus sesuai dengan metode fabrikasi komponen
5. Tebal pelapisan harus homogeny dan tidak mengandung pori

#### **2.4 Nickel-Aluminium Bond Coat**

NiAl wire banyak digunakan sebagai material bond coat pada aplikasi coating. Seperti yang dilakukan Lima, 2007 yang menggunakan 95/5 NiAl wire untuk memperbaiki permukaan pada *crankshaft* dengan menggunakan arc spray (Lima, 2007). Kekuatan tensile bond untuk NiAl coating atau untuk NiCr+SiC komposit spray menggunakan SonarcTm dapat mencapai nilai 70 Mpa.

---

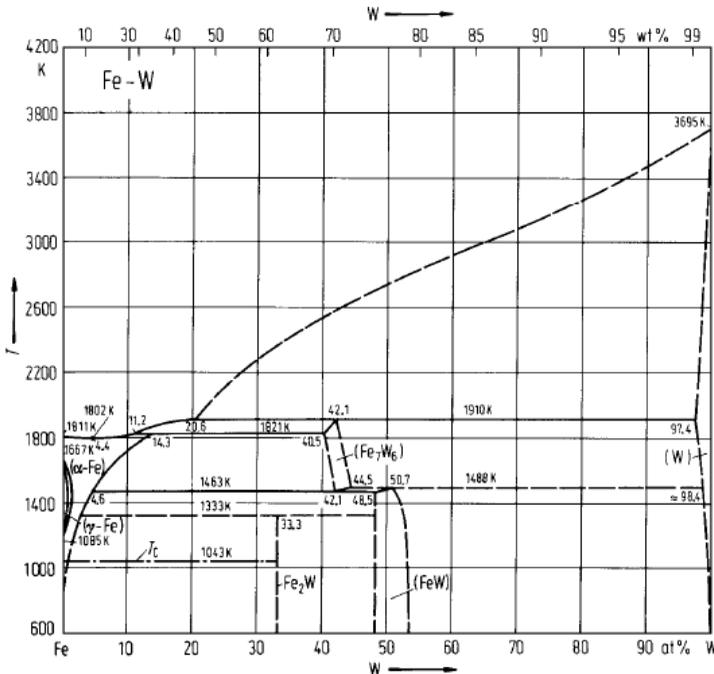
## **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**



Porositasnya berkisar antara 10% sampai 20%. Ketebalan lapisan berkisar antara 100 sampai 2000  $\mu\text{m}$ . (Pawlowski, 2008)

## 2.5 Nickel Chrome Tungsten Carbide Iron Top Coat

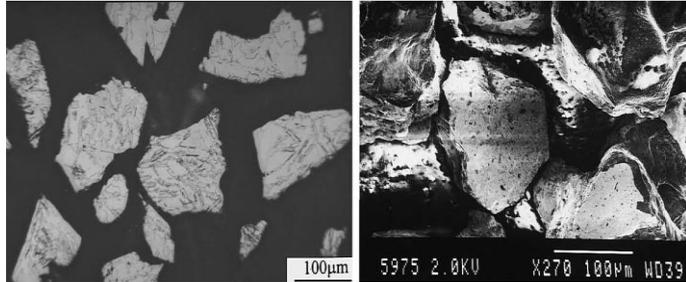
Salah satu material yang menarik perhatian peneliti adalah tungsten carbide. Tungsten carbide merupakan kelompok dari material keramik yang berperan penting dalam industri besar. Terlepas dari kekerasannya, tungsten carbide (WC) memiliki karakteristik unik seperti, titik leleh yang tinggi, ketahanan abrasi tinggi, termal konduktivitas, dan ketahanan terhadap oksidasi baik (Krishna dan Misra, 2002).



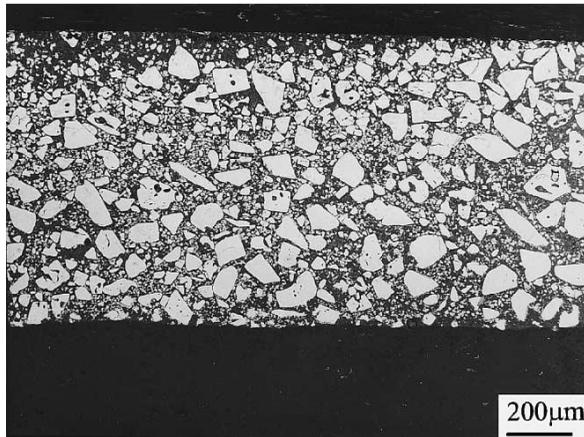
Gambar 2.4 Diagram fasa Fe-W (Henig, 1981)

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Gambar 2.4 menampilkan diagram fasa Fe-W yang dapat terbentuk pada proses untuk *coating* paduan Fe dan W.



(a)



(b)

**Gambar 2.5** (a) *Fused tungsten carbide* dengan metode *thermal plasma* busur. (b) Mikrostruktur pelapisan *WC-based* (Krishna dan Misra, 2002)

Kemungkinan memperoleh lapisan dengan kekerasan yang tinggi, ketahanan abrasif untuk diaplikasikan pada perbaikan permukaan material *iron-based* telah dilakukan dengan memadukan serbuk

---

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



WC (90% wt) dengan serbuk Ni-Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Zn (10% wt), biasanya digunakan untuk perbaikan pada komponen *cast iron*. Pelapis yang cukup padat dengan tingkat adhesi yang baik memiliki retensi WC sekitar 47 %. Partikel homogen WC didistribusikan ke seluruh lapisan permukaan untuk mencapai sifat lapisan yang seragam. Sifat ketahanan abrasi WC-Ni *coating* dieksplorasi lebih lanjut dengan menambahkan TiC dan Mo untuk mendapatkan lapisan WC dengan tambahan nilai kekerasan, ketahanan abrasi, dan ketahanan terhadap korosi. Studi telah dilakukan dengan menggabungkan sifat lapisan WC-Ni yang didepositkan pada permukaan stainless steel. Observasi mendapatkan perbedaan nilai kekerasan, porositas, ukuran butir WC dan Ni sebagai pengikat (Sacks, 2016).

Penelitian lain yang telah dilakukan juga mendeskripsikan fase transformasi dari WC-Fe saat berlangsung proses *thermal spraying (oxy-acetylene spray system)*. Dalam penelitian pada thermal plasma metode yang dipakai adalah metode busur, dimana menawarkan teknik yang unik untuk mempersiapkan penyatuan *tungsten carbide* (Krishna dan Misra, 2002).

## 2.6 Thermal Spray

*Thermal spray* merupakan salah satu teknik rekayasa permukaan, yaitu dengan mendepositkan partikulat dalam bentuk cair, semi-cair, atau padat ke substrat atau sekelompok proses dimana material pelapis (*feedstock material*) dipanaskan dan didorong sebagai partikel individu atau *droplets* ke suatu permukaan (*base material/substrat*) (Pawlowski, 2008). *Thermally sprayed coatings* memberikan permukaan yang fungsional untuk melindungi atau memodifikasi perilaku substrat yang ingin diberikan proteksi (Dorfman, 2005).

*Thermal spray* mengurangi ketahanan abrasi dan korosi sehingga memperpanjang umur perawatan dari sebuah *part* dengan menggunakan material *coating* dengan performa tinggi diatas material substrat tingkat rendah.. Lebih dari 200 material *coating*

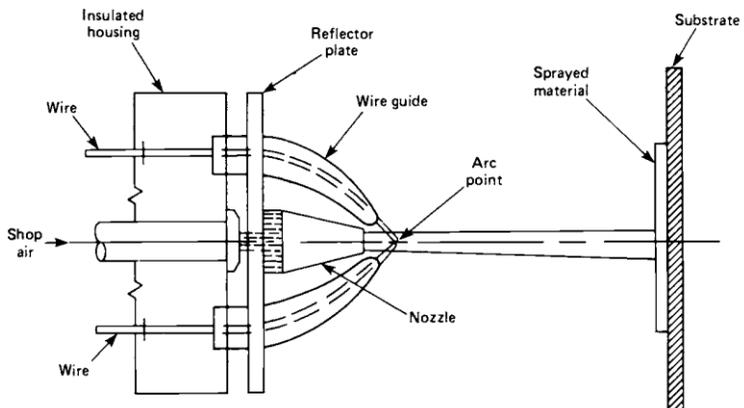
---

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

dengan perbedaan karakteristik ketangguhan, koefisien gesek, kekerasan, dan berbagai karakteristik lainnya. Material coating dapat diklasifikasikan seperti *pure metals*, *metal alloys*, *cermets* (*Ceramic metals*), *ceramics*, *carbide*, *polymers*, *special composite materials*. Secara umum *thermal spray* dibedakan menjadi lima metode, yaitu:

- *Oxyfuel wire (OFW) spray*
- *Electric arc wire (EAW) spray*
- *Oxyfuel powder (OFP) spray*
- *Plasma arc (PA) powder spray*
- *High-velocity oxyfuel (HVOF) powder spray*

*Electric arc wire spraying* juga merupakan aplikasi pelapisan dengan lapisan metal dalam bentuk *wire*. Motor *push-pull* berisi dua buah *charged wire* melalui bagian ujung. Busur tercipta oleh kawat (*wire*) metal pada temperatur 5500°C. Kompresi udara mengatomisasi molten metal dan memproyeksikan ke permukaan yang telah disiapkan.



**Gambar2.6** Skematik yang dihasilkan oleh dua kawat bermuatan listrik meleleh di *nozzle* dari pistol semprot EAW (Tucker, 1994)



*Proses electric wire spray* sangat baik untuk aplikasi yang membutuhkan lapisan *coating* yang berat atau yang memiliki permukaan lebar. Sistem busur dapat menghasilkan pola *spray* antara 50 sampai 300mm (2 sampai 20 in) dan dapat di *spray* dengan kecepatan tinggi. Metode EAW ditandai dengan adhesi lapisan kuat karena temperatur partikel tinggi yang dihasilkan. Karena proses hanya menggunakan listrik dan kompresi udara, memungkinkan peralatan untuk dipindahkan relatif mudah dari satu instalasi ke yang lain, dan menghilangkan kebutuhan untuk oksigen dan pasokan bahan bakar gas (ASM Handbook, 1992).

Ada beberapa metode yang berbeda untuk penyemprotan, tetapi semua didasarkan pada prinsip yang sama. Bahan *coating*, kawat atau bubuk, dimasukkan ke dalam pistol penyemprotan, dipanaskan hingga mencapai kondisi cair atau semi cair dan dilontarkan oleh gas atau udara ke arah komponen yang ingin dilindungi. Logam menempel pada komponen seperti percikan dan kemudian mendingin. Mekanisme ikatan yang terbentuk biasanya terjadi secara mekanik, dan dalam beberapa kasus ikatan terjadi secara metalurgi. Setiap lapisan menempel dengan lapisan sebelumnya, menyusun struktur lamelar, yang sayangnya biasa terjadi dengan beberapa inklusi, oksida dan pori-pori. Proses yang digunakan pada spesimen TSA, adalah *arc spraying process*. Dua kabel logam bertemu di aliran gas yang telah teratomisasi dan adanya perbedaan potensial listrik menyebabkan kawat teratomisasi atau mencair dan akhirnya menempel pada substrat. Kekuatan adhesinya bisa mencapai 6.000-8.000 psi dan mengandung porositas 3 - 8% (Siegmund, 1997).

Keuntungan *thermally sprayed coatings* adalah bahwa metode ini mudah untuk diterapkan, murah untuk dioperasikan, dan untuk beberapa metode, misalnya *arc wire process*, peralatan dapat praktis dan penyemprotan dapat dilakukan di situs. Umur *thermally sprayed aluminium* juga lebih unggul jika dibandingkan dengan pelapis organik, dengan umur hidup diperkirakan lebih dari 30 tahun di zona percikan (*splash zone*) dengan ketebalan TSA

---

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



*coating* 200 mikron yang diterapkan sesuai dengan standar saat ini (Fischer, 1995). *Electric arc spray* juga menawarkan kelebihan jika dibandingkan dengan *flame spray*, yaitu kekuatan ikatan yang tinggi (Tucker 1994).

## 2.7 Abrasi

Dua buah atau lebih benda yang mengalami kontak dan bergerak relatif satu sama lain akan menimbulkan gaya gesek. Bentuk dan arah gesekan yang ditimbulkan tergantung bagaimana profil, dimensi dan arah gerak dari masing-masing benda. Adanya gesekan akan menyebabkan terjadinya kerusakan berupa hilangnya material dari permukaan benda, yang dinamakan keausan/abrasi. Abrasi yang lebih besar akan terjadi pada benda yang kekerasannya lebih rendah. Berbagai faktor yang mempengaruhi abrasi adalah kecepatan gerak, besarnya beban, profil permukaan serta kekerasan (*hardness*) dari material itu sendiri. Gesekan antar permukaan juga akan menimbulkan panas yang juga mempengaruhi abrasi, karena dalam kajian material disebutkan bahwa kekerasan material akan berkurang seiring meningkatnya temperatur (Hasry dan Kaelani, 2014).

## 2.8 Thermal Cycle

Pengaruh dari siklus termal (*thermal cycling*) pada sebuah material tidak boleh diremehkan karena sangat penting dalam desain dan teknik manufakturnya. Ketika material diberi perlakuan dengan gradien temperatur cenderung meluas berbeda-beda selama tegangan termal diinduksi. Sumber panas yang menyebabkan adanya gradien termal dapat disebabkan oleh adanya gesekan seperti dalam kasus rem. Proses *thermal cycling* yang melibatkan pemanasan dan pendinginan dari sebuah material hingga mengalami re-organisasi molekular yang mengencangkan atau mengoptimalkan struktur partikulat dari keseluruhan material, menghilangkan tegangan dan membuat lebih padat dan seragam



sehingga meminimalkan kekurangan atau ketidaksempurnaan (Agbadua dan Mgbemena, 2011).

## 2.9 Difusi

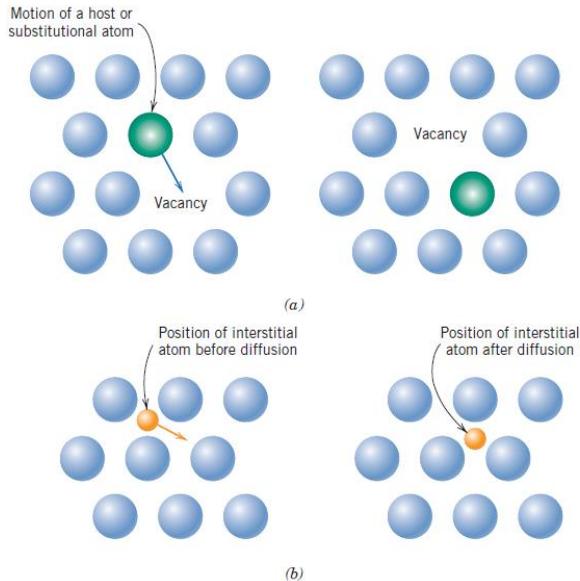
Banyak reaksi dan proses yang sangat penting dalam perlakuan suatu material seperti pada transfer massa dalam kepadatan yang spesifik (umumnya pada tingkat mikroskopik) atau dari likuid, gas, atau fasa solid lainnya. Hal ini perlu diperhatikan dengan difusi, sebuah fenomena transport material dengan gerak atomik. Secara prespektif atomik, difusi adalah migrasi sebuah atom dari kisi ke kisi lainnya. Pada kenyataannya atom pada benda padat/solid dalam keadaan konstan, dan secara cepat berubah posisi. Pada sebuah atom untuk membuat suatu gerakan terdapat dua kondisi yang memungkinkan pergerakan terjadi : (1) harus terdapat daerah kosong yang bersebelahan dan (2) atom harus memiliki energi yang cukup untuk memutuskan ikatan dengan atom sampingnya dan hal ini menyebabkan distorsi kisi saat proses pergeseran.

Pada temperatur tertentu beberapa fraksi dengan jumlah kecil dari total nomor atom dapat memungkinkan gerak difusi, oleh besarnya energi getaran. Jumlah fraksi ini meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur. Beberapa model dari gerak atomik telah ditemukan sebelumnya, untuk difusi metalik terdapat dua kemungkinan model difusi.

### 2.9.1 Difusi Vakansi

Suatu mekanisme dimana melibatkan perubahan sebuah atom dari posisi kisi normal ke kisi yang bersebelahan dimana terdapat daerah kekosongan pada kisi seperti yang ditampilkan pada gambar 2.7 (a). Mekanisme ini yang dimaksud dengan difusi vakansi. Tentunya proses difusi ini sangat memerlukan vakansi/kekosongan dan daerah dimana difusi vakansi dapat terjadi sebagai fungsi dari nilai cacat (defect) yang diterima. Konsentrasi

yang signifikan dari vakansi dapat terjadi pada logam dalam kondisi temperatur tertentu. Difusi atom dan perubahan vakansi atau daerah kekosongan, difusi atom pada satu arah berkaitan dengan pergerakan dari vakansi dengan arah sebaliknya. Baik self-diffusion dan interdiffusion terjadi dengan mekanisme ini.



**Gambar 2.7** Contoh skema mekanisme difusi (a) difusi vakansi  
(b) difusi interstiti (Callister, 2007)

### 2.9.2 Difusi Interstiti

Model kedua dari difusi adalah keterlibatan atom dalam migrasi dari posisi interstitial ke daerah sebelahnya yang masih kosong. Mekanisme ini ditemukan pada untuk interdiffusion dari impuritas atau pengotor seperti hidrogen, carbon, nitrogen, dan

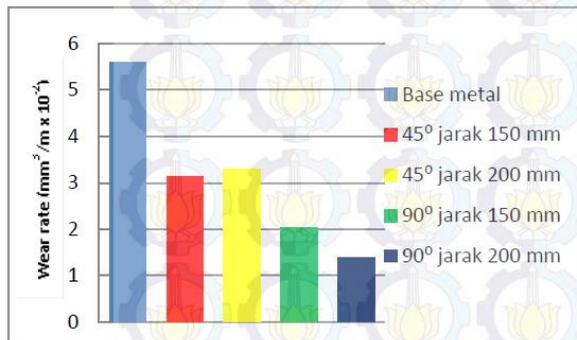


oksigen, dimana memiliki yang ukuran atom kecil untuk cukup menyusup pada bagian interstisi. Seperti yang ditampilkan pada gambar 2.7 (b), fenomena ini yang dinamakan dengan difusi interstisi.

Pada kebanyakan paduan logam, difusi interstisi terjadi lebih cepat dibandingkan dengan model difusi vakansi, sejak atom interstisi lebih kecil dan lebih mudah mengalami pergerakan. Terlebih dari itu, lebih banyak posisi kekosongan interstisi daripada vakansi. Oleh karena itu kemungkinan pergerakan atom interstisi lebih besar daripada difusi vakansi (Callister, 2007).

## 2.10 Penelitian Sebelumnya

Setiawan, Sugiono (2013) meneliti tentang “Pengaruh Variasi Sudut *Nozzle* dan Jarak *Nozzle* pada *Arc Spray Coating* Terhadap Ketahanan Abrasif Lapisan 13% *Chrome Steel*”. Penelitian ini memakai substrat material hardox 400 dengan lapisan *coating* 13% *stainless steel* dari penelitian ini didapatkan bahwa adanya pengaruh sudut dan jarak *nozzle* pada nilai kekerasan dan ketahanan abrasif pada lapisan *coating* dengan menggunakan metode *arc-spray*.



**Gambar 2.8** Kurva komparasi nilai *wear rate* (Setiawan dan Setiyorini, 2012)



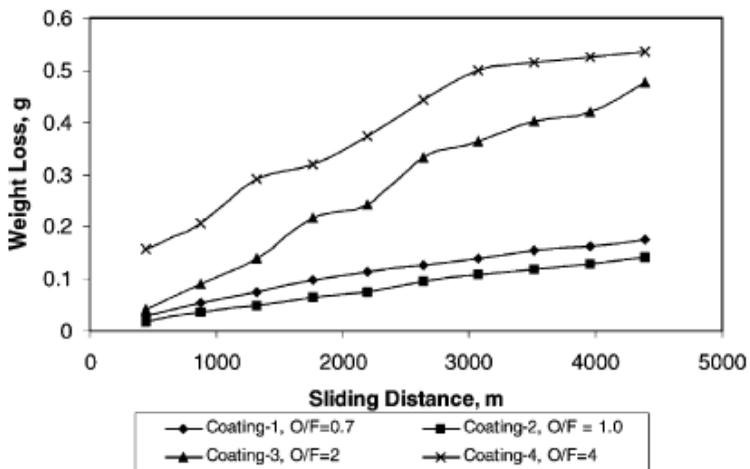
Berdasarkan hasil penelitian Sugiono diperoleh bahwa jarak *nozzle* 200mm dan sudut *spray* 90° memiliki nilai *wear rate* paling kecil yaitu sebesar  $1,39 \text{ mm}^3/\text{m} \times 10^{-2}$  dan nilai kekerasan paling tinggi yaitu sebesar 88,312 HR15T. (Setiawan dan Setiyorini, 2012)

Krishna, B. Vamsi (2002) meneliti tentang “Microstructure and properties of flame sprayed tungsten carbide coatings” yang menunjukkan bahwa hasil coating dengan fused tungsten carbide memiliki ketahanan abrasif tinggi dengan teknik *spray coating*. Menurut hasil penelitian Vamsi khususnya pada pelapisan 2 (*coating-2*) dengan komposisi *coating* 70WC dan 30Fe berupa wire dengan oxygen/fuel ratio 1 memiliki abrasive wear paling baik dibanding beberapa fuel ratio lainnya.

**Tabel 2.2** Parameter *spray* dan komposisi *powder* (Krishna dan Misra, 2002)

Powder type	Powder mixture	Oxygen/fuel ratio	Type of powder feeding	Coating/sprayed in water/ sprayed in container
Monocrystalline WC	-	0.7	WC filled in mild steel rod (70 WC : 30 Fe)	Coating-1
	-	1.0		Coating-2
	-	2.0		Coating-3
	-	4.0		Coating-4
	-	1.0		Coating-5
Fused WC(WC + W2C)	-	1.0	WC filled in mild steel rod (fused WC + W2C) : 30 Fe)	
Monocrystalline WC	WC	1.0	Powder fed through the orifice into the flame	Sprayed in the water (WQ) Sprayed in the container (WA)
	70WC+30Fe	1.0	Powder fed through the orifice into the flame	Coating-6 Sprayed in the water (WFQ) Sprayed in the container (WFA)
Fused WC ( WC + W2C)	Fused WC (WC+W2C)	1.0	Powder fed through the orifice into the flame	Sprayed in the water (RRQ) Sprayed in the container (RRA)
	Fused WC (WC+W2C) + 30 Fe	1.0	Powder fed through the orifice into the flame	Coating-7 Sprayed in the water (RRFQ) Sprayed in the container (RRFA)

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



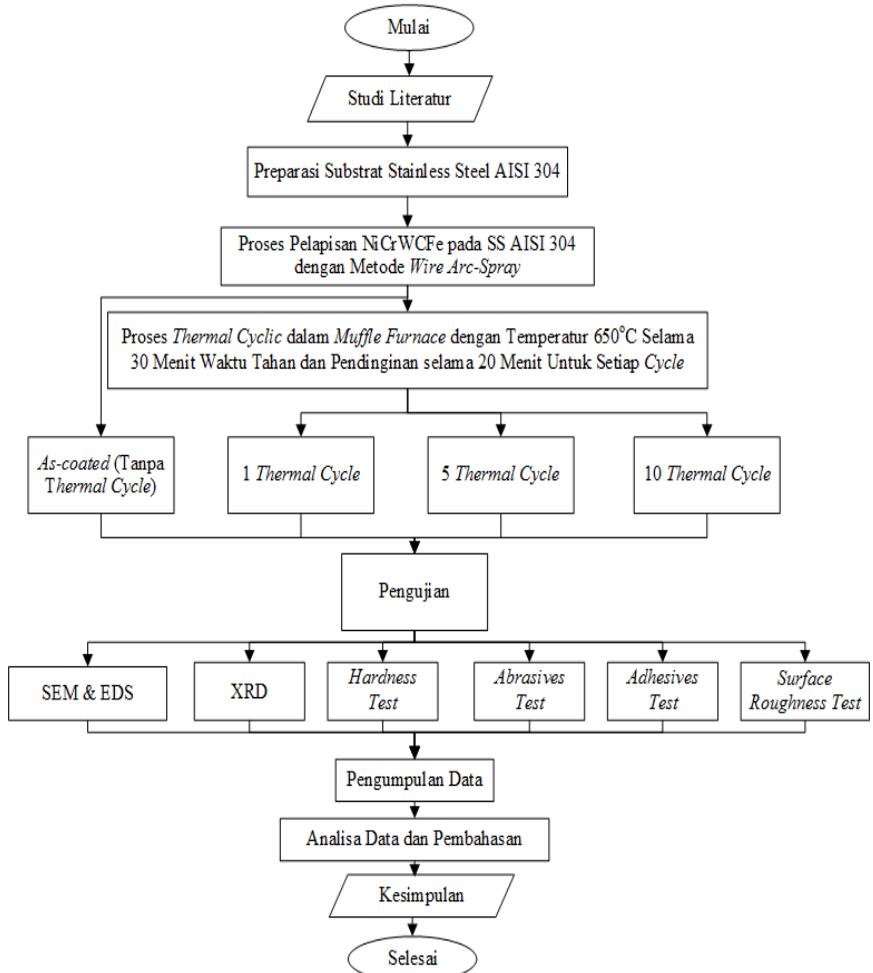
**Gambar 2.9** Grafik *abrasive wear* hasil *coating* (Krishna dan Misra, 2002)

Kumar, Naresh. & Kanwar, Rupinder. (2012) peneliti dengan judul penelitian "To Study Erosion Behavior of  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  Coating on SS-304 Boiler Steel Tubes in Simulated Coal Fired Boiler Conditions" mensimulasikan hasil lapisan  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  pada material *stainless steel* AISI 304 sebagai salah satu material dari *boiler tube* yang mengalami erosi. Eksperimen dilakukan dengan metode *test rig* dengan perhitungan berat yang hilang setelah dilakukan tes selama 3 jam. Hasil penelitian menunjukkan hasil bahwa *stainless steel* tanpa *coating* memiliki laju erosi yang lebih besar dibandingkan dengan yang diberi *coating* dan laju erosi rendah pada sudut *impact*  $90^\circ$ .



## BAB III METODE PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian



### 3.2 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

#### 3.2.1 *Stainless steel* AISI 304

Sebagai base metal yang akan di proteksi, komposisi dari material ini adalah sebagai berikut :

**Tabel 3.1** Komposisi kimia *stainless steel* AISI 304  
(ASTM A 213 n.d.)

<b>Komponen</b>	<b>Kadar (wt%)</b>
Carbon	0.08
Ferrous	<i>Balance</i>
Chromium	19
Nickel	9
Manganese	2
Phosphor	0.04
Silicon	0.75
Sulfur	0.03

#### 3.2.2 NiAl (*wire 75 B*) - *Bond Coat*

*Bond coat* berupa wire NiAl dengan komposisi sebagai berikut :

**Tabel 3.2** Komposisi kimia NiAl wire 75 B

<b>Komponen</b>	<b>Kadar (wt%)</b>
Nickel	95
Aluminum	5

#### 3.2.3 TAFE 97 MXC (NiCrWCFe) – *Top Coat*

*Top coat* berupa *wire* dengan komposisi sebagai berikut :



**Tabel 3.3** Komposisi kimia TAFE 97 MXC wire - top coat

<b>Komponen</b>	<b>Kadar (wt%)</b>
Ferrous	<i>Balance</i>
Chromium	14
Nickel	4.5
Manganese	0.55
Titanium Carbide	6
Silicon	1.5
Tungsten Carbide	26



**Gambar 3.2** TAFE 97 MXC(NiCrWCFe) wire

**Tabel 3.4** Propertis Fisik Wire 95 MXC (TAFE Safety Data Sheet, 2015)

<b>Properties</b>	<b>Nilai</b>
<i>Wire Size (mm)</i>	1,6
<i>Melting Point (°C)</i>	1204
<i>Bond Strength (MPa)</i>	39,82
<i>Microhardness (HRC)</i>	55
<i>Coating Density (gr/cm<sup>3</sup>)</i>	6,7
<i>Finish – ground</i>	<i>Excellent</i>

### **BAB III METODE PENELITIAN**



### 3.3 Alat Penelitian

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

#### 3.3.1 Gerinda potong

Spesimen uji dipotong dengan gerinda sesuai dengan bentuk sampel untuk masing-masing pengujian.

#### 3.3.2 Alat Wire Arc Spray

Digunakan untuk meleburkan NiCrWC *wire* dan menyemburkannya ke substrat *stainless steel* AISI 304.



**Gambar 3. 3** Alat Wire Arc Spray



### 3.3.3 Alat Uji Kekasaran Permukaan (*Surface Roughness Tester*)

Alat ini digunakan untuk mengetahui nilai kekasaran permukaan material sampel yang telah *dicoating*. Hasil kekasaran yang diperoleh pada pengujian ini dalam satuan  $\mu\text{m}$  (*micro meter*).



Gambar 3. 4 *Surface Roughness Tester*

### 3.3.4 Alat *Sandblast*

Dalam penelitian ini peralatan *abrasive grit blasting* yang digunakan adalah jenis mesin *automatic* dengan merk dagang NORBLAST by Norexco dengan tipe NOB35CE. Adapun spesifikasi peralatan dapat dilihat pada Tabel 3.5.



**Tabel 3.5** Spesifikasi Peralatan *Abrasive Grit Blasting*  
Tipe NOB35CE (NORBLAST by Norex Specification  
Datasheet, 2015)

<b>Spesifikasi</b>	<b>Keterangan</b>
<i>Capacity</i>	35 Liters
<i>Pipe Work</i>	½"
<i>Grit Blasting house dia</i>	13 mm
<i>Remote control handle</i>	<i>Pneumatic</i>
<i>Hose length</i>	10 m
<i>Connector Nozzle</i>	½" threaded
<i>Filter</i>	<i>Vortex Air Conditionig</i>
<i>Hose Nozzle (As Required)</i>	3/8" (9 mm)
<i>Pressure (for steel)</i>	7 Bar
<i>Required air for nozzle 3/8</i>	5 m <sup>3</sup> min/200 cfm
<i>Required Abrasive</i>	478 kg/hour
<i>Required H.P</i>	39



**Gambar 3.5** Alat Sandblast



### 3.3.5 Alat Uji Pull-Off

Alat ini digunakan untuk menguji daya lekat antara material *coating* dengan permukaan substrat. Alat ini bernama *PosiTest AT-M Adhesion Tester*.



**Gambar 3. 6** Alat Uji *Pull-Off*

### 3.3.6 Alat Uji Laju Abrasi

Digunakan untuk penentuan nilai laju abrasi sampel dengan hasil pengukuran presentase berat yang hilang setelah material di abrasikan.



**Gambar 3. 7** Alat uji abrasi



### 3.3.7 Alat SEM

Morfologi mikrostruktur permukaan yang telah dilapisi material *coating* dianalisa dengan alat SEM.



Gambar 3. 8 Scanning Electron Microscope

### 3.3.8 Alat Pengujian Kekerasan (*Micro Vickers Hardness*)

Nilai kekerasan spesimen pada permukaan hasil *coating* dan setelah *thermal cycle* diukur dengan alat *micro hardness digital*.



Gambar 3.9 Mesin uji kekerasan *micro vickers*



### 3.3.9 Pengujian XRD

Senyawa yang terdapat pada material yang telah dilapisi coating diidentifikasi dengan alat XRD PAN *analytical*.



**Gambar 3.10** Mesin XRD PAN *analytical*

### 3.3.10 Muffle Furnace

*Muffle furnace* digunakan dalam proses *thermal cycle*. Dimensi *muffle furnace* yang digunakan adalah sebagai berikut :

Panjang : 48 cm

Lebar : 85 cm

Tinggi : 64 cm

Tebal batu tahan api : 7 cm

Temperatur simulasi *thermal cycle* diatur pada furnace disesuaikan dengan kondisi operasional coal-fired boiler pada 650°C.



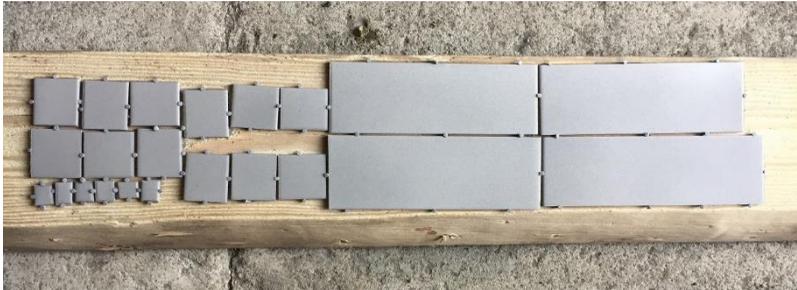
**Gambar 3.11** *Muffle Furnace*

### **3.4 Metode Penelitian**

Guna mendapatkan hasil yang diharapkan maka dalam penelitian ini dilakukan tahap-tahap percobaan sebagai berikut

#### **3.4.1 Preparasi Sampel *Stainless Steel* AISI 304**

Preparasi sampel diawali dengan sampel dipotong dengan dimensi 150mm x 50mm x 3mm, ukuran 10mm x 10mm, dan ukuran 30mm x 30mm masing-masing sebanyak 4 buah sampel. Setelah sampel dipotong menjadi 12 bagian. Selanjutnya material dibersihkan dan dikasarkan dengan metode *sandblasting* hingga mencapai standar SA 3 dengan tipe *abrasive* materialnya berupa *volcano sand*. Tujuan dilakukannya *sand blasting* adalah untuk membentuk profil permukaan substrat menjadi kasar, agar material *coating* dapat menempel secara mekanik pada substrat. Persiapan permukaan *sand blasting* ini dilakukan berdasarkan standar ISO 8501-1. Proses *sand blasting* dilakukan dengan tekanan 7 bar dan jarak *nozzle* 100mm.



**Gambar 3.12** Hasil *sand blasting* sampel

### 3.4.2 Proses Pelapisan

Pada proses pelapisan, digunakan parameter *feedstock material*, tekanan gas, jarak *nozzle*, sudut *nozzle*, arus listrik, dan voltase sebagai berikut:

1. *Feedstock material*: NiCrWCFe (97MXC)
2. Tekanan gas : 4 bar
3. Jarak *nozzle* : 200 mm
4. Sudut *nozzle* : 90°
5. Arus listrik : 145 Ampere
6. Voltase : 26,7 Volts

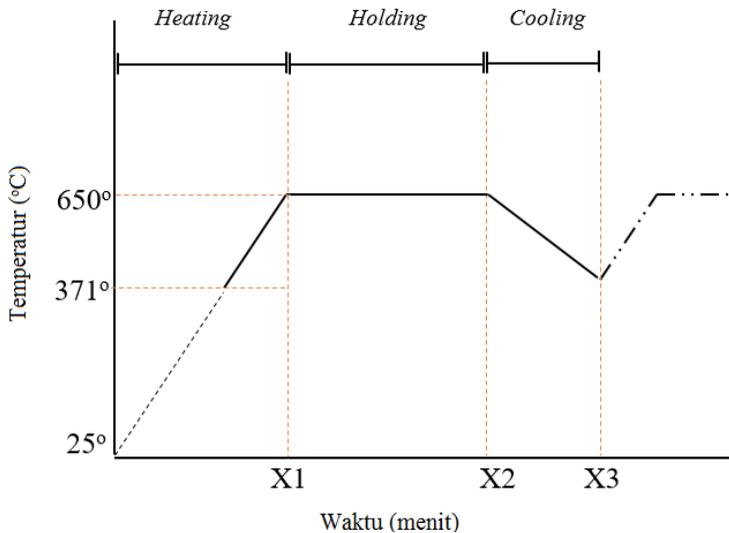
Proses *wire arc spray*, langkah awal yang dilakukan yaitu NiCrWCFe *wire* pertama dialiri oleh arus positif, sedangkan NiCrWCFe *wire* kedua dialiri oleh arus negatif, yang kemudian kedua *wire* dipertemukan di dalam *spray gun* yang menimbulkan percikan dan melelehkan NiCrWCFe. Setelah itu, lelehan NiCrWCFe diekspos dengan gas bertekanan yang mengakibatkan percikan (*splats*) NiCrWCFe terlempar dari *spray gun* dan terdeposisi di permukaan substrat baja. Setelah proses pelapisan dengan NiCrWCFe selesai, selanjutnya spesimen diberi simulasi dengan siklus termal (*thermal cycle*).



**Gambar 3.13** Proses *thermal arc spray*

### 3.4.3 Proses *Thermal Cycle*

Proses *thermal cycle* ini adalah simulasi yang dilakukan pada kondisi operasional *boiler* dalam lingkup yang lebih sederhana. Substrat yang telah dilapisi oleh material coating dari TAF 97 MXC dipanaskan dari temperatur kamar hingga temperatur 650°C lalu dilakukan *holding* selama 30 menit di dalam *muffle furnace*. Kemudian didinginkan selama 20 menit, pendinginan dilakukan dengan kondisi sampel diluar *furnace* (pendinginan udara). Proses ini dihitung satu kali proses *cycle*. Pada saat pendinginan temperatur *furnace* mencapai 371°C setelah dirata-rata untuk selang waktu 20 menit pendinginan. Selanjutnya proses ini diulangi untuk beberapa kali sesuai dengan variable *thermal cycle* yang ditentukan. Gambar 3.15 menampilkan gambaran sederhana berupa grafik untuk satu kali proses *cycle*.



**Gambar 3.14** Kurva *thermal cycle*

Keterangan :  $X2 - X1 = 30$  menit

$X3 - X2 = 20$  menit

### 3.5 Pengujian

#### 3.5.1 Morfologi dan Komposisi Hasil *Coating*

Analisis morfologi bagian permukaan hasil coating dan bagian penampang melintang di investigasi menggunakan *Scanning Electron Microscope*. Sedangkan komposisi hasil coating diamati menggunakan EDS. Morfologi lapisan coating dianalisis dengan uji SEM dan komposisi unsur pada permukaan coating dianalisis dengan uji EDS. Penelitian ini menggunakan alat SEM FEI S50. Langkah-langkah yang dilakukan dalam *fractography* menggunakan SEM adalah sebagai berikut :

1. Spesimen yang telah dipotong dibersihkan dengan hati-hati untuk menghilangkan debu dan pengotor ringan lainnya.



2. Spesimen diletakkan diatas holder yang sebelumnya telah dilekatkan dengan *carbon tape*. *Carbon tape* berfungsi untuk melekatkan *holder* dengan sampel
3. Spesimen yang telah berisi *holder* dimasukkan kedalam mesin SEM dan siap dilakukan proses pengamatan. Pada layar komputer akan tampak permukaan spesimen dengan berbagai perbesaran yang bisa diatur sesuai keinginan

### 3.5.2 Pengamatan Senyawa dan Unsur

Karakterisasi difraksi Sinar-X (XRD) dilakukan menggunakan alat *Pan Analytical XRD* dilakukan di Laboratorium Karakterisasi Teknik Material dan Metalurgi. Karakterisasi ini dilakukan untuk melihat struktur kristal dan fase-fase yang terbentuk. Tujuan dilakukannya pengujian analisis struktur kristal adalah untuk mengetahui perubahan fase struktur bahan dan mengetahui fase-fase apa saja yang terbentuk selama proses pembuatan sampel uji.

Tahap pertama yang dilakukan dalam analisa sinar-X adalah melakukan analisa pemeriksaan terhadap sampel yang belum diketahui strukturnya. Sampel ditempatkan pada titik fokus hamburan sinar-X yaitu tepat di tengah-tengah *plate* yang digunakan sebagai wadah yaitu sebuah plat tipis yang berlubang di tengah berukuran sesuai dengan sampel (pelet) dengan perekat pada sisi baliknya.

Spesimen yang telah dilapisi hasil dari simulasi *thermal cycle*, kemudian dianalisa menggunakan XRD dengan mesin *PAN analytcal* seperti yang terlihat pada Gambar 3.12. Data dan grafik hasil pengujian XRD selanjutnya dicocokkan dengan *JCPDS (Joint Committee of Powder Diffraction Standard)* untuk mengetahui struktur kristal yang sesuai.

### 3.5.3 Surface Roughness Test

Kekasaran permukaan *coating* diukur dengan menggunakan alat uji kekasaran. Sebelum digunakan alat terlebih dahulu di kalibrasi. Struktur permukaan yang dianalisa sejauh 4



mm dan dikeluarkan dalam bentuk grafik. Nilai kekasaran yang digunakan pada alat ini adalah Ra, yaitu nilai rata-rata dari setiap puncak yang terdeteksi dalam satuan  $\mu\text{m}$ .

### 3.5.4 Kekuatan Adhesi *Coating*

Pengujian *Pull Off Bonding* ini bertujuan untuk menganalisis kekuatan adhesi antara *coating* dengan substrat. *Pull-off Bonding* ini dilakukan dengan menggunakan alat *PosiTest AT-M Adhesion Tester* dengan standar ASTM D-4541. Permukaan dolly dikasarkannya dahulu dengan *abrasive grit blasting* kemudian di tempelkan pada permukaan hasil *coating* dengan lem *araldite*. Setelah 1x24 jam dolly ditarik (*pull off*) dengan alat *PosiTest AT-M Adhesion Tester*. Alat yang digunakan dalam penelitian ini menghasilkan nilai kekuatan lekat dengan satuan MPa.

### 3.5.5 Ketahanan Abrasi

Nilai ketahanan abrasi pada material *coating* dapat diketahui dengan dilakukannya uji abrasi. Material *coating* diletakkan pada dudukan dengan pembebanan 250 gram dan kemudian digosokkan pada amplas *belt*  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (kertas abrasif) yang berputar dengan kecepatan 200 meter/menit pada mesin. Waktu pada pengujian ini diseragamkan yaitu 5 menit untuk semua variabel sampel. Satuan dari laju abrasif atau laju aus ini adalah  $\text{g/cm}^2$ . Laju ketahanan abrasi dihitung dengan metode perhitungan berat yang hilang kemudian dibagi dengan luas permukaan yang terabrasi pada sampel. Luas permukaan yang tergerus dihitung dengan menggunakan *software imagej* dengan skala  $\text{cm}^2$ .

### 3.5.6 Kekerasan *Micro Vickers*

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui distribusi nilai kekerasan pada spesimen dengan metode mikro vickers. Berikut prosedur penggunaan mesin kekerasan:

1. Meletakkan sampel (material) pada meja alat.
2. Mikroskop difokuskan melalui pengatur kasar.



3. Mencari area (fasa) yang akan di indentasi.
4. Area peninjauan pada sampel ditentukan dengan memutar spindel mikrometer.
5. Memberi beban sebesar 500 gf terhadap permukaan sampel selama 30 detik.
6. Mengukur diameter jejak arah horisontal (d1) dan diameter jejak arah vertikal (d2).
7. Nilai kekerasan secara otomatis muncul pada layar monitor.

### 3.6 Rancangan Penelitian

**Tabel 3.6** Rancangan Pengujian Spesimen

Variabel (Cycle)	Spesimen	SEM	DFT	XRD	Abrasive Test	Pull Off Test	Hardness Test
<i>Coating tanpa cycle</i>	X	√	√	√	√	√	√
	X	-	√	-	-	√	√
	X	-	√	-	-	√	√
1	A	√	√	√	√	√	√
	A	-	√	-	-	√	√
	A	-	√	-	-	√	√
5	B	√	√	√	√	√	√
	B	-	√	-	-	√	√
	B	-	√	-	-	√	√
10	C	√	√	√	√	√	√
	C	-	√	-	-	√	√
	C	-	√	-	-	√	√

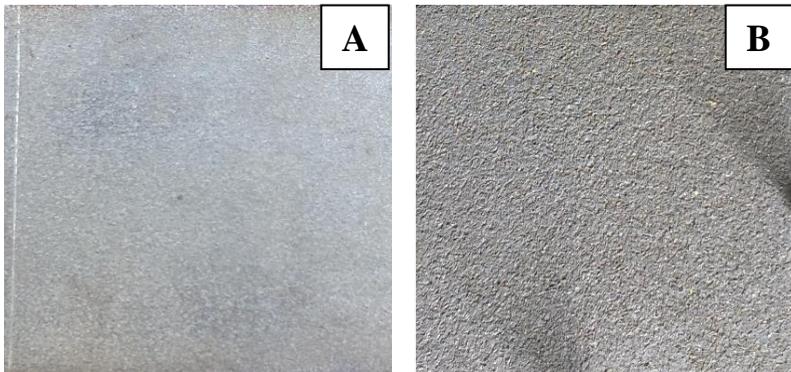


## BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Analisis Pengujian Makrografi

#### 4.1.1 Hasil *Grit Blasting*

Pada standar aplikasi *thermal arc spray coating* substrat atau sampel yang akan dilapisi harus dilakukan proses *abrasive grit blasting* untuk mendapatkan kebersihan permukaan dari pengotor seperti cat, karat serta meningkatkan kekasaran permukaan dengan menggunakan *volcano sand* 16 mesh.



**Gambar 4. 1** Permukaan substrat (a) Sebelum (b) Sesudah *abrasive sand blasting*

Gambar 4.1 menampilkan struktur permukaan substrat *stainless steel* 304 sebelum dan setelah proses *abrasive grit blasting*, secara makrografi tekstur permukaan terlihat lebih kasar jika dibandingkan dengan sebelum di *blasting*, kekasaran inilah yang diharapkan pada proses *blasting*. Hasil pengujian kekasaran permukaan dilakukan pada permukaan material substrat SS 304 sebelum proses *abrassive grit blasting* adalah 3,44  $\mu\text{m}$ , sedangkan setelah dilakukan proses *abrasive grit blasting* adalah 76  $\mu\text{m}$ . Semakin kasar permukaan mengakibatkan ikatan *mechanical*

---

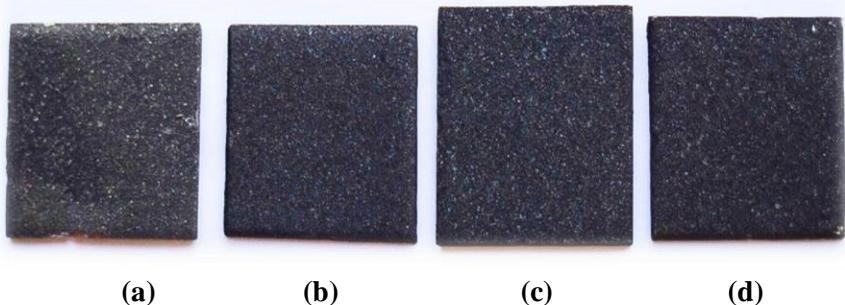


*interlocking* yang terbentuk semakin meningkat (Pawlowski, 2008).

#### 4.1.2 Hasil Proses *Thermal Arc Spray* dan *Thermal Cycle*

Proses pelapisan *stainless steel* metode *thermal arc spray* dilakukan dengan bahan pelapis paduan NiCrWCFE sebagai *top coat* dan NiAl sebagai *bond coat*. Pada *top coat* dilakukan pelapisan sebanyak lima *layer* untuk setiap sampel. Berdasarkan pengamatan visual pada Gambar 4.2 (a) terlihat struktur permukaan secara makrografi, tampak lapisan *coating* yang homogen tersebar di atas permukaan *stainless steel* 304 (substrat).

Setelah dilakukan proses *thermal cycle* terlihat secara visual terdapat perubahan warna. Sampel yang tidak diberikan *thermal cycle* berwarna abu-abu terang dan setelah dilakukan *thermal cycle* berubah menjadi sedikit gelap. Sehingga terlihat semakin besar jumlah *thermal cycle* warna permukaan semakin gelap. Perubahan warna secara makrografi mengindikasikan adanya transisi fasa yang akan dibuktikan pada pengujian XRD. Perlakuan *thermal cycle* yang di berikan tidak menimbulkan pengelupasan lapisan *coating* hingga pada *cycle* ke-10, sehingga lapisan *coating* terdepositkan dengan baik dengan semakin banyaknya jumlah *thermal cycle*.



**Gambar 4. 2** Pengamatan visual (a) tanpa *thermal cycle* (b) 1x *thermal cycle* (c) 5x *thermal cycle* (d) 10x *thermal cycle*



---

## 4.2 Analisis Pengujian Mikrografi

### 4.2.1 Hasil Analisis Morfologi Permukaan Lapisan *Coating* (*top view*)

#### A. Hasil SEM Permukaan *Coating*

Untuk mengetahui morfologi lapisan material *coating* baik tanpa maupun dengan perlakuan *thermal cycle* pada bagian permukaan lapisan dilakukan pengamatan dengan alat *Scanning Electron Microscope* (SEM). Pengamatan dilakukan pada bagian atas lapisan *coating* (*top view*) dan pada bagian penampang melintang (*cross-section*). Perbesaran yang dipakai untuk pengamatan sampel adalah 100 kali dan 500 kali. Pada Gambar 4.3 dapat terlihat bagaimana persebaran material *coating* secara mikrografi pada sampel uji.

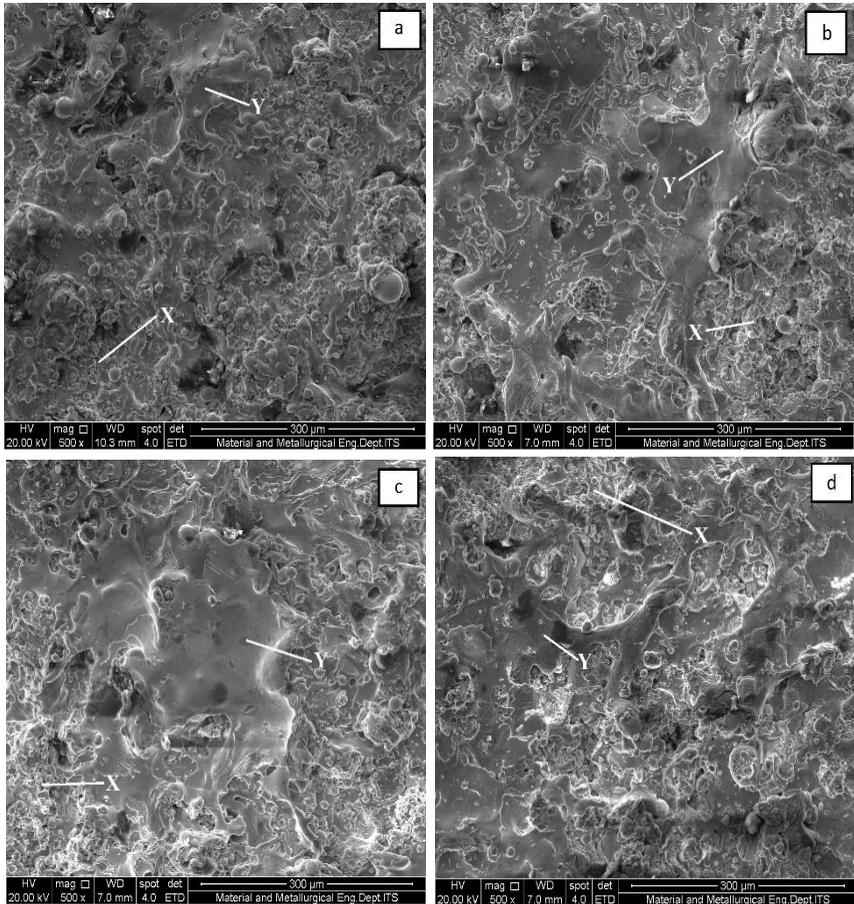
Sampel hasil produk *coating* tanpa perlakuan *thermal cycle* (*as-coated*) ditampilkan pada Gambar 4.3 (a) dengan struktur permukaan yang tampak tidak homogen atau tidak kompak karena proses solidifikasi yang kurang sempurna saat proses *spray*, banyak kumpulan partikel kasar (*coarse grain*) yang tidak teratur. Sedangkan pada Gambar 4.3 (b) yang merupakan produk *coating* dengan perlakuan satu kali *thermal cycle* menunjukkan struktur permukaan yang lebih kompak, partikel kasar berkurang dan mulai tampak area datar (*flattening area*) karena pengaruh *thermal* yang diberikan.

Sampel berikutnya dengan perlakuan lima kali *thermal cycle* ditampilkan pada Gambar 4.3 (c) menunjukkan bahwa bagian datar mulai tersebar merata ke seluruh permukaan, partikel kasar beralih menjadi lebih halus. Gambar 4.3 (d) merupakan sampel dengan perlakuan sepuluh kali *thermal cycle*. Struktur permukaan *coating* dengan sepuluh kali *cycle* ini terlihat bertambahnya partikel kasar yang bergerombol pada perbesaran 500 kali tetapi pada perbesaran 100 kali tampak berkurang bagian pori atau celah jika dibandingkan dengan partikel kasar pada sampel tanpa perlakuan *thermal cycle*.

Area yang lebih datar pada Gambar 4.4 menampilkan hasil yang lebih baik dalam persebaran partikel dari proses *thermal*

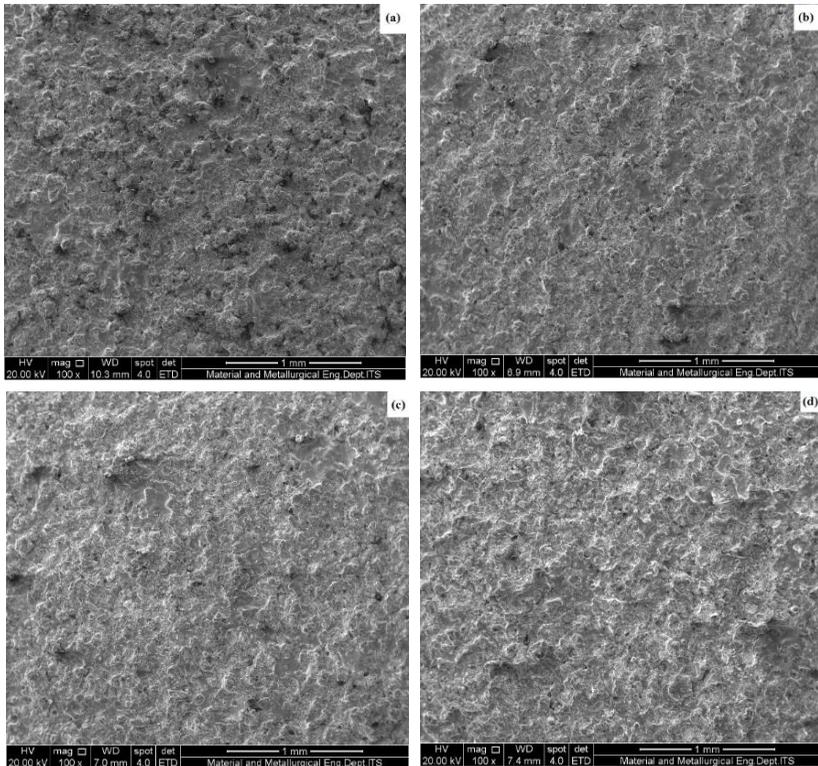


*spray* dan kekuatan adhesi sangat bergantung pada dinamika datarnya partikel yang menimpa substrat.



**Gambar 4. 3** Hasil pengamatan SEM permukaan lapisan *coating* tampak atas perbesaran 500x. (a) tanpa *thermal cycling* (b) 1x *thermal cycling* (c) 5x *thermal cycling* (d) 10x *thermal cycling*  
X = Coarse grain ; Y = Flattening area (melt)

Ketika semburan jet partikel menumbuk permukaan sampel, partikel mungkin mengalami tiga mode : memantul, menyatu (merata), dan tanpa percikan (Zhang, et al. 2015).



**Gambar 4. 4** Hasil SEM dengan perbesaran 100x (a) tanpa *thermal cycle* (b) 1x cycle (c) 5x cycle (d) 10x cycle.

## B. Perhitungan Porositas

Untuk mengetahui presentase porositas pada permukaan lapisan *coating* di analisis dengan menggunakan perhitungan densitas porositas dan *software* imagej. Analisis densitas dan porositas dilakukan untuk mengetahui presentase porositas setelah dilakukan proses *thermal cycle*. Perhitungan densitas porositas



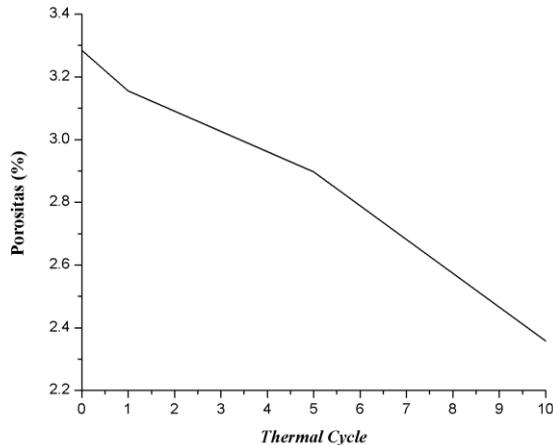
menggunakan prinsip hukum *Archimedes*, dimana dilakukan perbandingan volume saat di udara dan di dalam air kemudian dihitung presentase yang merepresentasikan porositas pada permukaan *coating*.

**Tabel 4. 1** Hasil perhitungan densitas porositas terhadap *thermal cycle*

Variabel	Porositas (%)
As-coated	6,31
1	6,03
5	4,13
10	3,22

Jumlah presentase porositas berdasarkan perhitungan porositas densitas menampilkan bahwa proses perlakuan *thermal cycle* menurunkan nilai porositas pada permukaan lapisan *coating* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.1. Pada sampel *as-coated* diperoleh presentase porositas yang tinggi sebesar 6.309 % jika dibandingkan dengan sampel variabel lainnya. Hasil porositas pada sampel dengan sepuluh kali *thermal cycle* mendapatkan hasil yang rendah jika dibandingkan dengan sampel variabel lainnya, presentase porositas yang diperoleh mencapai 3,215 %.

Jumlah banyaknya porositas yang diperoleh pada *software* imagej dalam bentuk presentase. Pada Tabel 4.2 ditampilkan jumlah porositas pada sampel tanpa *thermal cycle* porositas sebesar 3.285 % dan untuk sampel dengan satu kali *thermal cycle* sebesar 3.155 %. Perhitungan porositas menurun kembali pada sampel dengan lima kali *cycle* yaitu sebesar 2.898 % hingga pada sampel dengan sepuluh kali *cycle* sebesar 2.358 %. Gambar 4.5 menunjukkan bagaimana grafik porositas terhadap jumlah *thermal cycle* yang diberikan, tampak bahwa semakin banyak perlakuan *thermal cycle* yang diberikan maka jumlah porositas semakin rendah. Jika dibandingkan dengan hasil densitas porositas presentase porositas sama-sama menunjukkan penurunan porositas.



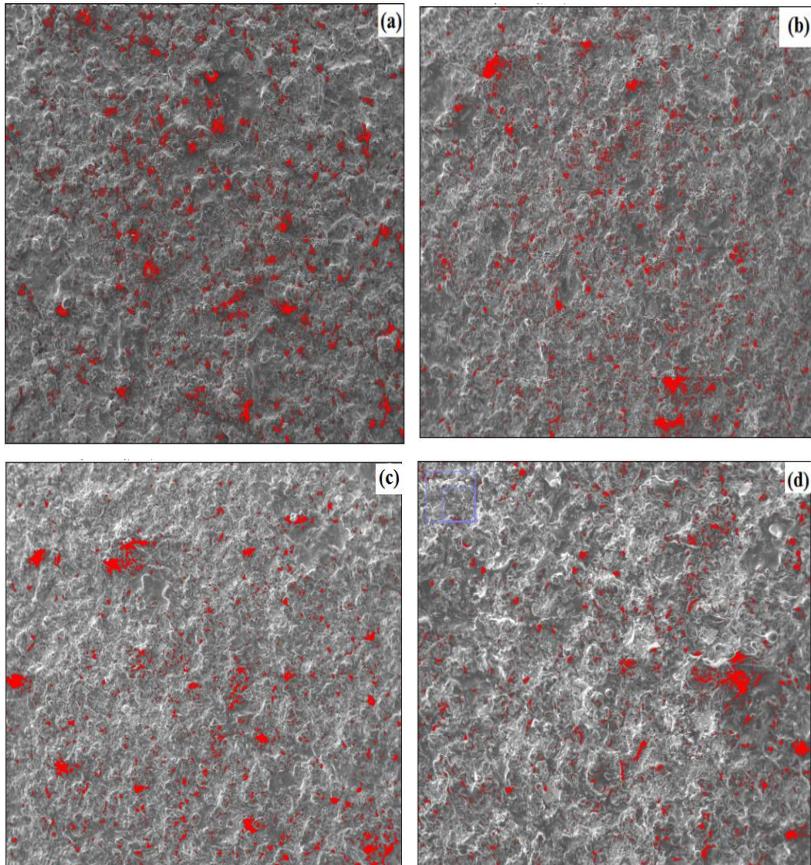
**Gambar 4. 5** Grafik porositas permukaan *coating* terhadap jumlah *thermal cycle* dengan imagej.

Gambar 4.6 menampilkan kenampakan porositas pada permukaan lapisan *coating*. Pada sampel tanpa *thermal cycle* (*as-coated*) memang tampak perubahan pada pencitraan SEM dengan perbesaran 100 kali jika dibandingkan dengan variabel sampel lainnya yang telah diberi perlakuan *thermal cycle*.

**Tabel 4. 2** Hasil perhitungan porositas terhadap *thermal cycle*

Variabel (thermal cycle)	Presentase porositas (%)
0	3,28
1	3,15
5	2,89
10	2,36

Pesebaran porositas yang telah dihitung dengan *software imagej* digambarkan pada Gambar 4.6. Bagian merah yang terdapat pada gambar merepresentasikan porositas yang ada pada permukaan material *coating*.



**Gambar 4. 6** Hasil perhitungan porositas dengan Imagej (a) tanpa *thermal cycle* (b) 1x cycle (c) 5x cycle (d) 10x cycle.

Pada hasil pencitraan SEM spesimen tanpa *thermal cycle* terlihat banyaknya jumlah porositas sedangkan pada spesimen dengan perlakuan *thermal cycle* semakin berkurang dan struktur semakin rigid karena pengaruh pemanasan berulang. Pemanasan dengan temperatur 650°C selama 20 menit pada setiap *cycle* menyebabkan beberapa paduan yang terdapat pada material



*coating* berdifusi. Pada temperatur tertentu akan ada distribusi energi untuk konstituen atom dengan energi rata-rata, dengan selang waktu tertentu energi getaran dari setiap atom akan bervariasi secara acak (Callister 2007). Gerak molekul atom secara acak akan menempati vakansi atau ruang-ruang kosong (porositas) sehingga dengan meningkatnya jumlah proses *thermal cycle* maka porositas semakin berkurang dan stuktur permukaan tampak semakin rigid sehingga simulasi *thermal cycle* meningkatkan hasil pelapisan.

#### **4.2.2 Hasil Analisis Morfologi Penampang Melintang Lapisan *Coating* (*cross-section*)**

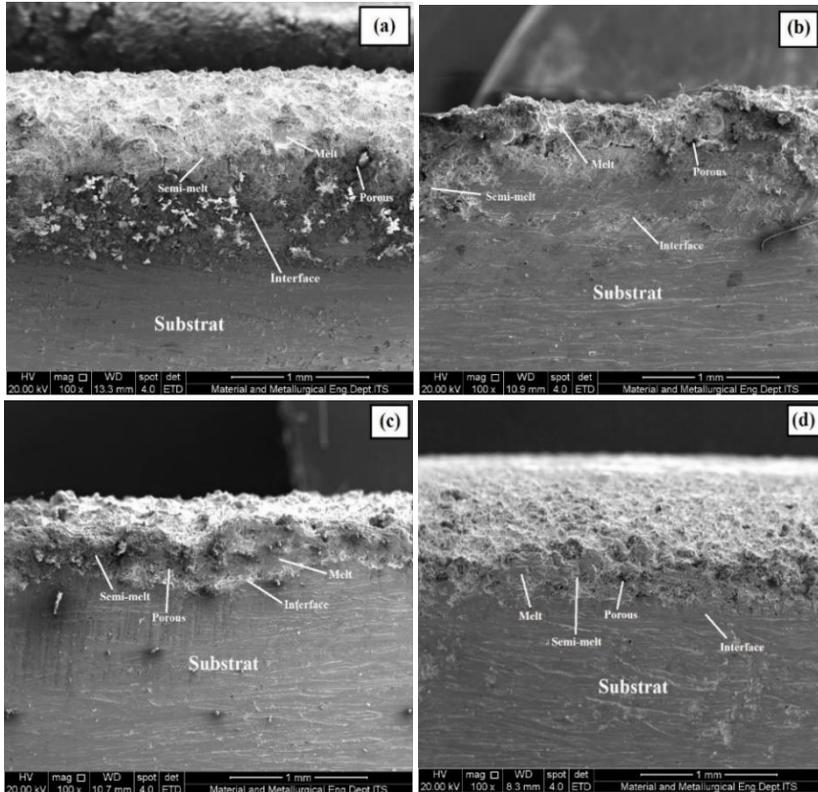
Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) dilakukan untuk mengetahui bagian penampang melintang (*cross-section*) antara lapisan *coating* dengan substrat. Hasil SEM morfologi bagian penampang melintang lapisan *coating* ditunjukkan pada Gambar 4.7 untuk setiap variabel sampel dengan perbesaran 100x. Pada penampang melintang dapat dilihat morfologi bagian interface yaitu batas antara material pelapis dengan material substrat.

Hasil proses *spray* tampak pada Gambar 4.7 (a) dimana terlihat partikel kasar atau bagian *semi-melt* mendominasi jika dibandingkan dengan sampel setelah di *thermal cycle*. Bagian *interface* pada sampel *as-coated* juga tidak terlihat merata, hal ini dipengaruhi oleh material *coating* yang ditembakkan (*spray*) meleleh hingga pada bagian samping substrat saat proses *spraying*. Seperti yang ditampilkan pada gambar 4.7 permukaan melintang hasil dari proses *thermal spray* tersusun atas *layer* yang terbentuk dari partikel *melt*, partikel *semi-melt*, dan partikel *unmelt* (Pawlowski 2008).

Untuk sampel dengan perlakuan *thermal cycle* seperti Gambar 4.7 b,c, dan d terlihat area porositas ada bagian *coating* berkurang khususnya pada area *interface*. Pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2 sebelumnya telah dijelaskan bahwa jumlah porositas semakin



berkurang seiring dengan meningkatnya jumlah perlakuan *thermal cycle* yang diberikan.



**Gambar 4. 7** Hasil uji SEM *cross-section* area perbesaran 100 kali (a) *as-coated* (b) 1-cycle (c) 5-cycle (d) 10-cycle.

Bertambahnya jumlah *cycle* menyebabkan struktur pada bagian *coating* semakin padat seperti Gambar 4.7 terlihat pada bagian interface yang semakin rapat. Adanya proses difusi pada daerah interface antara coating dengan substrat dapat meningkatkan nilai adhesi dari coating (Sundararajan, et al. 2004).



### 4.2.3 Hasil Pengujian SEM dan EDS

Material *coating* yang dilapiskan pada substrat adalah paduan FeNiCrWC sebagai *top coat* dan NiAl sebagai *bond coat* tetapi untuk mengetahui komposisi kimia yang terdapat pada sampel setelah dilakukan proses *coating* dan proses *thermal cycle* maka perlu dilakukan pengujian *Energy Dispersion Spectrometry* (EDS).

**Tabel 4. 3** Data pengujian EDS pada permukaan sampel terhadap *thermal cycle*

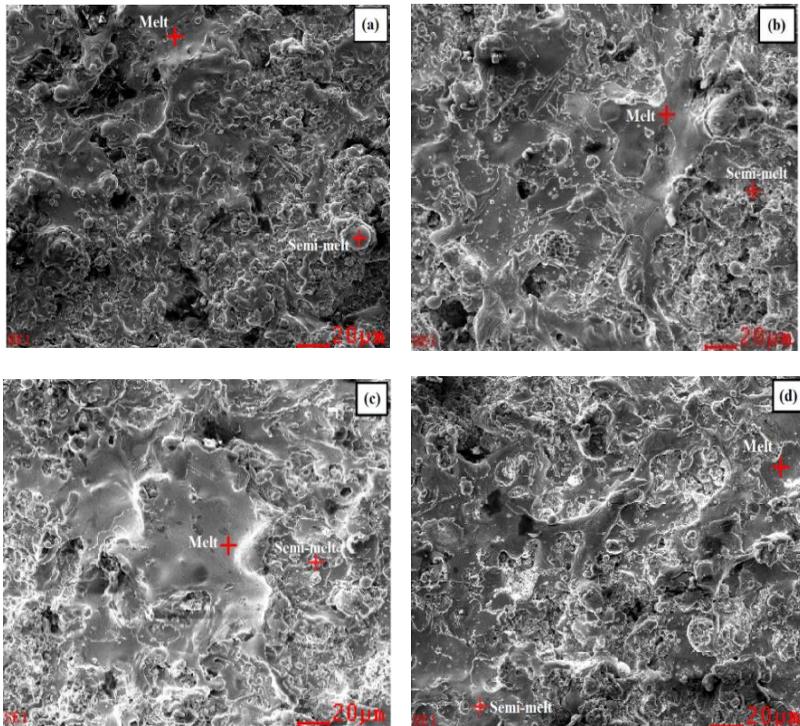
<i>Thermal Cycle</i>	Area	Fe (wt%)	Ni (wt%)	Cr (wt%)	W (wt%)	C (wt%)	O (wt%)	Ti (wt%)
0	Melt	35,99	4,26	9,62	46,64	0,60	0,69	1,87
	Semi-melt	44,3	4,71	11,34	37,51	0,20	0,06	1,72
1	Melt	42,05	5,86	11,71	32,37	0,60	1,95	4,52
	Semi-melt	35,86	3,48	11,21	39,7	1,81	2,91	4,40
5	Melt	27,45	2,27	18,27	43,35	0,69	1,57	5,87
	Semi-melt	55,36	6,89	13,29	18,78	0,60	1,79	1,51
10	Melt	49,5	5,21	21,81	5,09	0,88	10,93	5,33
	Semi-melt	60,55	6,44	12,48	12,49	0,82	3,38	1,72

Tabel 4.3 menampilkan presentase komposisi kimia yang ada pada permukaan lapisan coating saat sebelum *thermal cycle* (*as-coated*) dan setelah beberapa perlakuan *thermal cycle*. Pengujian EDS mengambil dua titik pada permukaan yaitu bagian *melt* (*flattening area*) dan *semi-melt* seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.4. Jika mengacu pada *data sheet* produk material *coating* yaitu TAFE 97 MXC yang ditampilkan pada Tabel 3.3, menunjukkan bahwa komposisi unsur Fe memang dominan yaitu 45,83 % selanjutnya unsur WC sebesar 26%, Cr sebesar 14%, TiC



sebesar 6%, Ni sebesar 4,5 %, dan sisanya unsur lain seperti Mn,Si,B.

Jika dibandingkan dengan hasil EDS pada sampel *as-coated* baik pada area *melt* maupun *semi-melt* terdapat sedikit perbedaan. Perbedaan ini dipengaruhi oleh semburan partikel (*splashed particle*) *coating* saat proses *thermal spray*. Semburan likuid dari *nozzle* dengan tekanan tinggi dapat secara cepat teroksidasi dengan udara disekitar proses *spray* dan menyatu dengan lapisan *coating*. Semburan partikel tidak hanya memurunkan efisiensi deposit pada substrat dan kekuatan lekat tetapi juga menambah porositas dan konten oksida pada lapisan *coating* (Zhang, et al. 2015).



**Gambar 4. 8** Hasil pengujian SEM dan EDS dengan perbesaran 500x (a) tanpa *thermal cycle* (b) 1x cycle (c) 5x cycle (d) 10x cycle.



Pada Gambar 4.8 menampilkan gambar SEM dengan perbesaran 500x pada setiap variabel sampel dan diperlihatkan pengambilan titik untuk pengujian EDS dilakukan pada dua titik yaitu pada bagian *melt* dan *semi-melt* untuk sampel *as-coated*, satu kali *thermal cycle*, lima kali *thermal cycle*, dan sepuluh kali *thermal cycle*. Dari data pada Tabel 4.3 komposisi kimia pada setiap variabel sampel fluktuatif hal ini terjadi karena pengaruh interaksi metalurgi pada lapisan *coating*. Interaksi metalurgi yang terjadi dapat melalui dua mekanisme, yaitu difusi dan reaksi kimia antara lamella (*coating*) dan substrat.

Difusi yang terjadi pada permukaan *coating* dapat terjadi pada temperatur *thermal cycle* yang diberikan, unsur yang memiliki koefisien difusi tinggi akan semakin banyak gerak difusinya dimana koefisien ini dipengaruhi oleh radius atom pada setiap unsur. Pada penelitian ini difusi yang berlangsung disebabkan oleh kekosongan yang dihasilkan dalam konsentrasi tinggi saat solidifikasi cepat lamella setelah proses *spraying* dilakukan dan didukung oleh *thermal* yang diberikan pada disetiap *cycle*. Difusi juga berlangsung oleh kontak temperatur tinggi (Pawlowski 2008) dalam penelitian ini pada terjadi pada saat proses *thermal cycle*.

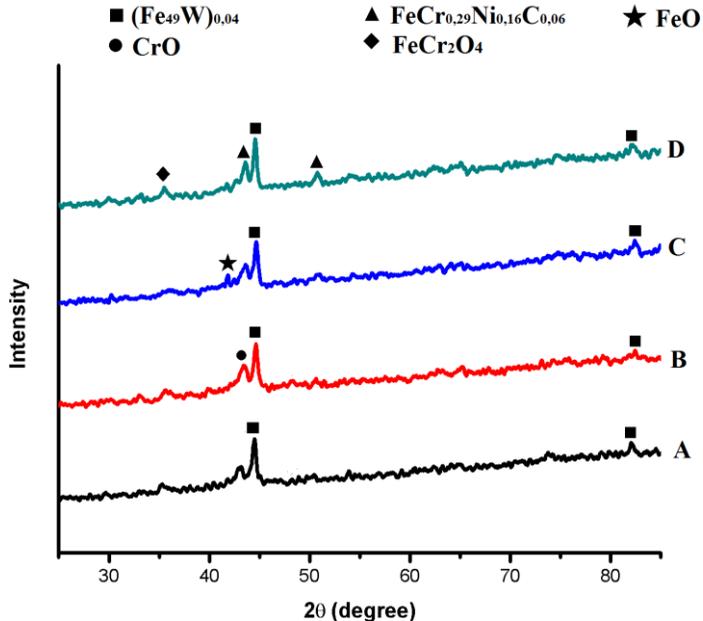
### 4.3 Analisis Hasil XRD

Pengujian senyawa dilakukan untuk mengetahui senyawa pada lapisan permukaan *coating* terutama setelah diberi perlakuan *thermal cycle*. Pengujian ini menggunakan alat XRD (*X-Ray Diffraction*). Seluruh variabel spesimen diujikan baik tanpa *thermal cycle*, satu kali *thermal cycle*, lima kali *thermal cycle*, dan sepuluh kali *thermal cycle*. Hasil dari pengujian ini berupa grafik dengan puncak intensitas dan posisi derajat  $2\theta$ .

Gambar 4.9 menampilkan hasil pola grafik XRD pada sampel *as-coated*, satu kali *thermal cycle*, lima kali *thermal cycle*, dan sepuluh kali *thermal cycle*. Pada plot grafik XRD untuk seluruh sampel tampak tidak terjadi perubahan yang signifikan, tetapi adanya *peak* baru yang terbentuk setelah sampel mengalami



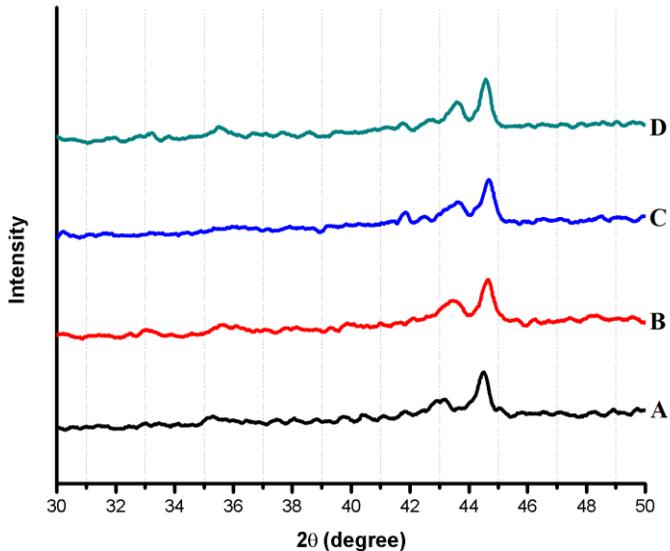
beberapa proses *thermal cycle*. Adanya *peak* yang timbul mengindikasikan bahwa terbentuk senyawa-senyawa baru. Pembentukan senyawa ini didasarkan pada unsur yang memiliki komposisi dominan dalam material *coating* dan pengaruh oksidasi saat proses *thermal cycle* berlangsung juga dapat membentuk senyawa oksida baru.



**Gambar 4. 9** Plot grafik hasil uji XRD material *coating* NiCrWCoFe (A) *as-coated* (B) 1x cycle (C) 5x cycle (D) 10x cycle.

Pada sampel tanpa *thermal cycle* (*as-coated*) menampilkan pola grafik XRD yang mengindikasikan senyawa intermetalik  $(\text{Fe}_{49}\text{W})_{0.04}$  sesuai dengan kartu JCPDS 01-077-8048. Tabel 3.2 menunjukkan bahwa komposisi kimia dari material *coating* adalah berbasis Fe sehingga dapat terbentuk paduan Fe setelah proses *spray*. Selain itu, pada hasil EDS sampel *as-coated* memiliki

konten unsur tungsten sebesar 46,64 % sehingga dapat terbentuk senyawa *iron tungsten* saat proses *spray*. Senyawa intermetalik *tungsten iron* dapat terbentuk saat proses *spraying* dengan temperatur tinggi dan dapat meningkatkan nilai kekerasan. (Krishna dan Misra, 2002).



**Gambar 4. 10** Plot *peak* pertama hasil XRD material *coating* NiCrWCFe (A) *as-coated* (B) 1x *cycle* (C) 5x *cycle* (D) 10x *cycle*.

Peak pertama pada sampel dengan perlakuan satu kali *cycle* memiliki kesamaan senyawa yang terbentuk pada sampel *as-coated*, yaitu senyawa intermetalik *tungsten iron*. Pada puncak kedua mengindikasikan terbentuknya senyawa oksida CrO dengan kartu JCPDS 01-074-6646 seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.10 dimana terjadi pergeseran *peak* kedua jika ditinjau lebih jelas lagi. Ion *chromium* memiliki difusifitas yang lebih tinggi



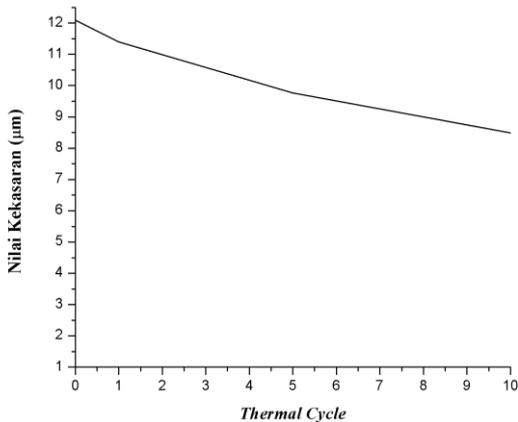
dibandingkan unsur lain pada *iron-based coating*. Saat oksidasi lebih banyak ion *chromium* yang berdifusi ke permukaan lapisan daripada ion Fe dan kemudian bereaksi dengan oksigen. Senyawa *chromium oxide* merupakan hasil oksidasi pada temperatur 650° C (Zhang, et al. 2015) dan jika dilihat pada diagram Ellingham unsur *chromium* adalah unsur yang paling mudah terbentuk senyawa oksida pada rentan temperatur tersebut. Jika melihat pada Tabel 4.3 memang ditunjukkan bahwa konten oksigen meningkat pada sampel dengan perlakuan satu kali *cycle* ini.

Hasil uji XRD pada sampel dengan lima kali *cycle* pada *peak* pertama mengindikasikan terbentuk senyawa *tungsten iron* seperti yang terbentuk pada sampel variabel sebelumnya. Pada puncak ketiga posisi  $2\theta$  sesuai dengan senyawa FeO dengan kartu JCPDS 01-077-7979 seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.10 dimana terlihat adanya *peak* baru pada intensitas ketiga. Senyawa FeO atau *wustite* yang terindikasi pada puncak difraksi disebabkan oleh proses oksidasi dari *thermal cycle* dengan temperature 650°C.

Sampel keempat yaitu dengan perlakuan sepuluh kali *thermal cycle* pada *peak* pertama sama seperti pada sampel lainnya yaitu adanya senyawa intermetalik  $(\text{Fe}_{49}\text{W})_{0,04}$ . Pada puncak kedua dan ketiga pada sampel dengan jumlah *cycle* sepuluh ini mengindikasikan senyawa intermetalik  $\text{FeCr}_{0,29}\text{Ni}_{0,16}\text{C}_{0,06}$  dengan kartu JCPDS 00-033-0397 yang merupakan beberapa unsur dominan dalam material *coating* TAFE 97 MXC menurut Tabel 3.3. Tampak pada Gambar 4.9 (D) timbulnya *peak* baru dengan intensitas rendah, *peak* tersebut merepresentasikan *peak* senyawa intermetalik  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$  dengan kartu JCPDS 01-075-3312.

#### 4.4 Analisis Pengujian Kekasaran

Pengujian kekasaran permukaan ditujukan untuk mengetahui nilai kekasaran permukaan hasil *coating* dan untuk membuktikan hasil pada pengamatan makrografi yang dilakukan sebelumnya. Pengujian ini menggunakan nilai Ra, yaitu nilai rata-rata setiap puncak pada grafik kekasaran permukaan yang diperoleh pada alat dengan satuan mikro meter ( $\mu\text{m}$ ).



**Gambar 4. 11** Grafik uji kekasaran terhadap *thermal cycle*

Gambar 4.11 menunjukkan grafik hasil uji kekasaran permukaan *coating* terhadap jumlah *thermal cycle* yang diberikan dimana nilai kekasaran pada struktur permukaan hasil *coating* mengalami penurunan yang berarti permukaan semakin halus/rata. Hasil kekasaran permukaan *coating* pada sampel *as-coated* lebih tinggi dibandingkan sampel lainnya dengan nilai kekasaran sebesar 12,09 μm. Kekasaran pada sampel *as-coated* ini sesuai jika dipadukan dengan hasil pengujian morfologi sebelumnya dimana pada perbesaran 500 kali terlihat banyak *coarse particle* yang tersebar merata pada bagian atas permukaan *coating*.

**Tabel 4. 4** Hasil uji kekasaran permukaan terhadap *thermal cycle*

Variable Thermal Cycle	Nilai Kekasaran (μm)
Tanpa thermal cycle	12,09
1x thermal cycle	11,40
5x thermal cycle	9,77
10x thermal cycle	8,49



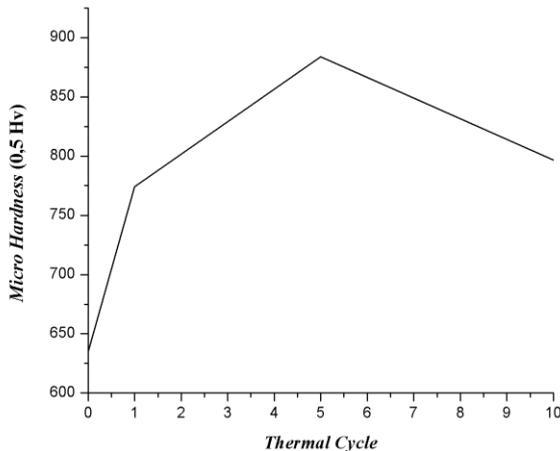
Nilai kekasaran pada sampel dengan sepuluh kali *thermal cycle* sebesar  $8.49 \mu\text{m}$ . Hasil pengamatan morfologi bagian penampang melintang secara mikrofografi yang dilakukan sebelumnya terlihat pada Gambar 4.7 (d) dimana sampel dengan jumlah sepuluh kali *cycle* memiliki struktur permukaan yang lebih datar dan halus jika dibandingkan dengan permukaan pada sampel lainnya. Proses *thermal cycle* pada temperatur  $650^\circ\text{C}$  menyebabkan permukaan lapisan *coating* lebih halus terbukti pada hasil uji mikrofografi dimana tampak *flattening area* lebih tersebar. Nilai kekasaran menjadi faktor penting dan permukaan yang lebih halus memiliki hubungan yang linear dengan rendahnya koefisien gesek yang akan berpengaruh terhadap ketahanan abrasi dari lapisan *coating* (Pawlowski, 2008).

#### 4.5 Pengujian Kekerasan *Micro Vickers*

Pengujian kekerasan dilakukan pada material substrat *stainless steel 304* untuk mengetahui nilai kekerasan awal saat sebelum di *coating*. Nilai kekerasan *micro vickers* material substrat yang diperoleh sebesar 403 Hv. Selanjutnya uji kekerasan mikro dilakukan pada setiap sampel dengan variabel tanpa perlakuan *cycle (as-coated)*, satu kali *thermal cycle*, lima kali *thermal cycle*, dan sepuluh kali *thermal cycle*. Tabel 4.5 menampilkan hasil pengujian *micro vickers* yang diperoleh dari keseluruhan sampel dan Gambar 4.12 yang menampilkan grafik nilai kekerasan mikro terhadap simulasi *thermal cycle* yang diberikan. Hasil yang di dapatkan setelah dilakukan proses *coating* tanpa di lanjutkan proses *thermal cycle (as-coated)* sebesar 635,3 Hv meningkat signifikan jika dibandingkan dengan material substrat.

Berikutnya dilakukan proses *thermal cycle* dan diperoleh nilai kekerasan untuk sampel dengan satu kali *cycle* nilai kekerasannya sebesar 774 Hv. Pada lima kali *cycle* nilai kekerasannya sebesar 883,7 Hv meningkat jika dibandingkan dengan satu kali *cycle*. Pada sampel dengan sepuluh kali *cycle* mengalami penurunan kekerasan yaitu sebesar 796,3 Hv. Nilai kekerasan terus meningkat dari sebelum diproses *thermal cycle*

sampai dengan lima kali *cycle* tetapi saat sepuluh kali *cycle* mengalami penurunan. Gambar 4.12 memperlihatkan grafik bahwa perlakuan *thermal cycle* yang diberikan cenderung meningkatkan kekerasan lapisan *coating* NiCrWCFe tetapi tidak pada *cycle* ke-10. Nilai kekerasan meningkat karena bergantung terhadap nilai kekasaran pada permukaan dan adanya porositas/*crack* pada *coating* (Chicot, et al. 2014).



**Gambar 4. 12** Grafik uji kekerasan *micro vickers* terhadap jumlah *thermal cycle*.

Penurunan nilai kekerasan pada sampel dengan sepuluh kali *cycle* juga disebabkan oleh meningkatnya konten *titanium* dan menurunnya konten *tungsten* pada hasil pengujian EDS. Pada Tabel 4.3 untuk sampel dengan sepuluh kali *cycle* pada daerah *melt* mengandung 5,33 % Ti dan 5,09 % W. Presentase *tungsten* pada sampel 10-*cycle* ini sangat rendah jika dibandingkan dengan sampel pada variabel lain, penurunan unsur *tungsten* yang signifikan dan unsur *titanium* menurut hasil uji EDS mengindikasikan nilai kekerasan pada *cycle* ke-10 mengalami penurunan jika dibandingkan pada *cycle* ke-5 .



**Tabel 4. 5** Data pengujian *micro vickers* terhadap *thermal cycle*

Variable Thermal Cycle	Nilai Kekerasan (Hv)	Rata-rata (Hv)
Tanpa thermal cycle	653	635,3
	644	
	609	
1x thermal cycle	779	774
	774	
	769	
5x thermal cycle	809	883,7
	925	
	917	
10x thermal cycle	776	796,6
	763	
	851	

Grafik data XRD menampilkan terbentuknya senyawa oksida CrO pada sampel satu kali *cycle*, FeO pada lima kali *cycle*, dan FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> pada sepuluh kali *cycle* hal ini berkesesuaian dengan data pada pengujian EDS dimana konten oksigen meningkat dari sampel *as-coated* hingga ke sampel sepuluh kali *cycle* seperti yang ditampilkan pada Tabel 4.3. Senyawa oksida dari proses *thermal cycle* yang diberikan dapat meningkatkan nilai kekerasan tetapi penurunan sedikit nilai kekerasan dapat disebabkan oleh pesebaran senyawa yang terbentuk tidak merata saat proses *spraying* karena uji kekerasan mikro dilakukan pada tiga titik dengan lokasi yang jauh berbeda, karena jika melihat penurunan nilai kekerasan pada sampel *5-cycle* ke sampel *10-cycle* tidak terlalu signifikan meskipun ada senyawa keras oksida. Pada simulasi *ini thermal cycle* tidak memberikan pengaruh buruk tetapi lebih meningkatkan nilai kekerasan hasil *coating*.



#### 4.6 Analisis Pengujian Abrasi

Hasil yang diperoleh dari uji ketahanan aus ditunjukkan pada Tabel 4.6. Data pada Tabel 4.6 menunjukkan bahwa setelah dilakukan proses pelapisan tanpa proses *thermal cycle* (as-coated) diperoleh ketahanan abrasi dengan *weight loss* sebesar 0,531 g/cm<sup>2</sup>. Pada sampel *as-coated* jika dilihat pada morfologi strukturnya seperti pada Gambar 4.3 (a) tampak partikel kasar (*coarse grain*) tampak tersebar merata dan hal ini mengindikasikan bahwa pada sampel ini permukaan lapisan *coating* memiliki nilai kekasaran yang cukup besar jika melihat Tabel 4.4 Banyaknya partikel kasar pada permukaan *coating* ini yang mengakibatkan sampel *as-coated* ini mudah tergerus pada uji abrasi sehingga laju ketahanan ausnya tinggi.

**Tabel 4. 6** Data hasil pengujian ketahanan abrasi terhadap *thermal cycle*

Variable Thermal Cycle	Laju Abrasi (g/cm <sup>2</sup> )	Kehilangan Berat (%)
Tanpa thermal cycle	0,53	0,05
1x thermal cycle	0,16	0,02
5x thermal cycle	0,13	0,05
10x thermal cycle	0,01	0,02

Sampel berikutnya diberi perlakuan satu kali *thermal cycle* terjadi penurunan signifikan dibandingkan dengan sampel *as-coated*. Nilai *weight loss* pada sampel satu *cycle* sebesar 0,1645 g/cm<sup>2</sup> dengan berat yang hilang dan menandakan bahwa ketahanan abrasinya semakin baik. Pengujian porositas juga menunjukkan adanya penurunan presentase dari sampel *as-coated* dengan sampel satu kali *thermal cycle* yang mempengaruhi ketahanan abrasi *coating*. Jika melihat pada Tabel 4.5 nilai kekerasan pada sampel



satu *cycle* memang meningkat dari sebelum di *thermal cycle* sehingga dengan meningkatnya kekerasan maka ketahanan abrasifnya juga semakin baik.

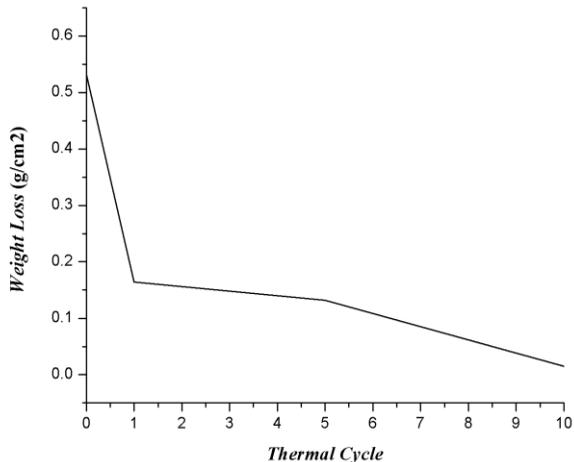
Variabel dengan lima kali *thermal cycle* mengalami penurunan *weight loss* dengan nilai sebesar 1,1322 g/cm<sup>2</sup>. Gambar 4.3 (c) menunjukkan *flattening area* pada sampel dengan 5 kali *cycle* semakin tersebar. Hal ini menandakan bahwa permukaan lapisan *coating* memiliki kekasaran yang lebih rendah dibandingkan sampel *as-coated* maupun satu kali *cycle* terbukti jika melihat Tabel 4.4 dimana kekasaran permukaan menurun. Semakin halus permukaan *coating* maka akan semakin sukar tergerus atau terabrasi dan ditunjukkan pada Tabel 4.5 bahwa sampel lima *cycle* memiliki nilai kekerasan yang tertinggi. Nilai kekerasan yang tinggi mengindikasikan ketahanan abrasi yang baik (Tracton 2007).

*Weight loss* pada sampel dengan sepuluh kali *cycle* yaitu sebesar 0,0152 g/cm<sup>2</sup>. Pengaruh *cycle* sangat tampak jika melihat Gambar 4.13 dimana grafik laju ketahanan abrasi menurun. Sampel dengan sepuluh kali *cycle* memang memiliki nilai kekerasan lebih rendah dibandingkan dengan lima kali *cycle* tetapi Gambar 4.6 (d) dan Tabel 4.1 menunjukkan bahwa jumlah porositas pada sampel ini menurun jika dibandingkan dengan sampel sebelumnya. Semakin rendahnya porositas yang ada maka mengacu pada struktur permukaan yang semakin homogen dan rapat.

Hasil pelapisan tanpa sebelum dilakukan proses simulasi *thermal cycle* memiliki ketahanan abrasi yang rendah, hal ini disebabkan oleh permukaan lapisan *coating* yang kasar. Ditinjau dari hasil pengamatan morfologi dengan perbesaran 500 kali terlihat permukaan spesimen tanpa *thermal cycle* memiliki persebaran yang tidak merata atau dalam kata lain secara makrografi tampak kasar. Hal ini menjadi penyebab berkurangnya berat pada sampel *as-coated* memiliki nilai paling banyak diantara sampel dengan variabel lainnya. Jadi simulasi dengan metode *thermal cycle* yang diberikan lebih meningkatkan ketahanan *coating* terhadap abrasi. Selain itu pada permukaan lapisan *coating*



tanpa *thermal cycle* memiliki jumlah porositas yang cukup banyak dan merata dipermukaan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.1, hal ini paling mempengaruhi laju keausan suatu material.



**Gambar 4. 13** Grafik pengaruh jumlah *cycle* terhadap *weight loss*

Semakin banyak terdapat porositas maka akan semakin mudah material tersebut untuk terabrasi atau tergerus pada bagian permukaannya. Ketahanan abrasi juga bergantung pada nilai kekasaran permukaan dari *coating*, semakin kasar permukaan maka akan mudah terabrasi bagian permukaannya, tetapi juga dipengaruhi oleh nilai kekerasan pada permukaan tersebut.

#### 4.7 Analisis Pengujian Daya Lekat

Pengujian daya lekat (*adhesi*) dilakukan untuk mengetahui besar nilai kelekatan material *coating* terhadap permukaan substrat. Pengujian ini dilakukan dengan berdasarkan ASTM D-4541. Pengujian ini dilakukan sebanyak tiga kali kemudian diambil rata-rata. Nilai kelekatan material *coating* ditunjukkan dalam satuan



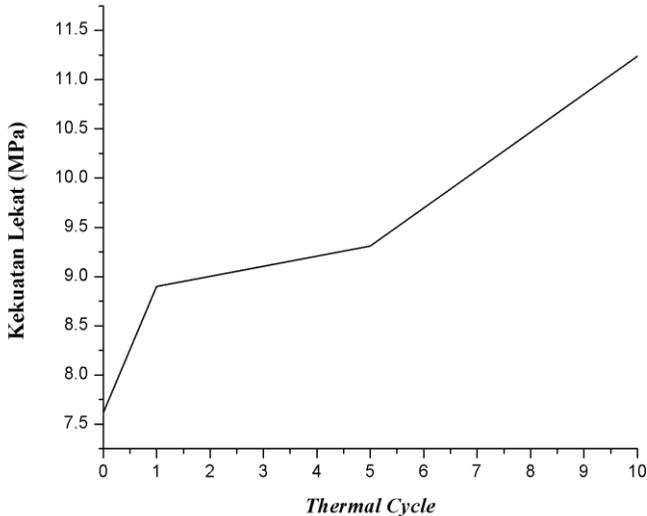
MPa, seperti pada Tabel 4.7 dan bentuk permukaan *coating* setelah pengujian seperti pada Gambar 4.14.

Gambar 4.15 menampilkan grafik kekuatan adhesi lapisan *coating* NiCrWCFe terhadap jumlah *thermal cycle* dimana kekuatan adhesi meningkat. Terlihat pada Tabel 4.7 nilai kekuatan adhesi material *coating* tanpa perlakuan *thermal cycle* memiliki kekuatan adhesi yang rendah dibandingkan dengan sampel lainnya yaitu sebesar 7,62 MPa. Sampel dengan perlakuan satu kali *thermal cycle* meningkat kekuatannya sebesar 8,90 MPa, peningkatan kekuatan lekat ini juga dapat direpresentasikan oleh gambar SEM dengan perbesaran 100 kali dimana tampak jumlah porositas permukaan yang menurun dari sampel yang tanpa *thermal cycle* dan satu kali *thermal cycle*. Nilai kekuatan lekat *coating* meningkat pada sampel 5 dan 10 kali *thermal cycle* yaitu sebesar 9,31 MPa dan 11,24 MPa. Oleh karena itu semakin banyak jumlah perlakuan *thermal cycle* tidak menurunkan kekuatan lekat *coating* tetapi meningkatkan kekuatan lekat *coating* dalam penelitian ini hingga sampai *cycle* ke-10.



**Gambar 4. 14** Tampak atas hasil uji *pull off*

Jika melihat Tabel 4.1 data perhitungan porositas pada sampel *as-coated* memiliki jumlah porositas lebih besar dibandingkan dengan sampel lainnya, adanya porositas dalam jumlah besar merupakan penyebab kekuatan adhesi pada sampel *as-coated* rendah jika dibandingkan dengan sampel setelah *thermal cycle*.



**Gambar 4. 15** Grafik kekuatan adhesi terhadap *thermal cycle*

Hasil uji XRD juga menampilkan terbentuknya senyawa intermetalik *iron tungsten*, susunan dari senyawa kimia antara material yang tersemburkan saat *spray* dan material substrat juga menghasilkan ikatan metalurgi yang kuat seperti yang dilakukan Kitara dan Hasui (1974), dimana terbentuk senyawa intermetalik seperti  $\text{Fe}_2\text{W}$  dan  $\text{Fe}_7\text{W}_6$ . Adanya difusi vakansi pada bagian permukaan *coating* ditandai dengan berkurangnya porositas (struktur permukaan semakin padat) dapat meningkatkan kekuatan lekat material *coating*.



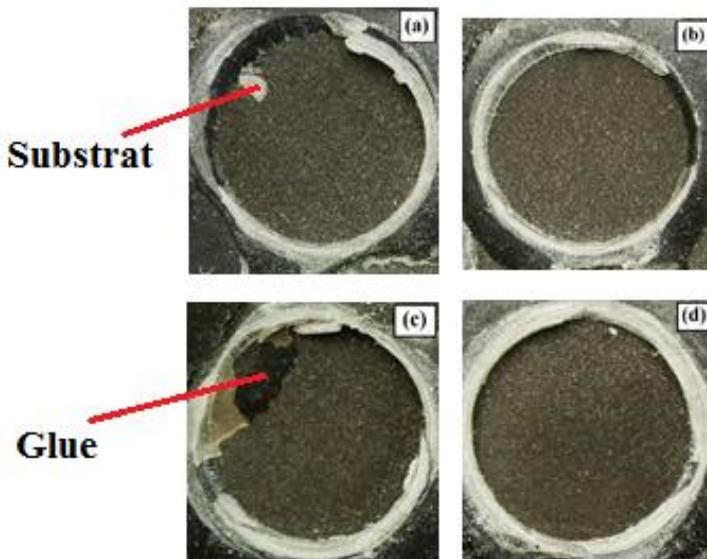
Gambar 4.16 (b) menampilkan hasil pengujian *pull off* pada sampel setelah di *thermal cycle* satu kali. Pada gambar dapat dilihat bahwa material *coating* tidak terangkat dari substrat melainkan hanya bagian *coating* atau dengan kata lain merupakan kohesi dari material *coating*. Hal ini mengindikasikan bahwa kekuatan lekat dari material *coating* baik *bond coat* maupun *top coat* lebih tinggi daripada kekuatan kohesi, dengan adanya kohesi menandakan pencapaian optimum dari kekuatan adhesi (Tracton 2007).

**Tabel 4. 7** Hasil pengujian adhesi terhadap *thermal cycle*

Variable Thermal Cycle	Nilai Adhesif (MPa)	Rata-rata (MPa)
Tanpa thermal cycle	8,06	7,62
	8,17	
	6,64	
1x thermal cycle	10,43	8,90
	7,63	
	8,64	
5x thermal cycle	12,32	9,31
	7,39	
	8,24	
10x thermal cycle	8,81	11,24
	12,77	
	12,16	

Untuk sampel dengan perlakuan lima kali *cycle* yang ditunjukkan pada Gambar 4.16 (c) terlihat ada sebagian daerah lem (*glue*) tetapi dominan material *coating* yang terangkat yang mengindikasikan semakin tingginya kekuatan lekat baik adhesi maupun kohesi *coating*. Sampel dengan sepuluh kali *cycle*

ditunjukkan pada Gambar 4.16 (d) terlihat bahwa material *coating* terangkat pada *dolly* tetapi hanya bagian kohesif *coating* menandakan bahwa kekuatan lekat tinggi. Selain itu pada Tabel 4.1 presentase porositas pada sampel dengan sepuluh kali *cycle* memiliki jumlah porositas sedikit maka semakin padat dan semakin lekat bagian *interface* material *coating* ke substrat.



**Gambar 4. 16** Permukaan hasil pengujian *pull off* (a) tanpa *thermal cycle* (b) 1x *cycle* (c) 5x *cycle* (d) 10x *cycle*.

Faktor-faktor tersebut membuktikan bahwa sampel dengan sepuluh *cycle* pada grafik yang ditampilkan Gambar 4.15 memiliki nilai kekuatan lekat yang tinggi. Semakin baik kekuatan adhesi permukaan secara umum mengindikasikan lapisan yang lebih permanen, yang mana adaptif untuk pemakaian yang tanpa henti, seperti pada *boiler-tube* (Tracton, 2007).



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisa data dapat disimpulkan bahwa :

1. Peningkatan jumlah *thermal cycle* yang diberikan pada *coating* NiCrWCFe memperluas persebaran partikel mikro dibuktikan dengan penurunan jumlah porositas hingga pada sepuluh kali *cycle* dengan presentase porositas sebesar 2,358 %.
2. Peningkatan jumlah *thermal cycle* yang diberikan pada *coating* NiCrWCFe meningkatkan kekuatan lekat lapisan *coating* hingga mencapai 11,24 MPa pada sepuluh kali *cycle* dan meningkatkan ketahanan abrasi lapisan *coating* dengan pengurangan berat mencapai 0,0152 gr/cm<sup>2</sup>. *Thermal cycle* juga berpengaruh terhadap nilai kekerasan *coating*, kekerasan meningkat hingga pada lima kali *cycle* sebesar 883,7 Hv.

### 5.2 Saran

Disarankan untuk penelitian selanjutnya agar :

1. Parameter jumlah *thermal cycle* di tambahkan untuk memperoleh hasil yang lebih akurat terhadap kekuatan adhesi dan abrasi.
2. Dilakukan mapping SEM/EDS untuk mengetahui persebaran unsur pada permukaan *coating*.
3. Parameter seperti sudut dan jarak *nozzle coating* diperhatikan untuk memperoleh hasil lapisan yang maksimal.



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR PUSTAKA

- Agbadua, Segun Afokhainu , and Chinedum Ogonna Mgbemena. 2011. "Thermal Cycling Effects on the Fatigue Behaviour of Low Carbon Steel." *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, Vol. 10, No.14.
- ASM Handbook. 1992. *ASM Handbook*. Volume 18, Friction, Lubrication, and Wear Technology. Vol. Vol. 18. United States of America: ASM International.
- ASTM A 213. n.d. *Standard Specification for Seamless Ferritic and Austenitic Alloy-Steel Boiler, Superheater, and Heat-Exchanger Tubes*. ASTM International.
- Bouras, M. , A. Boumaiza, V. Ji, and N. Rouag. 2012. "XRD peak broadening characterization of deformed microstructures and heterogeneous behavior of carbon steel." *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*.
- Callister, William D. . 2007. *Materials Science and Engineering An Introduction*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Chicot, D. , H. Ageorges, M. Voda, and G. Louis. 2014. "*Hardness of thermal sprayed coatings: Relevance of the scale of Measurement.*" *Surface & Coatings Technology*.
- Dorfman, M.R. 2005. *Thermal Spray Coating in Handbook of Environmental Degradation of Materials*. Norwich: William Andrew Publishing.
- Elie Tawil, , P.E. 1998. *Boiler Classification and Application*. Stony Point, NY: Continuing Education and Development, Inc.
- Fischer, K.P. 1995. "Performance History of Thermal-Sprayed Aluminum Coatings in Offshore Service." *Material Performance*, 34 (4) 27-35.
- Hasry, Muhammad , and Yusuf Kaelani. 2014. "Studi Eksperimental Keausan Permukaan." *JURNAL TEKNIK POMITS Vol. 3, No. 1, ISSN: 2337-3539* .
- Henig, E.T. 1981. *Metallwerke Plansee*. Austria: H.M. Ortner.

- Hup, Ong Chong. 2010. *Norimax: Corrosion Control Materials and Consultancy Services in Thermal Spray Coating*. Selangor: Norimax Sdn Bhd.
- Jones, Denny A. 1992.
- Krishna, B. Vamsi , and V.N. Misra. 2002. "Microstructure and properties of flame sprayed tungsten." *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 20.
- Kumar, Naresh , and Rupinder Kanwar. 2012. "To Study Erosion Behavior of Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Coating on SS-304 Boiler Steel." *International Journal on Emerging Technologies* 3(1) 69.
- Malik, Anees U. , and Saleh A. Al-Fozan. 2013. "Studies on the Failure of Economizer Tubes Involving." *International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 4, Issue 9* 1.
- Pawlowski, Lech . 2008. *The Science and Engineering of Thermal Spray Coating Second Edition*. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England: John Wiley & Sons Ltd.
- Prawara, B. 2006. "Rancang Bangun Thermal Spray Coating Dengan Menggunakan Sistem Hight Velocity Oxygen." *Kegiatan: 4977.0127: Rekayasa Peralatan*.
- Sacks, Natasha . 2016. "Low pressure cold gas dynamic spraying of tungsten carbide-nickel coatings."
- Roberge, Pierre R.. 2000. *Handbook of Corrosion Engineering, Second Edition* McGraw-Hill Education: New York
- Setiawan, Sugiono, and Yuli Setiyorini. 2012. "PENGARUH VARIASI SUDUT NOZZLE DAN JARAK NOZZLE PADA ARC SPRAY COATING TERHADAP KETAHANAN ABRASIF LAPISAN 13% CHROME STEEL." *JURNAL TEKNIK POMITS Vol. 2, No. 1.*,
- Siegmund, A.J. 1997. "Metal Alloy; Corrosion Protection for the Future in NACE International Annual Conference epoxy composite coatings on AA2024-T3." *Progress in Organic Coatings. Columbus: The Ohio State University*.

- Sundararajan, T. , S. Kuroda, F. Abe, and S. Sodeoka. 2004. "Effect of thermal cycling on the adhesive strength of Ni–Cr coatings." *Surface & Coatings Technology* 194 290– 299.
- Teir, Sebastian . 2002. *Basics of Steam Generation*. Finland: Helsinki University of Technology Department of Mechanical Engineering.
- Tracton, Arthur A. . 2007. *COATINGS TECHNOLOGY FUNDAMENTALS, TESTING, AND PROCESSING TECHNIQUES*. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Tucker, Robert C. . 1994. "Thermal Spray Coatings." *ASM Handbook, Volume 5: Surface Engineering*.
- Zhang, Xin , Zehua Wang, Jinran Lin, and Zehua Zhou. 2015. "A study on high temperature oxidation behavior of high-velocity arc sprayed Fe-based coatings." *Surface & Coatings Technology*.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# LAMPIRAN

## 1. Data sheet TAFE 97 MXC

### Technical Data

# Bulletin



Praxair Surface Technologies  
1555 Main Street  
Indianapolis, IN 46224



Praxair Surface Technologies  
TAFE Incorporated  
146 Pentacore Road  
Concord, NH 03301

[Back to Wire Catalog](#)

File: 1.9.1.2-97MXC  
Issue: P11205  
Supercedes: 011206

## Praxair and TAFE 97MXC® UltraHard® DUOCOR™ Wire

### Material Review:

Thermal spray wire utilizing titanium and tungsten carbide within an amorphous matrix to provide excellent abrasion resistance. Offers very high bond strengths, high hardness, and a non-skid surface.

**CAUTION:** All Praxair and TAFE wires have been optimized for arc spraying. Use of alternate wires usually cause problems such as excessive tip wear, spitting and feeding problems. We only recommend Praxair and TAFE certified wires.

### Application Review:

Praxair and TAFE 97XC wire is used primarily as a hard abrasion resistant interface. When applied 0.010 inches thick, the material exhibits impressive elasticity for a coating this hard. Applications can use coating thicknesses up to 0.060 inch for wear and non skid surfaces.

After application, the coating can be ground using aluminum oxide and subsequently polished to under a 10 RMS surface finish. This, coupled with good bond strength, high deposit efficiency, low coefficient of friction, high deposition rates, and ease of application, allows 97MXC coatings to compete with processes that require plating or plasma technologies.

Praxair and TAFE 97MXC coating application procedures are the same as other Praxair and TAFE hardfacing wires, and can be applied using the same process parameters.

MXC® is a registered trademark of TAFE Incorporated, Concord, NH  
UltraHard is a registered trademark of TAFE Incorporated, Concord, NH  
DUOCOR™ products are proprietary to Amorphous Technologies International

<b>Composition:</b>	
<b>ELEMENTS</b>	<b>WEIGHT %<sup>1</sup></b>
Silicon	1.25
Chromium	14.0
Nickel	4.5
Manganese	0.56
Boron	1.87
Tungsten Carbide	26.0 min
Titanium Carbide	6.0
Iron	Balance
<b>Coating Physical Properties:</b>	
Wire Size	1/16" (1.6 mm)
Deposit Efficiency	70 Percent*
Melting Point	2300°F (1204°C) (approx.)
Bond Strength	5100 psi @ 15 mils thick
Coating Texture	Variable**
Macro hardness	Approx. 64-89 R <sub>c</sub> 1050-1150 DPH <sub>300</sub>
Coating Density	6.76 gm/cc***
Finish - ground	Excellent
<b>Spraying:</b>	
Spray Rate	6.5 lbs/hr/100 amps (2.95 kg/hr/100 amps)
Coverage (wire consumption)	1.0 oz/ft <sup>2</sup> /0.001" (1.2 kg/m <sup>2</sup> /100 microns)
Spray Pattern****(approximate 3-5" standoff)	Cross Nozzle/Positioner - 3" (7.6 cm)
Length of wire per lb	102 ft. (1/16")

<sup>1</sup> Compositions are nominal unless otherwise specified

\* Depends on air pressure, standoff, nozzle cap and target size.

\*\* 5" standoff, 60 psi - 8830, depends on air pressure - fine with high psi, average with medium psi, and rough with low psi.

\*\*\* Depends on atomizing air pressure.

\*\*\*\* Higher air pressures, smaller wire (1/16), and lower amperage with red nozzle cap gives smallest diameter pattern.

## 2. Data Produk Stainless Steel 304 PT. Sutindo

BAHRU STAINLESS		INSPECTION CERTIFICATE 3.1				ISSUE DATE: 2016-03-26	
MANUFACTURER'S MARK		BHS		INSPECTOR'S STAMP		E/AOD	
CUSTOMER				ORDER No.	ITEM No.	DELIVERY NOTE No.	
PT SUTINDO RAYA MULIA Jl. PUPAK 133, BIRU BAYA 60171, INDONESIA				BEC3860	16	DEL027242	
SIRABAYA Indonesia				CUSTOMER ORDER No. 101660282			
SPECIFICATIONS				MATERIAL CODE		CASE	
ASTM A240 / A240M-15a				304		BFC101485 (1851 kJ)	
ASME BPVC-III SA240 / SA240M-2015				304		BFC101485 (1851 kJ)	
TOLERANCE: ASTM A480				KURZ/NAME			
PRODUCT: 2B Finish, Cold Rolled, Annealed & Pickled, Skin passed				HEAT No.: A1504275 D00406			
DIMENSIONS: 3 mm X		1220 mm X		2440 mm		QUANTITY: 65	MASS: 4545 Kg
CHEMICAL COMPOSITION (%)							
	C	S	P	Mn	Si	Cr	Ni
Min	0.07	0.030	0.025	2.00	0.25	17.5	8.0
Actual	0.01	0.001	0.027	1.53	0.41	18.2	8.1
MECHANICAL PROPERTIES							
TEMPERATURE	DIRECTION	POSITION	Rm MPa	Rp0.2 MPa	A50 %	HRBW	
Ambient	Transverse	Requirement: Min	515	205	40		
Ambient	Transverse	Head Tail	660	285	51	52 54	54 54
INTERGRANULAR CORROSION			This material is free from intergranular contamination.				
SPECIFICATION		RESULT					
		The relative level exhibited by this material is not greater than the named background level. This document is issued without alteration or omission and may only be reproduced in full.					
		Tests to verify batch and quality have been made. Versteekingsproef werd doorgevoerd. Visual and dimensional control, no exposure. Beëindigings- en Afwerking: olie Roestvrijheid. The delivery is in accordance with the order. Die Levering entspricht den Bestelbeschrijvingen. This material meets the Hardness requirement of N500 XPR 0175. Material has been PH4 Tested.					
BAHRU STAINLESS SDN BHD IS MEMBER OF ACERINOX GROUP							
HEAT TREATMENT (SOLUTION ANNEALED)							
Anneal °C				Quench			
1050 - 1100				AIR/SPRAY			
						BAHRU STAINLESS PTD 4069 (PLO 108), Jalan Rumbua 4 Tanjung Langsat Industrial Complex 81700 Pasir Gudang, Johor, Malaysia Swin Le Teoh QC ENGINEER	

### 3. Perhitungan Ketahanan Abrasi

Tabel 1. Data kekuatan abrasif

Berat Awal (gr)	Berat Akhir (gr)	Selisih Berat	Luas Area (cm <sup>2</sup> )	Ketahanan abrasif (mg/ cm <sup>2</sup> )
1,9713	1,9596	0,0117	0,022	0,531
3,0619	3,0540	0,0079	0,048	0,1645
3,0929	3,0773	0,0156	0,118	0,1322
3,6735	3,6631	0,0104	0,681	0,0152

$$\text{ketahanan abrasif} = \frac{\text{Pengurangan Berat}}{\text{Luas Area ter-abrasi}}$$

### 4. Perhitungan Porositas Densitas

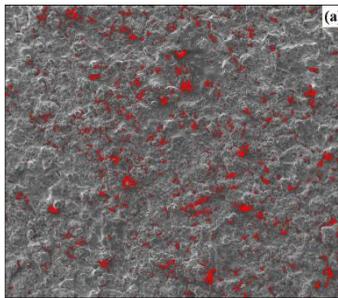
Variabel	Volume udara (cm <sup>3</sup> )	Volume air (cm <sup>3</sup> )	Selisih Volume	Porositas (%)
As-coated	0.4073	0.3816	0.0257	6.309845323
1	0.53327	0.5011	0.03217	6.03259137
5	0.5421	0.5197	0.0224	4.132078952
10	0.5256	0.5087	0.0169	3.215372907

$$\text{Rumus presentase porositas} = \frac{V_{\text{udara}} - V_{\text{air}}}{V_{\text{udara}}} \times 100\%$$

## 5. Perhitungan Porositas dengan Imagej

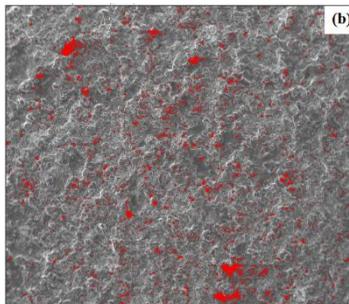
**Tabel 2** Perhitungan sampel as-coated

Slice	Count	Total Area	Average Size	%Area	Mean
100x.tif	3885	27.309	0.007	3.285	44.831



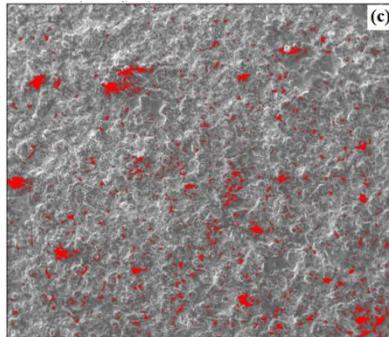
**Tabel 3** Perhitungan sampel 1-cycle

Slice	Count	Total Area	Average Size	%Area	Mean
100x.tif	4283	26.164	0.006	3.155	66.123



**Tabel 4** Perhitungan sampel 5-cycle

Slice	Count	Total Area	Average Size	%Area	Mean
100x.tif	1579	24.035	0.015	2.898	81.478



**Tabel 5** Perhitungan sampel 5-cycle

Slice	Count	Total Area	Average Size	%Area	Mean
100x.tif	3218	19.553	0.006	2.358	66.971

## 6. JCPDS Card

- No. 01-077-8048

Date: 12/5/2016 Time: 1:47:44 PM User: Teknik Material

File: 1

---

### Name and formula

Reference code: 01-077-8048  
Compound name: Iron Tungsten  
Empirical formula:  $Fe_{1.96}W_{0.04}$   
Chemical formula:  $(Fe_{1.96}W)_{0.04}$

### Crystallographic parameters

Crystal system: Cubic  
Space group:  $Im\bar{3}m$   
Space group number: 229  
  
a (Å): 2.8736  
b (Å): 2.8736  
c (Å): 2.8736  
Alpha (°): 90.0000  
Beta (°): 90.0000  
Gamma (°): 90.0000  
  
Volume of cell ( $10^6 \text{ pm}^3$ ): 23.73  
Z: 1.00  
  
RIR: 11.16

### Subfiles and quality

Subfiles: ICSD Pattern  
Inorganic  
Quality: Blank (B)

### Comments

ANX: N  
Creation Date: 11/13/2009  
Modification Date: 1/19/2011  
ANX: N  
Analysis: Fe1.96 W0.04

---

Formula from original source: Fe49 W/D.04  
 ICSD Collection Code: 624059 FIZ634069  
 Temperature of Data Collection: 294 K  
 Minor Warning: No a.s.d reported/abstracted on the cell dimension. No R factors reported/abstracted  
 Significant Warning: unit cell dimensions taken from figure  
 Wyckoff Sequence: a (IMS-M)  
 Unit Cell Data Source: Powder Diffraction.

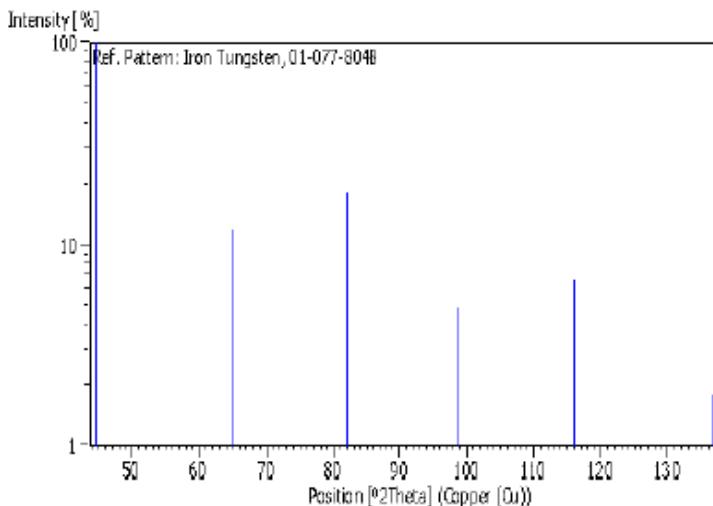
## References

Primary reference: *Calculated from ICSD using POWD-12++*  
 Structure: Abrahamson, E.P., Lopata, S.L., *Trans. Met. Soc. AIME*, **236**, 76, (1966)

## Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	1	1	0	2.03190	99.556	100.0
2	2	0	0	1.43680	69.890	11.9
3	2	1	1	1.17310	82.088	18.2
4	2	2	0	1.01600	98.606	4.8
5	3	1	0	0.90870	115.824	6.6
6	2	2	2	0.82950	136.495	1.8

## Stick Pattern



- No. 01-074-6646

### **Name and formula**

Reference code: 01-074-6646  
Compound name: Chromium Oxide  
Empirical formula: CrO  
Chemical formula: CrO

### **Crystallographic parameters**

Crystal system: Cubic  
Space group: Fm-3m  
Space group number: 225  
  
a (Å): 4.1600  
b (Å): 4.1600  
c (Å): 4.1600  
Alpha (°): 90.0000  
Beta (°): 90.0000  
Gamma (°): 90.0000  
  
Volume of cell (10<sup>6</sup> pm<sup>3</sup>): 71.99  
Z: 4.00  
  
RIR: 4.79

### **Subfiles and quality**

Subfiles: Alloy, metal or intermetallic  
ICSD Pattern  
Inorganic  
Quality: Indexed (I)

### **Comments**

ANX: AX  
Creation Date: 11/19/2008  
Modification Date: 1/19/2011  
ANX: AX  
Analysis: Cr1 O1  
Formula from original source: Cr O  
ICSD Collection Code: 109296  
Calculated Pattern Original Remarks: Black powder  
Minor Warning: No e.s.d reported/abstracted on the cell dimension. No R factors reported/abstracted  
Wyckoff Sequence: b a(FM3-M)  
Unit Cell Data Source: Powder Diffraction.

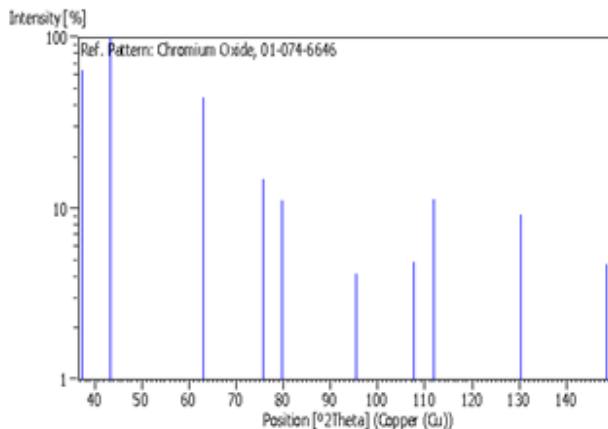
Primary reference:  
Structure:

Calculated from ICSD using POWD-12++  
Lux, H., Jilmann, G., Eberle, L., *Z. Lebensm.-Unters. Forsch.*, **1959**,  
150, (1959)

### Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta(deg)	I (%)
1	1	1	1	2.40180	37.413	64.4
2	2	0	0	2.08000	43.473	100.0
3	2	2	0	1.47080	63.165	44.3
4	3	1	1	1.28430	75.777	15.0
5	2	2	2	1.20090	79.798	11.1
6	4	0	0	1.04000	95.578	4.2
7	3	3	1	0.95440	107.628	4.9
8	4	2	0	0.93020	111.808	11.3
9	4	2	2	0.84920	130.212	9.2
10	5	1	1	0.80060	148.373	4.7

### Stick Pattern



- No. 01-077-7979

### **Name and formula**

Reference code:	01-077-7979
Mineral name:	Wuestite, syn
Compound name:	Iron oxide
Empirical formula:	FeO
Chemical formula:	FeO

### **Crystallographic parameters**

Crystal system:	Cubic
Space group:	Fm-3m
Space group number:	225
a (Å):	4.3230
b (Å):	4.3230
c (Å):	4.3230
Alpha (°):	90.0000
Beta (°):	90.0000
Gamma (°):	90.0000
Volume of cell (10 <sup>6</sup> pm <sup>3</sup> ):	80.79
Z:	4.00
RIR:	5.01

### **Status, subfiles and quality**

Status:	Alternate Pattern
Subfiles:	Alloy, metal or intermetallic Common Phase Forensic ICSD Pattern Inorganic Mineral
Quality:	Indexed (I)

### **Comments**

ANX:	NO
Creation Date:	11/13/2009
Modification Date:	1/19/2011
ANX:	NO
Analysis:	Fe1 O1
Formula from original source:	Fe O
ICSD Collection Code:	633029 FIZ633029
Sample Source or Locality:	synthetic
Minor Warning:	No R factors reported/abstracted

Wyckoff Sequence: b a (FM3-M)  
Unit Cell Data Source: Single Crystal.

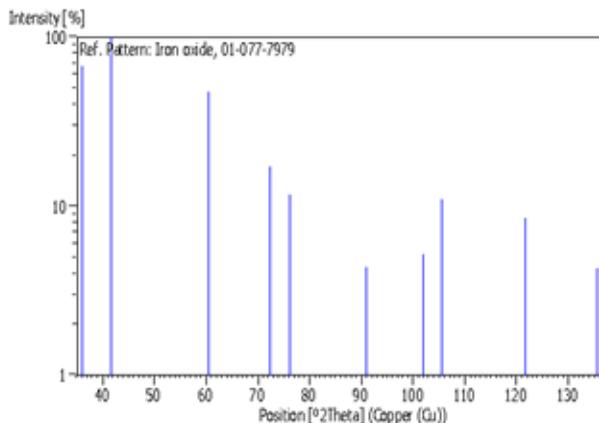
## References

Primary reference: *Calculated from ICSD using POWD-12++*  
Structure: Katsura, T., Iwasaki, B., Kimura, S., Syun-Iti Akimoto, *J. Chem. Phys.*,  
**47**, 4559, (1967)

## Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta(deg)	I (%)
1	1	1	1	2.49590	35.953	67.1
2	2	0	0	2.16150	41.755	100.0
3	2	2	0	1.52840	60.529	47.7
4	3	1	1	1.30340	72.455	17.1
5	2	2	2	1.24790	76.235	11.8
6	4	0	0	1.08080	90.912	4.4
7	3	3	1	0.99180	101.913	5.2
8	4	2	0	0.96670	105.658	11.0
9	4	2	2	0.88240	121.609	8.5
10	5	1	1	0.83200	135.591	4.3

## Stick Pattern



- No. 01-075-3312

### **Name and formula**

Reference code: 01-075-3312  
Mineral name: Chromite, syn  
Compound name: Iron Chromium Oxide  
Empirical formula:  $\text{Cr}_2\text{FeO}_4$   
Chemical formula:  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$

### **Crystallographic parameters**

Crystal system: Cubic  
Space group: Fd-3m  
Space group number: 227  
a (Å): 8.3765  
b (Å): 8.3765  
c (Å): 8.3765  
Alpha (°): 90.0000  
Beta (°): 90.0000  
Gamma (°): 90.0000  
Volume of cell ( $10^6 \text{ pm}^3$ ): 587.74  
Z: 8.00  
RIR: 4.90

### **Subfiles and quality**

Subfiles: ICSD Pattern  
Inorganic  
Mineral  
Quality: Star (S)

### **Comments**

ANX: AB2X4  
Creation Date: 11/20/2008  
Modification Date: 1/19/2011  
ANX: AB2X4  
Analysis: Cr2 Fe1 O4  
Formula from original source: Fe Cr2 O4  
ICSD Collection Code: 171121  
Calculated Pattern Original Remarks: Sample: Fe2-100. Wyckoff Sequence: e d a(FD3-MZ). Unit Cell  
Data Source: Single Crystal.

### **References**

---

Primary reference:  
Structure:

Calculated from ICSD using POWD-12++  
Lenaz, D., Skogby, H., Pringivalle, F., Halenius, U., *Phys. Chem. Miner.*,  
31, 633, (2004)

### Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta(deg)	I (%)
1	1	1	1	4.83620	18.330	12.9
2	2	2	0	2.96150	30.153	32.8
3	3	1	1	2.52360	35.516	100.0
4	2	2	2	2.41810	37.131	7.4
5	4	0	0	2.09410	43.165	20.4
6	3	3	1	1.92170	47.262	0.1
7	4	2	2	1.70980	53.554	9.1
8	5	1	1	1.61210	57.087	32.8
9	4	4	0	1.48080	62.690	38.5
10	5	3	1	1.41590	65.918	1.2
11	4	4	2	1.39610	66.974	0.1
12	6	2	0	1.32440	71.129	2.8
13	5	3	3	1.27740	74.173	7.5
14	6	2	2	1.26280	75.178	3.3
15	4	4	4	1.20900	79.137	2.2
16	7	1	1	1.17290	82.105	0.8
17	6	4	2	1.11940	86.966	3.4
18	7	3	1	1.09050	89.881	10.3
19	8	0	0	1.04710	94.724	4.0
20	7	3	3	1.02340	97.647	0.1
21	6	4	4	1.01580	98.632	0.1
22	8	2	2	0.98720	102.574	1.6
23	7	5	1	0.98720	105.580	6.3
24	6	6	2	0.96080	106.591	1.6
25	8	4	0	0.93650	110.678	2.4
26	9	1	1	0.91940	113.823	0.4
27	8	4	2	0.91400	114.870	0.1
28	6	6	4	0.89290	119.241	0.5
29	9	3	1	0.87810	122.621	5.5
30	8	4	4	0.85490	128.590	9.4
31	9	3	3	0.84190	132.398	0.3
32	10	2	0	0.82140	139.367	2.0
33	9	5	1	0.80980	144.062	7.3
34	10	2	2	0.80600	145.767	2.0

### Stick Pattern

- No. 00-033-0397

### Name and formula

Reference code:	00-033-0397
Compound name:	Chromium Iron Nickel Carbon
Common name:	304-stainless steel, austenite
Empirical formula:	$C_{0.06}Cr_{0.29}FeNi_{0.16}$
Chemical formula:	$FeCr_{0.29}Ni_{0.16}C_{0.06}$

### Crystallographic parameters

Crystal system:	Cubic
Space group:	Fm-3m
Space group number:	225
a (Å):	3.5911
b (Å):	3.5911
c (Å):	3.5911
Alpha (°):	90.0000
Beta (°):	90.0000
Gamma (°):	90.0000
Volume of cell (10 <sup>6</sup> pm <sup>3</sup> ):	46.31
Z:	4.00
RIR:	-

### Subfiles and quality

Subfiles:	Alloy, metal or intermetallic Inorganic
Quality:	Star (S)

### Comments

Color:	Black
Creation Date:	12/8/1982
Modification Date:	1/11/2011
Analysis:	Quantitative analysis by Atomic Absorption Spectroscopy: chromium 17.9%, nickel 11.4%, molybdenum <0.01%, silicon 0.88%, analysis incomplete. Color: Black. General Comments: Austenitic steel. Synthetic taenite is "Ni"-Fe" rich analog.

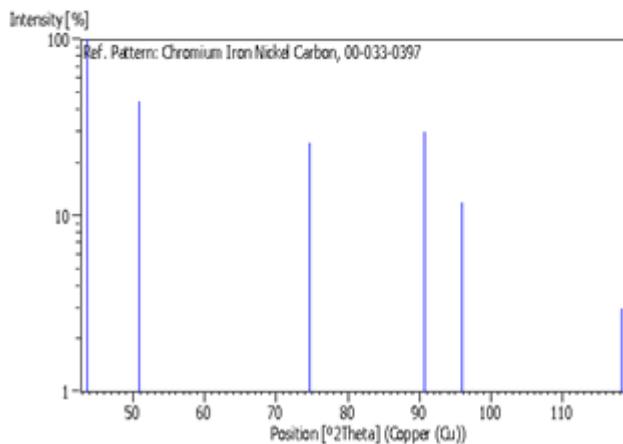
### References

Primary reference:	Pfoertsch, Ruud, Penn State University, University Park, Pennsylvania, USA., <i>JCOD Grant-in-Aid</i> , (1982)
--------------------	--

### Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta(deg)	I [%]
1	1	1	1	2.07500	43.583	100.0
2	2	0	0	1.79610	50.792	45.0
3	2	2	0	1.26970	74.699	26.0
4	3	1	1	1.08280	90.697	30.0
5	2	2	2	1.03680	95.968	12.0
6	4	0	0	0.89790	118.161	3.0

### Stick Pattern



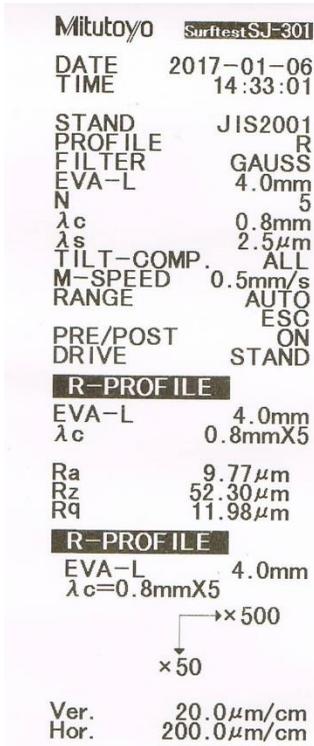
## 7. Hasil Pengujian Kekasaran Permukaan

Mitutoyo		SurftestSJ-301	
DATE	2017-01-06		
TIME	14:52:40		
STAND	JIS2001		
PROFILE	R		
FILTER	GAUSS		
EVA-L	4.0mm		
N	5		
$\lambda c$	0.8mm		
$\lambda s$	2.5 $\mu$ m		
TILT-COMP.	ALL		
M-SPEED	0.5mm/s		
RANGE	AUTO		
PRE/POST	ESC		
DRIVE	ON		
	STAND		
<b>R-PROFILE</b>			
EVA-L	4.0mm		
$\lambda c$	0.8mmX5		
Ra	12.09 $\mu$ m		
Rz	64.02 $\mu$ m		
Rq	15.08 $\mu$ m		
<b>R-PROFILE</b>			
EVA-L	4.0mm		
$\lambda c=$	0.8mmX5		
	→x200		
	↓x50		
Ver.	50.0 $\mu$ m/cm		
Hor.	200.0 $\mu$ m/cm		

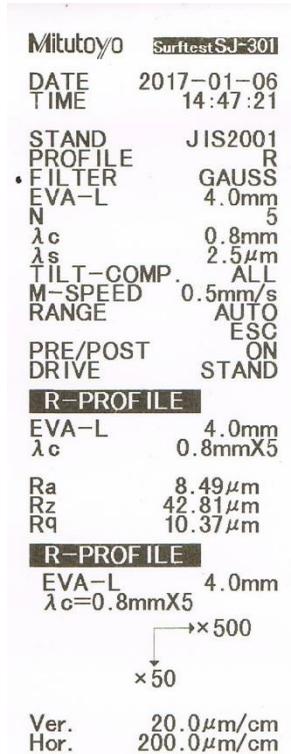
(a)

Mitutoyo		SurftestSJ-301	
DATE	2017-01-06		
TIME	14:34:53		
STAND	JIS2001		
PROFILE	R		
FILTER	GAUSS		
EVA-L	4.0mm		
N	5		
$\lambda c$	0.8mm		
$\lambda s$	2.5 $\mu$ m		
TILT-COMP.	ALL		
M-SPEED	0.5mm/s		
RANGE	AUTO		
PRE/POST	ESC		
DRIVE	ON		
	STAND		
<b>R-PROFILE</b>			
EVA-L	4.0mm		
$\lambda c$	0.8mmX5		
Ra	11.40 $\mu$ m		
Rz	58.80 $\mu$ m		
Rq	13.88 $\mu$ m		
<b>R-PROFILE</b>			
EVA-L	4.0mm		
$\lambda c=$	0.8mmX5		
	→x500		
	↓x50		
Ver.	20.0 $\mu$ m/cm		
Hor.	200.0 $\mu$ m/cm		

(b)



(c)



(d)

Keterangan gambar :

- (a) Sampel *as-coated*
- (b) Sampel 1x *thermal cycle*
- (c) Sampel 5x *thermal cycle*
- (d) Sampel 10x *thermal cycle*

## UCAPAN TERIMA KASIH

Pada pengerjaan tugas akhir ini penulis banyak mendapat bantuan dari berbagai pihak, pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Bapak, Mama, dan Adik tercinta, Bapak Hendri Sugiartono, Ibu Kariyati, Destio Hakim Satriawan serta seluruh keluarga yang telah memberikan banyak doa, dukungan, semangat, cinta kasih, motivasi, dan inspirasi.
2. Dr. Agung Purniawan, ST, M,Eng dan Hariyati Purwaningsih S.Si., M.Si. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir penulis yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu selama pengerjaan tugas akhir ini.
3. Pak Larasanto dan segenap rekan-rekan CV. Cipta Agung yang telah membantu selama pengerjaan tugas akhir ini.
4. Dr. Agung Purniawan, ST., M,Eng selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.
5. Dr. Eng. Hosta Ardhyanta ST., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
6. Dian Mughni Felicia, ST., M.Sc. selaku dosen wali yang sangat mengayomi selama penulis menjalani pendidikan di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi.
7. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS yang telah membimbing penulis hingga terciptanya laporan ini.
8. Sahabat terbaik penulis yaitu Para Sayap yang beranggotakan Gentong, Aul, Dio, Dony, Gale, Daru, Ridho, Kemplo, Andika, Didit, Reggy, Ikiw, dan Yudha yang telah memberikan semangat dan energi positif selama penulis menjadi mahasiswa di JTMM FTI-ITS.
9. Sahabat terbaik penulis, Muhammad Ridho Azhari yang selalu ada untuk berbagi suka dan duka selama penulis menjadi mahasiswa di JTMM FTI-ITS.

10. Geng kos om Buyung, Ridho, Gale, Dony, Henry, Samuel yang selalu memberikan tawa dan ceria selama penulis mengerjakan laporan ini.
11. Amanda Dwi Purwanti yang selalu memberikan doa, kesan baik, dan semangat positif kepada penulis.
12. Sahabat putih abu-abu (90's Kids) Andy, Ilham, Imbang, Chandra, Ryano
13. Teman-teman seperjuangan MT15 yang memberikan banyak cerita dalam kehidupan penulis
14. Serta seluruh pihak yang belum bisa dituliskan satu per satu oleh penulis. Terimakasih atas dukungan dan bantuan teman-teman sekalian.

## BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Kota Surabaya pada tanggal 27 Mei 1995. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Hendri Sugiartono dan Kariyati. Jenjang pendidikan formal yang ditempuh penulis dimulai dari TK, SD, dan SMP di Mutira Bunda 1 Sidoarjo, kemudian SMA Trimurti Surabaya. Setelah lulus SMA penulis melanjutkan pendidikan melalui jalur SBMPTN di Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya di tahun 2013 terdaftar dengan NRP 2713100110.

Penulis mengikuti beberapa organisasi saat dibangku perkuliahan yaitu, di BEM Fakultas menjabat sebagai Kepala Biro Dana Usaha Mandiri Departemen Kewirausahaan BEM FTI-ITS dan menjadi staff Kementerian Perekonomian di Persatuan Mahasiswa Metalurgi dan Material se-Indonesia. Penulis mengikuti berbagai kegiatan pelatihan saat berorganisasi seperti LKMM Pra-TD, LKMM TD, LOT 1, LOT 2, dan Public Relation Training. Dalam kegiatan akademis penulis aktif sebagai asisten Laboraturium Korosi dan Analisa Kegagalan. Penulis bertempat tinggal di Pondok Mutiara Bi No.8, Sidoarjo dan kontak yang dapat dihubungi di [panjihargas@gmail.com](mailto:panjihargas@gmail.com) atau 081216447291.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*