



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TL141584

**PENGARUH TEKANAN GAS TERHADAP SIFAT
MEKANIK DAN MORFOLOGI LAPISAN COATING
PENCAMPURAN FeCrBMnSi DAN Ni-Al PADA BAJA
AISI 4140 DENGAN METODE TWIN WIRE ARC SPRAY**

Putu Ditha Pratama
NRP 2713 100 003

**Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**



TUGAS AKHIR – TL 141584

**PENGARUH TEKANAN GAS TERHADAP SIFAT
MEKANIK DAN MORFOLOGI LAPISAN COATING
PENCAMPURAN FeCrBMnSi DAN Ni-Al PADA BAJA
AISI 4140 DENGAN METODE TWIN WIRE ARC
SPRAY**

Putu Ditha Pratama
NRP 2713 100 003

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

**Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2017**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT – TL 141584

**EFFECT OF GAS PRESSURE ON MECHANICAL
PROPERTIES AND MORPHOLOGY COATING
MIXING FE₂CRBMNSI AND NIAL ON AISI 4140 WITH
TWIN WIRE ARC SPRAY METHOD**

Putu Ditha Pratama
NRP 2713 100 003

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

**Materials and Metallurgical Engineering
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2017**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**Pengaruh Tekanan Gas Terhadap Sifat Mekanik dan
Morfologi, Lapisan Coating Pencampuran FeCrBMnSi dan
NiAl pada Baja AISI 4140 dengan Metode *Twin Wire Arc
Spray***

TUGAS AKHIR

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

Oleh
Putu Ditha Pratama
NRP 2713 100 003

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

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



(Halaman ini sengaja dikosongkan)



**Pengaruh Tekanan Gas Terhadap Sifat Mekanik dan
Morfologi, Lapisan Coating Pencampuran FeCrBMnSi dan
NiAl pada Baja AISI 4140 dengan Metode *Twin Wire Arc
Spray***

Nama : Putu Ditha Pratama
NRP : 2713100003
Departemen : Teknik Material
Dosen Pembimbing : Dr. Agung Purniawan,S.T,M.Eng.
Hariyati Purwaningsih,S.Si,M.Si.

ABSTRAK

Boiler adalah bejana tertutup yang berfungsi sebagai pembangkit listrik tenaga uap. Untuk mengubah air menjadi uap dengan tekanan yang tinggi, diperlukan pemberian panas yang tinggi pada boiler. Bagian boiler yang sering menjadi perhatian adalah *boiler tube* dan *superheater tube*, karena pada bagian ini sering terpapar panas pada temperatur yang tinggi, sehingga diperlukan perlindungan yang bertujuan meningkatkan umur pakai dari *boiler tube* dan *superheater tube*. Metode *metal coating thermal spray* adalah salah satu metode yang digunakan sebagai metode perlindungan pada *boiler tube* dan *superheater tube*. Pada penelitian ini dilakukan pengaplikasian *metal coating thermal spray* dengan menggunakan jenis coating yang memiliki kandungan krom tinggi. Material coating yang digunakan adalah FeCrBMnSi (TAFA 95 MXC). Untuk meningkatkan kekuatan adhesifnya dilapisi dengan *bond coat* nikel alloy NiAl (TAFA 75 Bond Coat-NiAl). Dalam pelaksanaan coating *thermal spray*, dipelajari pengaruh tekanan gas terhadap hasil coating itu sendiri. SEM digunakan untuk menganalisa morfologi dari pengaplikasian coating. Pengujian sifat mekanik dilakukan dengan cara pengujian *microhardness* dan *pull of boanding*. Fasa yang terbentuk dianalisa dengan menggunakan XRD. Dari hasil pengamatan morfologi coating setiap kenaikan variasi tekanan gas didapat hasil lapisan coating yang porositasnya berkurang dimana pada tekanan 6 bar



persentase area yang mengalami porositas 6,83% pada pengamatan penampang melintang lapisan coating dan pada pengamatan permukaan coating persentase area terporositas sebesar 7,2%. Dari pengujian porositas pada sample dengan menggunakan picnometer didapat porositas pada tekanan 6 bar paling kecil dengan area terporositas 4,88%. Dari pengujian *microhardness* didapat hasil setiap kenaikan variasi tekanan gas, nilai kekerasan lapisan coating semakin besar, pada tekanan 6 bar di dapat nilai kekerasan 280,80 Hv. Pengujian pull of bonding didapat setiap kenaikan tekanan gas meningkatkan daya rekat pada lapisan coating, pada tekanan 6 bar didapat daya rekat sebesar 20,58 MPa. Senyawa yang terbentuk pada lapisan coating menunjukkan FeCr dan NiCr pada peak tertinggi dari hasil pengujian di ikuti dengan terbentuknya FeMn₄. Setelah dilakukan proses annealing terjadi penurunan porositas dimana pada 6 bar porositas menurun dari 6,83% menjadi 3,95% pada penampang melintang coating. Untuk permukaan coating porositas menurun dari 7,2% menjadi 6,95%. Terjadi kenaikan kekerasan pada lapisan coating, pada variasi tekan 6 bar kekerasan dari 280,80 Hv, menjadi 517,53 Hv. Kenaikan terjadi juga pada daya lekat lapisan coating dari 20,58 MPa menjadi 21,75 MPa

Kata Kunci : Coating, Twin Wire Arc Spray, FeCrBMnSi, Tekanan gas, Sifat mekanik, Morfologi



**Effect of Gas Pressure on Mechanical Properties and
Morphology Coating Mixing FeCrBMnSi and NiAl on AISI
4140 with Twin Wire Arc Spray Method**

Name : Putu Ditha Pratama
NRP : 2713100003
Departement : Material Engineering
Advisors : Dr. Agung Purniawan,S.T,M.Eng.
Hariyati Purwaningsih,S.Si,M.Si

ABSTRACT

Boiler is a closed vessel that serves as a steam power plant. The boiler tubes and superheater tubes are critical parts of the boiler, because the parts are often exposed to high temperature. Therefore protection is required to increase life time of boiler tubes and superheater tubes. Thermal spray is one method that used to protect the boiler tubes and superheater tubes. In this research, in order to increase lifetime of the parts, metal coating using thermal spray was applied to surface of boiler and superheater tubes materials. The coating material used is FeCrBMnSi (TAF A 95 MXC). To increase its adhesive strength is coated with nickel alloy NiAl bond (TAF A 75 Bond Coat-NiAl). In the implementation of thermal spray coatings, studied the effect of gas pressure on the results of the coating. SEM is used to analyze the morphology of coating. Testing of mechanical properties is done by testing microhardness and pull of bonding. The formed phase was analyzed by using XRD. From the observation of morphological coating, increasing of gas pressure variation results decreases porosity. On pressure variable 6 bar, porosity percentage is 6.83% in the cross section and at surface observation porosity is 7.2%. From the porosity test using picnometer, low porosity at pressure variation 6 bar with porosity percentage 4.88%. From the microhardness test, each increase of gas pressure variation, coating hardness value is getting bigger, at 6 bar hardness of coating 280,80 Hv. Tests of pull of bonding obtained every enhancement in gas pressure advance the



adhesiveness of the coating layer, at a pressure of 6 bar obtained adhesive power of 20.58 MPa. The compound formed in the coating layer shows Fe-Cr at the highest peak, followed Fe₂B and AlNi₃. After the annealing process occurs porosity where at 6 bar porosity decreased from 6.83% to 3.95% at cross section of coating. For surface porosity layer decreased from 7.2% to 6.95%. There is an enhancement in hardness on the coating layer, at a pressure variation of 6 bar hardness of 280.80 Hv, to 517.53 Hv. The enhancement also occurs in the coating adhesive power of 20.58 MPa to 21.75 MPa.

Key word: Coating, Twin wire arc spray, FeCrBMnSi, gas pressure, mechanical properties, morphology.



KATA PENGANTAR

Om Swastiastu puji syukur penulis panjatkan kepada Ida Sang Hyang Widi Wasa, Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan tuntunan dan sinar suci beliau sehingga penulis dapat menyelesaikan seluruh rangkaian penyusunan laporan Tugas Akhir dengan judul “Pengaruh Tekanan Gas Terhadap Sifat Mekanik dan Morfologi *Coating* Pencampuran FeCrBMnSi dan Ni-Al pada Baja AISI 4140 dengan Metode Twin Wire Arc Spray”.

Terima kasih kepada semua pihak yang berperan pada penulisan tugas akhir ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

- Bapak I Nyoman Parwata dan Ibu Ni Luh Putu Manik Widiyanti, sebagai orang tua tercinta, atas jasa-jasanya yang tak terhingga dalam mendidik dan membesarkan saya.
- Kembaran saya Gde Made Ditha Dwitama atas semangat dan doanya yang selalu menguatkan saya.
- Bapak Dr. Agung Purniawan, S.T.,M.Eng sebagai dosen pembimbing pertama dan selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi. Terima kasih atas segala bimbingan, masukan, dan saran yang bapak berikan.
- Ibu Hariyati Purwaningsih, S.Si, M.Si sebagai dosen pembimbing kedua yang saya hormati. Terima kasih atas segala bimbingan, masukan, dan saran yang bapak dan ibu berikan.
- Bapak Larasanto dan Bapak Dedik PT. Cipta Agung atas kerja samanya dalam pengerjaan proses coating.
- Mbak iis terimakasih atas waktunya karena bersedia direpotkan dengan berbagai pengulangan pengujian saya dan teman – teman.
- Teman – teman tugas akhir hard coating ayu, nia, rifqi tantyo terimakasih atas kerja samanya di banyak hal baik pengujian dan juga diskusi.
- Teman – teman para sultan, badi dan jonathan yang selalu memberikan support positif kepada saya



- Seluruh teman – teman MT 15, terimakasih atas dukungan dan doanya yang selalu menguatkan selama ini, keep solid gagah berani yo rek.

Dengan menyadari keterbatasan ilmu, tentu laporan ini masih jauh dari sempurna. Untuk itu saya selaku penulis dengan senang hati menerima kritik dan saran yang bersifat membangun dari para pembaca laporan ini. Semoga laporan Tugas Akhir ini dapat memberi manfaat bagi kita semua.

Surabaya, 2017

Penulis



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii

BAB I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Tujuan Penelitian.....	3
1.5. Manfaat Penelitian.....	3

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Material pada Boiler	5
2.1.1 Baja Paduan	6
2.1.2 Baja AISI 4140	6
2.1.3 Material Lain untuk Boiler	8
2.2. Boiler	8
2.2.1 Mekanisme Perubahan Uap Air pada Boiler	9
2.2.2 Komponen pada Boiler	10
2.3. Coating	12
2.4. Metode Thermal Spray	14
2.4.1 Thermal Spray Panas Pembakaran	14
2.4.2 Twin Wire Arc Spray	18
2.5. Ikatan Pelapisan Logam Secara Mekanik.....	22
2.6. Mekanisme Ikatan Logam Secara Difusi.....	24
2.7. Nickel – Aluminium Bond Coat	25
2.8. Fe-Cr-B-Mn-Si Top Coating	28
2.9. Pengaruh Parameter pada Arc Spray	34
2.9.1 Pengaruh Tekanan Gas	34



BAB III. METODE PENELITIAN	
3.1. Diagram Alir Penelitian	37
3.2. Metode Perancangan	38
3.3. Bahan Penelitian	38
3.4. Alat Penelitian	40
3.5. Prosedur Pengujian	46
3.5.1 Preparasi Spesimen.....	46
3.5.2 Proses Pelapisan	46
3.5.3 Proses Pengujian.....	47
BAB IV. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	
4.1. Hasil Grit Blasting dan Twin Wire Arc Spray	51
4.2. Hasil Pengujian <i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i> <i>Energy Dispersive X-Ray (EDAX)</i>	53
4.2.1 Morfologi Permukaan Coating	53
4.2.2 Morfologi Penampang Melintang Coating	59
4.2.3 Hasil Uji Porositas.....	64
4.3. Ketebalan Coating	66
4.4. Hasil Pengujian Microhardnest	70
4.5. Hasil Pengujian Pull of Bonding	71
4.6. Hasil Pengujian XRD	73
4.7. Pengamatan Hasil Anneling	75
4.7.1 Morfologi Permukaan Coating	75
4.7.2 Morfologi Penampang Melintang Coating	77
4.7.3 Pengujian Porositas	79
4.7.4 Pengujian Kekerasan	80
4.7.5 Pengujian Pull of Bonding	82
4.7.6 Pengujian XRD.....	83
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan.....	87
5.2 Saran	87
DAFTAR PUSTAKA	xix
LAMPIRAN	xxiii
BIOGRAFI PENULIS	



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Sirkulasi air/uap pada boiler	10
Gambar 2.2	Komponen Boiler	12
Gambar 2.3	Klasifikasi proses <i>thermsl spray</i>	14
Gambar 2.4	Skema proses <i>oxyfuel</i> masukan powder.....	15
Gambar 2.5	Skema dari proses oxy – fuel wire	15
Gambar 2.6	Skema dari proses detonation gun	16
Gambar 2.7	Skema proses spray <i>High Velocity</i>	18
Gambar 2.8	Skema mekanisme spray <i>twin wire arc spray</i>	19
Gambar 2.9	Gambar mikrostruktur lapisan coating.....	20
Gambar 2.10	Skema proses pembentukan ikatan coating dengan substrate.....	23
Gambar 2.11	Skema interaksi bonding <i>twin wire arc spray</i>	23
Gambar 2.12	Oksida yang terbentuk pada nickel	26
Gambar 2.13	Diagram Fasa Ni-Al.....	27
Gambar 2.14	Pola XRD <i>Powder Coating</i> dan Hasil <i>Metallic Amorphous Coating Fe-Cr-B-Mn-Si</i>	29
Gambar 2.15	Diagram Fasa Cr-B	30
Gambar 2.16	Diagram Fasa Fe-B	31
Gambar 2.17	Diagram Fasa Fe-Cr.....	32
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	37
Gambar 3.2	Mesin Gergaji Pita	42
Gambar 3.3	<i>Roughness Test</i>	43
Gambar 3.4	Alat <i>Pull of Test</i>	43
Gambar 3.5	Mesin XRD (<i>X-Ray Diffraction</i>).....	44
Gambar 3.6	Mesin Pengujian <i>Scanning Electron Microscope</i> ..	44
Gambar 3.7	Muffle Furnace.....	45
Gambar 3.8	Hardness Test.....	45
Gambar 3.9	Proses pelapisa <i>Arc Spray</i>	46
Gambar 4.1	Pengamatan substart sebelum diblasting.....	51
Gambar 4.2	Gambar pengamatan visual hasil blasting.....	52
Gambar 4.3	Gambar permukaan coating pembesaran 100x	54
Gambar 4.4	Kekasaran coating dengan variasi tekanan ..	55
Gambar 4.5	Gambar permukaan coating perbesaran 500 x	56
Gambar 4.6	Grafik porositas bagian surface dengan image J....	58



Gambar 4.7	Perbesaran penampang melintang 250x dengan variasi tekanan gas.....	60
Gambar 4.8	Gambar hasil EDAX pada penampang melintang lapisan coating variasi tekanan 6 bar.....	62
Gambar 4.9	Grafik luasan area yang mengalami porositas pada bagian penampang melintang dengan aplikasi image J.....	64
Gambar 4.10	Gambar grafik porositas pada lapisan coating	65
Gambar 4.11	Gambar cross section perbesaran 250x	67
Gambar 4.12	Grafik ketebalan coating dengan variasi tekanan.	68
Gambar 4.13	Gambar grafik hasil pengujian densitas	69
Gambar 4.14	Grafik hasil kekerasan dengan variasi tekanan	70
Gambar 4.15	Grafik hasil uji pull of bonding lapisan coating dengan variasi tekanan	72
Gambar 4.16	Gambar hasil XRD lapisan coating.....	73
Gambar 4.17	Gambar perbedaan morfologi permukaan coating setelah anelning perbesaran 100x.....	76
Gambar 4.18	Grafik perbandingan area porositas pada surface coating tanpa anelning dengan anelning.....	77
Gambar 4.19	Gambar penampang melintang perbesaran 250x pada penampang melintang lapisan coating dengan anelning dan tanpa anelning	78
Gambar 4.20	Grafik perbedaan area yang terporositas pada penampang melintang lapisan coating tanpa anelning dengan lapisan coating yang di anelning	79
Gambar 4.21	Gambar grafik perbandingan hasil uji porositas lapisan coating dengan anelning dan tanpa anelning.	80
Gambar 4.22	Gambar grafik perbandingan uji kekerasan lapisan coating dengan anelning dan tanpa anelning.....	81
Gambar 4.23	Grafik perbandingan pull of lapisan coating dengan anelning dan tanpa anelning.....	82
Gambar 4.24	Perbandingan hasil XRD lapisan coating dengan anelning dan tanpa anelning.....	83
Gambar 4.25	Diagram fasa Fe-Ni.....	85



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi Baja AISI 4140.....	7
Tabel 2.2 Sifat Mekanik Baja AISI 4140	7
Tabel 2.3 Material yang dapat digunakan pada boiler.....	8
Tabel 2.4 Properti dari Berbagai Teknik Logam	22
Tabel 2.5 Beberapa difusivitas atom	25
Tabel 3.1 Komposisi kimia baja AISI 4140	39
Tabel 3.2 Komposisi kimia <i>top coating</i>	39
Tabel 3.3 Komposisi kimia <i>boad coat</i>	40
Tabel 3.4 Spesifikasi Mesin Aplikasi <i>Arc Spray</i>	41
Tabel 3.5 Spesifikasi Peralatan Abrasive Grit Blasting.....	42
Tabel 4.1 Tabel hasil EDAX pada lapisan coating	57



(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Boiler adalah bejana tertutup yang berfungsi sebagai pembangkit listrik tenaga uap yang terdiri dari sistem air umpan, sistem steam dan sistem bahan bakar. Panas pembakaran dari sistem dialirkan ke air hingga air menjadi uap. Uap ini yang akan digunakan sebagai pemutar generator untuk membangkitkan listrik.

Untuk membangkitkan listrik secara terus menerus dalam kapasitas yang besar, tentunya boiler memerlukan material yang dapat menahan paparan panas yang tinggi secara terus menerus. Bagian boiler yang sering menjadi perhatian adalah *boiler tube* dan *superheater tube*, karena pada bagian ini sering terpapar panas pada temperatur yang tinggi, sehingga diperlukan material yang mampu beroperasi pada keadaan tersebut. Salah satu contohnya adalah ASTM A 193 B7 atau dipasaran dikenal sebagai AISI 4140, yang merupakan jenis baja paduan atau *alloy steel*. Baja AISI 4140 merupakan baja paduan rendah molybdenum yang mengandung kromium dengan kadar karbon 0,4%. Dengan adanya kandungan molybdenum dan kromium membuat material ini memiliki titik melting yang tinggi yaitu 1416°C, sehingga dapat digunakan pada boiler dimana pemanasan pada boiler berkisar 1000°C – 1371°C. Pengoperasian boiler secara terus menerus menyebabkan bagian *boiler tube* dan *superheater tube* dapat mengalami berbagai kegagalan dalam pengoperasiannya. Sehingga peningkatan umur pakai dari *boiler tube* dan *superheater tube* menjadi perhatian utama. Terdapat beberapa alternatif untuk meningkatkan umur pakai dari *tube* tersebut seperti *welding overlay*, *up-grade* material dan metoda pelapisan logam. Dari ketiga alternatif tersebut yang paling umum digunakan adalah teknik pelapisan logam dengan menggunakan metoda thermal spraying.

Metoda thermal spraying yang lazim digunakan yaitu *High Velocity Oxygen Fuel (HVOF)*, *Powder Oxy-Fuel Spraying* dan *Electrical Twin Wire Arc Spray (TWAS)*. Metoda thermal spraying



yang terakhir yaitu TWAS dipilih dikarenakan biaya yang lebih murah, kemudahan dalam aplikasi, waktu aplikasi yang lebih cepat dan mudah dalam proses perbaikan (Yu, dkk, 2009)

Dalam aplikasi coating metoda TWAS terdapat beberapa variasi pelaksanaan coating. Pertama aplikasi coating dengan metoda TWAS dengan material *top coating* langsung ke substrate tanpa *bonding coating*. Kedua aplikasi coating *top coating* ditambahkan *bond coat*, layer pertama *boanding coating*, layer kedua *top coating*. Ketiga metoda pencampuran atau *mixing coating* dimana metode ini merupakan metode pencampuran *top coating* dengan *bonding coating*, dimana pada sisi katoda dipasang *top coating* dan sisi anoda di isi dengan *bonding coating* (Irawan, 2016).

Jenis coating yang digunakan adalah coating yang memiliki kandungan krom yang cukup tinggi. Terdapat beberapa jenis coating yang dijual di pasaran untuk keperluan pelapisan *tube boiler* dan *superheater tube* salah satu material coating yang digunakan adalah $\text{Fe}_{65,5}\text{Cr}_{27,5}\text{B}_{3,7}\text{Mn}_{1,7}\text{Si}_6$ (TAF A 95 MXC) merupakan *wire high chrome* ditambah kandungan boron dan silikon. Untuk meningkatkan kekuatan adhesifnya dilapisi dengan *bond coat* nikel allyo $\text{Ni}_{95}\text{Al}_5$ (TAF A 75 Bond Coat-NiAl).

Dalam pelaksanaan coating *thermal spraying*, dipelajari pengaruh tekanan gas terhadap hasil lapisan coating yang dihasilkan. Sehingga dilakukan penelitian dengan variasi tekanan gas ketika proses pelapisan *mixing coating*, *top coating* dan *bond coating* dengan *substrate* AISI 4140 untuk memperoleh parameter yang baik terhadap sifat mekanik dan morfologi dari *mixing coating*

1.2 Rumusan Masalah

Adapun perumusan masalah yang dianalisis penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh variasi tekanan gas, pada saat pelapisan *mixing coating* $\text{Fe}_{65,5}\text{Cr}_{27,5}\text{B}_{3,7}\text{Mn}_{1,7}\text{Si}_6$ dan



$Ni_{95}Al_5$ terhadap sifat mekanik dan morfologi coating pada baja AISI 4140?

1.3 Batasan Masalah

Agar hasil yang dihasilkan sesuai dengan yang diharapkan serta tidak menyimpang dari permasalahan yang ditinjau, maka perlu adanya suatu batasan masalah. Pada penelitian ini, batasan yang digunakan adalah :

1. Komposisi material substrat dianggap sama atau homogen.
2. Parameter dari proses voltase dan arus dianggap stabil dalam semua proses.
3. Temperatur substrat dianggap stabil.
4. Jarak *nozzel* pada proses pelapisan diasumsikan sama
5. Sudut *nozzel* pada proses pelapisan diasumsikan sama
6. Komposisi kimia material *coating* (*wire coating*) diasumsikan seragam terdistribusi keseluruhan permukaan.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian adalah sebagai berikut:

1. Menganalisa pengaruh variasi tekanan gas, pada saat pelapisan mixing coating $Fe_{65,5}Cr_{27,5}B_{3,7}Mn_{1,7}Si_6$ dan $Ni_{95}Al_5$, terhadap sifat mekanik dan morfologi coating pada baja AISI 4140.

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan mamfaat sebagai berikut:

1. Dapat dijadikan referensi untuk metoda pelapisan ketahanan thermal pada *tube boiler* dan *superheater tube*.
2. Dapat dijadikan sebagai referensi dalam metoda thermal spray lainnya dengan variasi tekanan gas automasi.



3. Hasil penelitian dapat dijadikan informasi yang saling melengkapi dan komferhensif dengan hasil penelitian – penelitian sebelumnya terkait metal coating.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Material pada Boiler

Penggunaan material untuk *tube* dan *superheater tube* pada boiler, harus memenuhi beberapa standar seperti mampu menahan paparan panas 1000°C – 1371°C (Akbar, et al., 2009). Kekuatan tensile minimal 415 Mpa, kekerasan material 89 HRB, *yeild streng* 205 Mpa dan *elongation* minimal 30mm (ASME sec II, 2010). Selain sifat mekanik pada material, *thermal propertiest* pada material, yang digunakan sebagai *tube* dan *superheater tube* pada boiler sangat berpengaruh. Hal ini diperlukan untuk menjaga perbedaan temperatur yang ada pada luar tube dan didalam tube. Pada *superheater* tube temperatur uap kering memiliki temperatur 500°C – 550°C sedangkan kondisi temperatur di luar tube memiliki temperatur 1000 – 1371°C. Secara garis besar *thermal propertist* yang mempengaruhi kemampuan material untuk menahan panas dipengaruhi oleh

- *Density* : mempunyai satuan kg/m^3 , merupakan perbandingan antara berat dan volume, density memegang peran yang besar untuk thermal properties, material mempunyai density ringan mempunyai daya isolasi lebih besar daripada material yang ber-density besar.
- *Conductivity* : mempunyai satuan W/mK, adalah kemampuan material untuk berkonduksi panas. Material yang mempunyai conductivity rendah mempunyai daya isolator yang baik, sebaliknya material yang mempunyai conductivity tinggi merupakan material penghantar panas yang baik.
- *Specific heat* : mempunyai satuan Wh/kgK, adalah mengindikasikan material mempunyai kemampuan menyimpan sejumlah energy. Specific heat yang tinggi artinya material mempunyai kemampuan banyak menyimpan panas /heat storage (Totok,dkk,2006).



Thermal conductivity yang digunakan sebagai material *tube* dan *superheater tube* pada boiler adalah sebesar 40,6 W/mK pada temperatur 100°C dan 32,8 W/mK pada temperatur 600°C ASME Sec II, (2010), dengan density sebesar 7750 kg/m³ ASME Sec II, (2010). Pada sub bab selanjutnya akan dijelaskan baja paduan untuk penelitian ini.

2.1.1 Baja Paduan

Baja (*steel*) merupakan material yang sering digunakan dalam kehidupan sehari-hari. Baja memiliki kandungan utama yaitu *ferrous* atau *iron*. Selain *ferrous* ada kandungan lain yang selalu ada pada baja yaitu karbon dan manganese. Baja dapat dibagi menjadi dua kategori yaitu baja standar dan baja *tool*. Berdasarkan komposisi baja standar dapat dibagi menjadi tiga kelompok yaitu baja karbon, baja paduan, dan baja tahan karat (Suherman, 1999).

Baja paduan merupakan baja yang mengandung unsur paduan dalam jumlah tertentu melebihi kadar yang biasa dijumpai dalam baja karbon. Unsur paduan yang sering ditambahkan pada baja paduan Cr, Ni, Mn, Si, W, Mo, V, Co, Ti, Al, Cu, Nb, Zr, B, N, dan Be, bahkan juga belerang dan fosfor. Penambahan unsur paduan biasanya dimaksudkan untuk memperbaiki sifat mekanik (terutama kekuatan, keuletan, ketangguhan) pada temperatur kamar, juga untuk temperatur tinggi maupun rendah, sifat tahan aus, sifat tahan korosi, *machinability* atau untuk memperbaiki sifat *hardenability* (sifat mampu-keras). Selain itu unsur paduan juga mempengaruhi reaksi atau responsnya terhadap pemanasan atau pendinginan (Suherman, 1999).

2.1.2 Baja AISI 4140

Baja AISI 4140 merupakan jenis baja paduan atau *alloy steel*. Baja AISI 4140 merupakan baja paduan rendah molybdenum yang mengandung kromium dengan kadar karbon 0,38 – 0,43%. Kandungan kromium pada temperatur tinggi membentuk oksida Cr₂O₃. Cr₂O₃ merupakan metal deficient semiconductor (p-type), yang melindungi paduan pada temperatur tinggi. Perlindungan

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



berupa oksida Cr_2O_3 akan terbentuk ketika material terpapar panas diatas 900°C . Selain itu terdapat kadungan molybdenum dimana pada temperatur 795°C akan membentuk oksida MoO_3 . Oksidan ini akan memberikan sedikit perlindungan pada paduan (*A 14-12-09-high-temperature notes*). Dengan adanya beberapa kandungan tersebut baja AISI 4140 dapat digunakan pada boiler, pipa, pembangkit listrik, ketel uap yang mampu beroperasi pada temperatur medium dan temperatur tinggi. Adapun komposisi kimia dari baja AISI 4140 pada Tabel 2.1. Selain itu sifat mekanik pada baja AISI 4140 dapat memenuhi untuk digunakan sebagai spesimen yang merefrentasikan *tube* dan *superheater tube* pada boiler yang dapat dilihat pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Komposisi Baja AISI 4140 (AZO Materials, 2012)

Komposisi	Wt.%	Komposisi	Wt.%
C	0,38 – 0,43	Cr	0,8 – 1,1
Mn	0,60 – 0,9	Mo	0,15 – 0,25
P	0,035	Fe	Balance
S	0,040		
Si	0,15 – 0,30		

Selain komposisi kimia, sifat mekanik bahan juga penting dalam menganalisis material Baja AISI 4140. Tabel 2.2 Sifat Mekanik Baja AISI 4140 berikut menjelaskan sifat-sifat mekanik yang dimiliki oleh material Baja AISI 4140.

Tabel 2.2 Sifat Mekanik Baja AISI 4140 (AZO Materials, 2012)

Properties	Nilai
Ultimate Tensile Strength (MPa)	655
Yield Strength (MPa)	415
Elongation (% in 50mm)	25,7
Hardness (HRB)	92
Temperature Melting ($^\circ\text{C}$)	1416



Baja AISI 4140 memiliki thermal conductivity sebesar 42,7 W/mK pada temperatur 100°C dan 33,1 W/mK pada 600°C Efunda, (2017). Density sebesar 7850 kg/m³ Azo (2012), sedangkan berdasarkan Efunda,(2017) sebesar 7700 kg/m³. Selain itu baja AISI 4140 memiliki specific heat sebesar 561 J/KgK pada temperatur 500 – 600°C.

2.1.3 Material Lain untuk Boiler

Berdasarkan ASME, Sec I, (2010), material yang digunakan sebagai material tube dan superheater tube pada dasarnya dapat berupa seamless carbon steel, seamless carbon molybdenum alloy steel, seamless carbon medium steel, seamless feritic dan austenitic alloy steel. Di dalam ASTM banyak terdapat jenis material seperti disebutkan diatas namun dalam Tabel 2.3 diberikan beberapa contoh material untuk tube dan superheater tube.

Tabel 2.3 Material yang dapat digunakan pada boiler

No	Grade	Jenis	Aplikasi
1	SA-192	Seamless Carbon Steel	Boiler tube dan penggunaan tekanan tinggi
2	SA-209	Seamless Carbon-Molybdenum Alloy Steel	Boiler dan Superheater tube
3	SA-210	Seamless Medium Carbon Steel	Boiler dan Superheater tube
4	SA-213	Seamless Feritic and Austenitic Alloy Steel	Superheater dan Heat Exchanger tube
5	SA-216	Carbon Steel Casting	Penggunaan temperatur tinggi
6	SA-217	Alloy Steel Casting	Penggunaan temperatur tinggi



2.2 Boiler

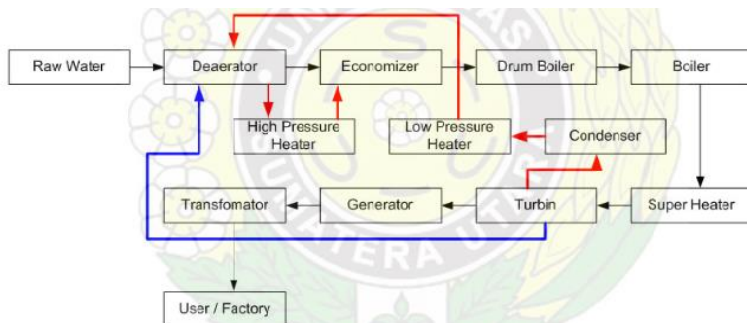
Boiler adalah bejana tertutup yang dirancang untuk mengubah air menjadi uap kering dengan cara dipanaskan. Panas yang diperlukan untuk membuat uap air ini didapat dari hasil pembakaran bahan bakar pada tempat pembakar. Boiler uap terdiri dari drum yang tertutup pada ujung serta pangkalnya, dan dalam perkembangannya dikenal dengan boiler pipa api dan boiler pipa air. Konstruksi boiler uap berhubungan dengan sifat yang dimiliki oleh air terutama uap serta peristiwa yang terjadi pada pembentukan uap. Naiknya temperatur air terjadi karena adanya paparan panas yang diberikan pada air melalui dinding boiler yang berisikan gas panas hasil pembakaran. Akibat pemberian panas secara terus menerus maka akan terbentuk gelembung - gelembung uap yang bergerak keatas permukaan. Hal ini akibat perbedaan berat jenis antara uap air dan air. Fenomena ini bersirkulasi secara terus menerus selama proses pembakaran bahan bakar tetap berlangsung (Sihombing, 2009). Sub bab selanjutnya akan membahas mekanisme atau sirkulasi pada boiler

2.2.1 Mekanisme Perubahan Air Menjadi Uap pada Boiler

Boiler adalah bejana tertutup dimana panas pembakaran dialirkan ke air sampai terbentuk air panas atau steam. Air panas atau steam pada tekanan tertentu kemudian digunakan untuk memutar turbin pembangkit energi listrik. Air adalah media yang berguna dan murah untuk mengalirkan panas ke suatu proses. Jika air di didihkan sampai menjadi steam, volumenya akan meningkat sekitar 1.600 kali, menghasilkan tenaga yang menyerupai bubuk mesiu yang mudah meledak, sehingga boiler merupakan peralatan yang harus dikelola dan dijaga dengan sangat baik. Sistem boiler terdiri dari: sistem air umpan, sistem steam dan sistem bahan bakar. Sistem air umpan menyediakan air untuk boiler secara otomatis sesuai dengan kebutuhan steam. Sistem steam mengumpulkan dan mengontrol produksi steam dalam boiler. Steam dialirkan melalui sistem pemipaan ke titik pengguna. Pada keseluruhan sistem, tekanan steam diatur



menggunakan valve dan dipantau dengan alat pemantau tekanan. Sistem bahan bakar adalah semua peralatan yang digunakan untuk menyediakan bahan bakar untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan. Peralatan yang diperlukan pada sistem bahan bakar tergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan pada sistem. Air yang disuplai ke boiler untuk dirubah menjadi steam disebut air umpan. Dua sumber air umpan adalah: kondensat atau steam yang mengembun yang kembali dari proses dan air make up (air baku yang sudah diolah) yang harus diumpankan dari luar ruang boiler dan plant proses. Untuk mendapatkan efisiensi boiler yang lebih tinggi, digunakan economizer untuk memanaskan awal air umpan menggunakan limbah panas pada gas buang.



Gambar 2.1 Sirkulasi air/uap pada boiler (Sihobing, 2009)

2.2.2 Komponen pada Boiler

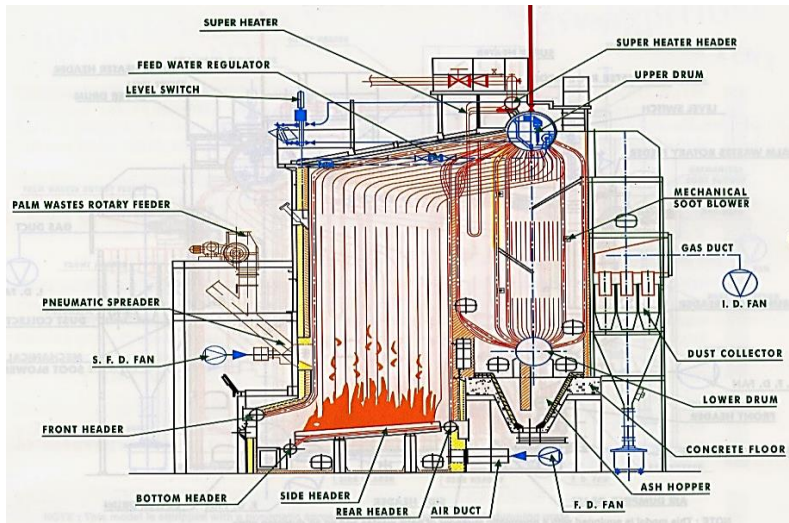
Boiler tersusun dari berbagai komponen-komponen dengan fungsinya masing-masing, antara lain :

1. Ruang Bakar (*Furnace*)

Yaitu tempat terjadinya pembakaran ampas dan minyak atau bahan bakar yang lain. Suhu di dalam ruang bakar berkisar $800^{\circ}\text{C} - 1000^{\circ}\text{C}$ tergantung dari zat kering bahan bakar. Untuk mendapatkan suhu ruang bakar yang tinggi perlu pengaturan dari udara hembus dan umpan bahan bakar. Untuk pembuangan abu masing-masing ketel



-
- menggunakan dumping grade, dan langsung di goreng agar tidak mengganggu proses pembakaran.
2. Baggase Feeder
Digunakan sebagai pengumpan ampas agar masuk ke dalam ruang bakar secara kontinu dan merata. Pemasukan ampas menggunakan *rotary valve* dengan mengatur bukaan pintu ampas.
 3. Main steam drum
Sebagai tempat masuk air dan sirkulasi air panas karena pembakaran sehingga terbentuk uap.
 4. Super heater
Digunakan untuk mengubah uap air menjadi uap kering dengan temperatur $500^{\circ}\text{C} - 550^{\circ}\text{C}$ karena uap yang mengandung air akan berbahaya bagi turbin. Cara kerjanya yaitu uap yang keluar dari *upper drum* ketel dimasukkan ke dalam pipa-pipa yang kemudian masuk ke dalam ruang bakar dan uap berubah menjadi uap kering.
 5. Penangkap debu (*Dust collector*)
Fungsinya sebagai penangkap debu sebelum gas asap keluar dari cerobong agar tidak terjadi polusi udara di lingkungan. Ketel pipa air menggunakan penangkap debu yaitu dengan cara dispray dengan air. Gas sisa pembakaran ditarik IDF, sehingga terjadi pusaran di spray dengan air disekelilingnya. Butiran-butiran abu yang halus akan jatuh ke talang bersama air lalu ke penampung abu.
 6. Economizer
Ekonomiser adalah piranti yang digunakan untuk memanaskan air umpan dengan memanfaatkan panas dari gas asap sebelum masuk ke cerobong (Bahrudin, 2014). Bagian boiler dapat dilihat seperti gambar 2.2 dibawah ini.



Gambar 2.2 Komponen Boiler (Bahrudin,2014)

2.3 Coating

Coating adalah sebuah pelapisan yang diterapkan pada permukaan suatu benda dengan cairan atau serbuk, yang akan melekat secara kontinu pada logam yang akan dilindungi. Tujuan penerapan lapisan mungkin dekoratif, fungsional, atau keduanya. Pelapisan terdiri dari 2 jenis, yaitu *liquid coating* dan *concrete coating*. *Liquid coating* biasanya berupa painting (pengecatan), sedangkan *concrete coating* adalah pelapisan menggunakan beton (Kurniawan, 2015). Konsep dasar pada coating adalah membatasi pengaruh lingkungan dengan substrat sehingga dengan proses coating ini diharapkan dapat menambah umur pakai pada substrat tersebut. Sekarang ini sudah banyak jenis bahan pelapisan untuk melapisi substrat, salah satunya dengan pelapisan logam. Logam metalik adalah penghalang yang berkesinambungan antara permukaan logam dan lingkungan (Supiyani,2012). Tingkat

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



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 homogen dan tidak mengandung pori

Banyak sistem coating yang digunakan untuk melindungi struktur baja mulai dari yang murah sampai dengan mahal. Semakin mahal suatu sistem pelapisan, maka kinerjanya semakin baik dan tahan lama dibandingkan sistem coating yang murah. *Coating* terdiri dari beberapa macam. Di antaranya primer coating, intermediate, dan topcoat.

A. Primer coating

Primer merupakan dasar atau alas dimana sistem coating lainnya ditempatkan. Primer merupakan kunci daya adhesi dari seluruh sistem coating. Primer harus menempel kuat pada logam pada sistem coating atasnya adapun fungsi dari coating sistem primer, yaitu adhesi ikatan yang kuat pada logam, cohesi kekuatan internal yang tinggi, ketahanan yang kuat terhadap korosi dan kimia, *intercoat bond* ikatan yang kuat pada intermediate coat, cukup fleksibel.

B. Intermediate Coating

Intermediate berfungsi pelindung tambahan. Disebut juga sebagai *body coat* untuk menambah tebal dan ketahanan. Formulasi intermediate sangat penting, utamanya untuk meningkatkan ketebalan yang dapat meningkatkan sifat-sifat



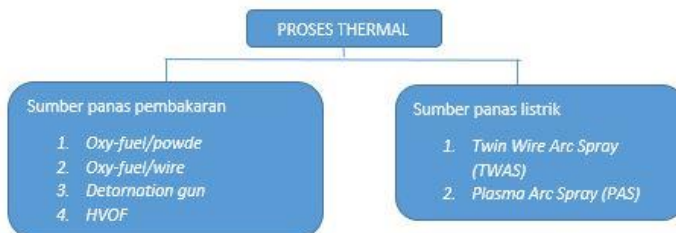
utama dari coating. *Body coat* ini harus menempel kuat pada primer dan juga pada top coat. Adapun fungsi dari *coating* intermediate, yaitu, menambah tebal sistem coating, mempunyai ketahanan yang kuat terhadap kimia, tahan terhadap uap air, mempunyai cohesi yang kuat, memiliki ikatan yang kuat antara primer coating dan top coating.

C. Top Coating

Topcoat merupakan suatu lapisan resin penyekat (*a resinous seal*) di atas intermediet dan primer. Ini merupakan pertahanan pertama terhadap chemical yang agresif, air, atau lingkungan, yang berfungsi sebagai barrier pertama dalam coating sistem. Top coat lebih padat dibanding intermediate coat karena jumlah pigmentnya lebih kecil. Adapun fungsi dari coating sistem topcoat, yaitu, sebagai lapisan penyekat dalam sistem coating, membentuk lapisan pertahanan pertama terhadap lingkungan, memberikan ketahanan terhadap chemical, air, dan cuaca, membuat permukaan menjadi tangguh dan tahan aus, memberikan keindahan. Sub bab selanjutnya akan menjelaskan metode coating yang digunakan dalam penelitian.

2.4 Metode Thermal Spray

Secara umum metoda thermal spray coating dibagi menjadi beberapa proses yaitu.

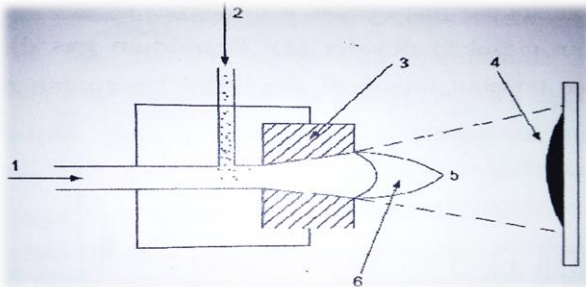


Gambar 2.3 Klasifikasi proses *thermsl spray* (Irawan.I, 2016)



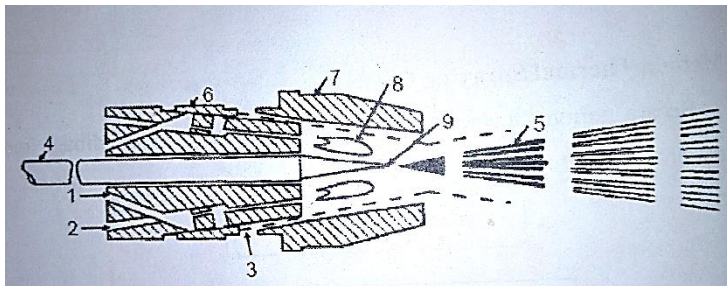
2.4.1 Thermo Spray dengan Sumber Panas Pembakar

Oxy-Fuel gas combustion atau dikenal dengan istilah *flame spraying* yang terdiri dari dua jenis masukan yaitu masukan *wire* (*wire flame spraying*) dan masukan *powder* (*powder flame spraying*). Metode *Oxy-Fuel gas combustion* digambarkan seperti Gambar 2.4 dan 2.5



Gambar 2.4 Skema proses *oxy - fuel* masukan powder (Pawlowski,2008)

1. Fluida gas (bahan bakar dan oksigen)
2. Masukan Powder
3. Area pembakaran
4. Hasil coating
5. *Particle stream*
6. *Combution flame*



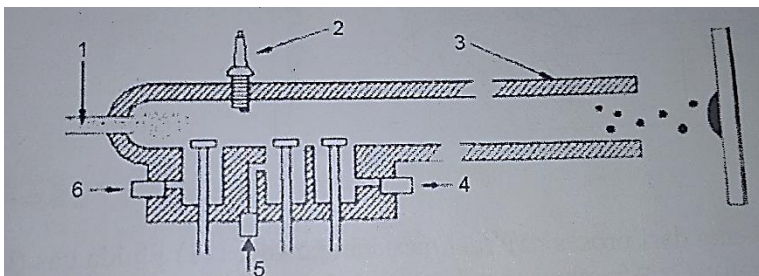
Gambar 2.5 Skema dari proses *oxy - fuel* wire (Pawlowski,2008)



1. Pemasukan oksigen
2. Pemasukan bahan bakar
3. Pemasukan udara bertekanan tinggi
4. Wire/rod
5. Stream of molten droplet
6. Nozzle untuk gas kerja
7. Compressed air cap
8. Flame
9. Molten end of wire

Proses *thermal spray* dengan metode pembakaran gas memiliki komposisi gas yang bercampur dengan oksigen sekitar 1:1 hingga 1:1,1 dengan menghasilkan temperatur bakar sekitar 3000 hingga 3350 K (2727°C – 3077°C) dengan kecepatan pembakaran mencapai 80 hingga 100 m/s. Untuk masukan powder ukuran partikel sekitar 5 – 100 mikron dan feed rate sekitar 50 hingga 100 g/min. Untuk masukan wire / rod ukuran wire beragam mulai dari 3 hingga 6 mm dengan feed rate 40 hingga 60 gr/min.

Detonation gun merupakan salah satu metode *thermal spray* yang menghasilkan porositas hasil coating yang sangat kecil. Adapun prinsip kerja dari metoda ini yaitu campuran antara oksigen (4) dan asetilen (5) yang masuk melalui satu saluran bersama dengan masukan powder (1). Kemudian gas dinyalakan muncul ledakan dan ledakan tersebut membuat akselerasi kecepatan dari powder menuju substrat. Metode *detonation gun* seperti gambar dibawah ini



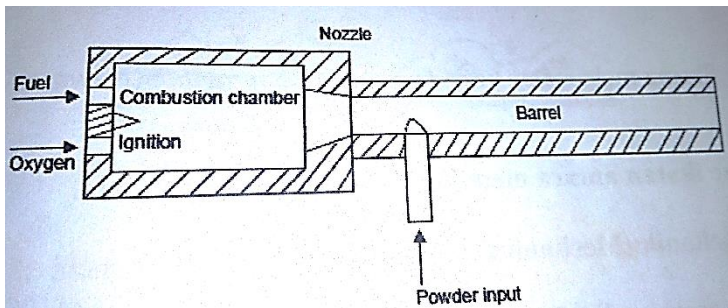
Gambar 2.6 Skema dari proses detonation gun (Pawlowski,2008)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



1. Tempat powder dimasukan
2. Spark plug
3. Gun barrel
4. Tempat oksigen dihembuskan
5. Tempat masukan nitrogen
6. Plug

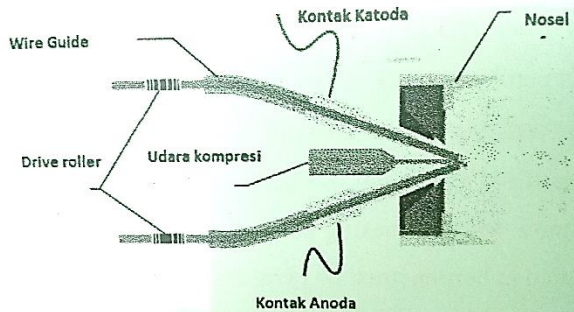
High Velocity Oxy-Fuel (HVOF), HVOF adalah jenis thermal spray yang membutuhkan oksigen dan bahan bakar gas pada tekanan tinggi. Jenis bahan bakar yang digunakan adalah propana, propelina, dan hydrogen. Bahan bakar dan oksigen dicampur dan mengubahnya dalam ukuran yang sangat kecil dalam ruang pembakaran di bawah kondisi yang terkontrol pembakarannya maupun tekanannya. Proses ini menghasilkan kecepatan sangat tinggi yang digunakan untuk mendorong partikel guna mendekati kecepatan suara (supersonic) sebelum menumbuk substrat. Paduan antara oksigen dan bahan bakar (methana, propana) yang teratomisasi disudut dengan api dan menghasilkan temperatur yang mendekati 3.000°C. Bubuk disemprotkan ke dalam ruang pembakaran dengan menggunakan nitrogen dan meleleh. Udara dengan tekanan tinggi dan oksigen yang tekanannya terkontrol menghasilkan gumpalan-gumpalan bubuk cair berbentuk intan dengan kecepatan yang sangat tinggi. Sub bab selanjutnya akan menjelaskan *Twin Wire Arc Spray* sebagai metode perlindungan coating pada penelitian ini. Metode HVOF ditunjukkan seperti Gambar 2.7



Gambar 2.7 Skema proses spray *High Velocity Oxy- Fuel* (HVOF) (Pawlowski,2008)

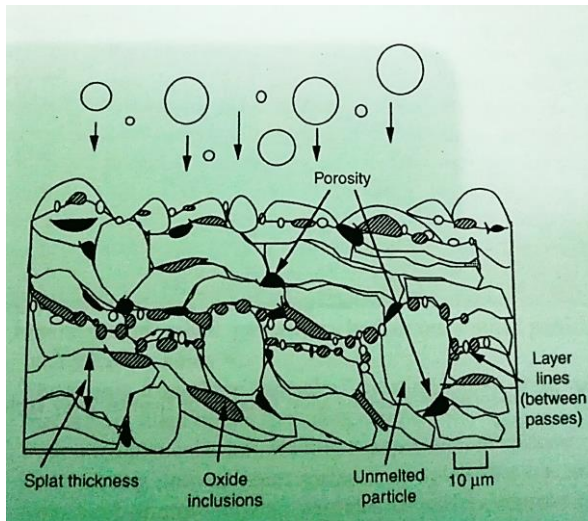
2.4.2 Twin Wire Arc Spray (TWAS)

Twin Wire Arc Spraying, merupakan metoda yang menggunakan material spray berupa kawat yang dilelehkan melalui busur listrik, proses menggunakan dua buah wire sebagai elektroda yang kemudian dihubungkan ke sumber energi dengan arus tingg Direct Current (DC) kemudian dipertemukan dengan dimasukkan ke dalam pistol sehingga membentuk busur diantara kedua elektroda tersebut yang akan digunakan untuk mencairkan bahan pelapis. Lalu droplet diakselerasikan dengan aliran gas inert, namun temperatur turun dratis setelah melewati wire tip. Partikel spray cair membentuk spat ketika membentur substrat karena efek temperatur dan energi kinetik yang tinggi. Partikel spray cair tersebut memipih, pecah, menyebar dan ter-*quech* pada rentang waktu yang pendek sekitar 10^{-8} dan 10^{-6} s. Meskipun temperatur pemanasan partikel/wire dinaikan hingga berada diatas temperatur solid substrat namun reaksi fusi tetap tidak terjadi karena laju pendinginan sangat cepat.



Gambar 2.8 Skema mekanisme spray *twin wire arc spray* (Irawan, 2016)

Setiap lapisan coating memiliki struktur lamellar, sebaran porositas, sebaran oksida, dan sebaran *un-melted* material. Mikrostruktur lapisan coating di bagi menjadi tiga fase : (1) struktur *light lameran*, (2) struktur *grey lamellar*, (3) *un-melted material*. Untuk melihat mikrostruktur dari lapisan coating dapat dilihat seperti Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Penampang melintang lapisan coating

Dari pada Gambar 2.9 *light lamellar* adalah lapisan paling terang pada gambar dimana itu merupakan paduan yang menyusun *wire coat* pada *therma spray*. *Oxide stringger* atau *grey lamellar* merupakan dalam lapisan coating secara umum terlihat lebih gelap yang terlihat pada penampang melintang coating. Oksida ini terbentuk karena *splat* bereaksi dengan lingkungan disekitarnya sebelum *splat* membeku atau menjadi bentuk yang solid. Berekasinya *splat* dengan lingkungan sekitar seperti udara biasanya mengawali terbentuknya oksida ataupun nitrida. Hal ini disebabkan karena *dwell time* yang lama dan tingginya temperatur *splats*. Sedangkan *unmelting material* dapat menyebabkan terjadinya porositas pada lapisan coating (Davis, 2004). Porositas adalah salah faktor yang berpengaruh pada propertis lapisan coating. Sama halnya pada *oxide stringger* pada lapisan coating akan menurunkan karakteristik dari lapisan coating (Davis, 2004).

Adapun prinsip parameter pada proses *electric arc spray* adalah sebagai berikut :

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



a. Elektrik Arc

- ✓ Power Elektrik : berkisar 5 – 10 kW (Pawlowski, 2008).
- ✓ Temperatur busur dan arus : 6100°K dengan arus busur 280A (Marantz, 1974).
- ✓ Tegangan busur : berkisar antara 20 - 40V (Pawlowski, 2008).

b. Wires

- ✓ Material : jenis material kawat yang bersifat penghantar listrik (konduktif). Material yang pertama akan bertidak sebagai katoda dan material yang kedua sebagai anoda (Fauchais, 2012).
- ✓ Diameter : 1,6 – 5,0 mm. (Pawlowski, 2008).
- ✓ Kecepatan partikel : partikel cair terbentuk dari kawat yang dapat mencapai kecepatan hingga 150 m/s (Rudzki, 1993).
- ✓ Jarak *Spray* : 50 mm – 250 mm (Sarikaya, 2005).
- ✓ Tekanan gas atomisasi: berkisar antara 4 - 5 bar..
- ✓ Laju aliran gas atomisasi : berkisar antara 20 sampai 1300 slpm. Porositas akan menurun dengan meningkatnya laju aliran gas, hal tersebut dapat menyebabkan meningkatnya ketahanan korosi dan ketahanan abrasi pada hasil pelapisan (Maranho dkk, 2008).

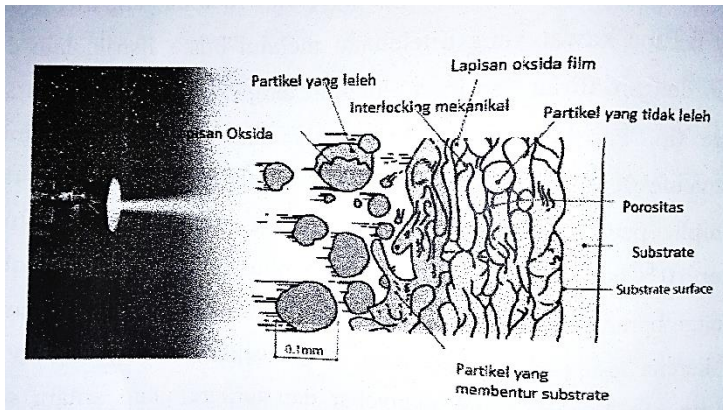


Tabel 2.4 Properti dari Berbagai Teknik Logam (ASM Handbook Volume 5, 1994)

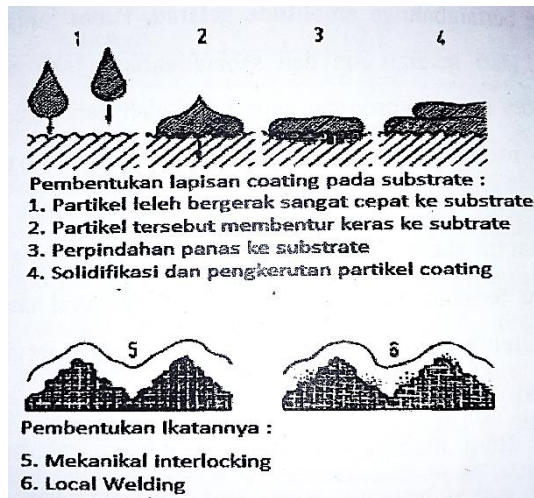
Teknik Pelapisan	Kec. Partikel (m/s)	Adhesi (MPa)	Kandungan Oksida (dalam logam %)
Flame	40	<8	10-15
Arc	100	10-30	10-20
Plasma	200-300	20-70	1-3
HVOF	600-1000	>70	1-2
Teknik Pelapisan	Porositas (%)	Laju Deposisi (kg/jam)	Deposit Ketebalan (mm)
Flame	10-15	1-10	0.2-10
Arc	5-10	6-60	0.2-10
Plasma	5-10	1-5	0.2-2
HVOF	1-2	1-5	0.2-2

2.5 Mekanisme Ikatan Pelapisan Logam Secara Mekanik

Ikatan mekanik atau lebih dikenal dengan *mechanical interlocking* adalah ikatan coating dengan substrate dikarenakan adanya penguncian secara mekanik (mechanical interlocking) pada bagian permukaan yang berkontak secara langsung antara substrat dan pelapis. Efek tersebut mem bentuk lapisan coating yang kontinyu seperti pada Gambar 2.10 dan Gambar 2.11



Gambar 2.10 Skema proses pembentukan ikatan coating dengan substrate (Irawan, 2016)



Gambar 2.11 Skema interaksi bonding pada *twin wire arc spray* (Irawan,2016)

Ikatan adhesif secara efektif, terjadi pada kontak area antara partikel dengan substrate. Partikel yang disemprotkan oleh nozzle termal spray berada di kondisi temperatur tinggi. Mengakibatkan



partikel ini bersifat sangat ulet atau bahkan meleleh. Pada saat partikel ini bersentuhan dengan substrat maka terjadi mekanisme quenching hingga muncul tegangan pada lokal tersebut. Tegangan ini berhubungan dengan energi menarik ikatan atom bila partikel berada pada keadaan leleh. Adesif antara substrat dan material pelapis sebagian besar ditentukan dengan ikatan ini (Otto Knotek, 2001). Gaya yang bekerja pada ikatan ini adalah gaya gerak atomik pada bidang padat kristalin, disaat partikel tersebut saling mendekat hingga sangat dekat mencapai level jarak atomik membuat peluang terjadinya ikatan van der Waals dan ikatan valensi menjadi besar. Antara spray partikel dengan spray partikel disekitarnya, dan juga antara spray partikel dengan substrate, leleh dan berdifusi dalam dimensi mikro tetap terjadi meskipun laju pendinginan sangat tinggi (Irawan, 2016).

2.6 Mekanisme Ikatan Logam Secara Difusi

Pada saat temperatur meningkat, maka atom – atom dalam suatu material akan bergetar dengan energi yang lebih besar, dimana pada suatu kenaikan temperatur tertentu akan ada sejumlah atom yang berpindah dari kisi atom tersebut. Perpindahan sejumlah atom disebabkan adanya energi yang disebut energi aktivasi.

Pada temperatur tertentu, tidak semua atom mempunyai energi yang sama. Oleh karena itu terdapat suatu spektrum energi diantaram atom – atom. Mulai dari nilai mendekati nol sampai nilai yang sangat tinggi. Tentunya sebagian besar memiliki nilai energi mendekati rata – rata. Dengan spektrum energi tadi memungkinkan suatu atom mempunyai cukup energi untuk melepaskan ikatannya dan melompat keposisi baru. Gerakan atom atau molekul pada struktur mikro pada material solid disebut sebagai difusi.

Difusivitas bergantung pada beberapa faktor, antara lain: jenis atom yang terlarut, struktur material padatnya dan perubahan temperatur. Beberapa difusivitas atom dapat dilihat pada Tabel 2.5



Tabel 2.5 Beberapa difusivitas atom (Irawan, 2016)

Yang Larut	Pelarut (Stuktur Induk)	Difusivitas m ² /sec	
		500°C	1000°C
Karbon	Besi Kps	5x10 ⁻¹³	3x10 ⁻¹¹
Karbon	Besi Kps	1x10 ⁻¹²	2x10 ⁻⁹
Besi	Besi Kps	2x10 ⁻²³	2x10 ⁻¹⁶
Besi	Besi Kps	1x10 ⁻²⁰	3x10 ⁻¹⁴
Mangan	Besi Kps	3x10 ⁻²⁴	1x10 ⁻⁶

Berdasarkan Tabel 2.5 setiap material memiliki nilai koefisien difusi yang berbeda. Hal ini karena temperatur yang lebih tinggi akan menghasilkan difusivitas yang tinggi pula. Dalam kondisi temperatur yang tinggi, atom – atom memiliki energi thermal yang besar, oleh karena itu atom lebih mudah untuk melampaui atau melewati energi penghambat antar atom.

Difusivitas dipengaruhi oleh temperatur, hal ini karena pada proses berpindahnya atom diperlukan energi aktivasi. (Irawan, 2016). Sub bab selanjutnya akan menjelaskan material yang digunakan sebagai material coating.

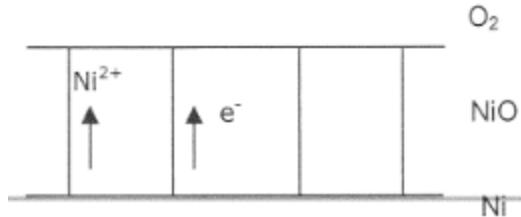
2.7 *Nickel – Alumunium Bond Coat*

Nickel dan aluminum merupakan dua unsur yang mampu memberikan proteksi pada paduan yang terpapar temperatur tinggi.

Nickel adalah unsur yang membentuk oksida yang stabil pada temperatur tinggi dalam bentuk NiO yang merupakan metal deficient semiconductor (p-type,). Selama oksidasi pada nikel murni, NiO terbentuk dari perpindahan ion N²⁺ yang bereaksi dengan O₂ pada permukaan logam. Penambahan unsur Ni hingga 70% akan memberikan kekuatan dan ketangguhan pada matriks, menjadikan matriks memiliki fasa austenite yang stabil pada temperatur tinggi dan dapat menghindari terbentuknya fasa gamma yang getas, serta meningkatkan ketahanan oksidasi, karburisasi, nitridisasi juga meningkatkan resistansi terhadap *thermal fatigue*.



Oksida yang terbentuk seperti Gambar 2.12 (A 14-12-09-high-temperature notes)



Gambar 2.12 Oksida yang terbentuk pada nickel (A 14-12-09-high-temperature notes)

Alumunium adalah salah satu jenis unsur yang sangat baik untuk perlindungan temperatur tinggi. Alumunium membentuk protektif oxide (Al_2O_3) yang baik digunakan untuk melindungi paduan pada temperatur $1300\text{ }^\circ\text{C}$ (A 14-12-09-high-temperature notes)

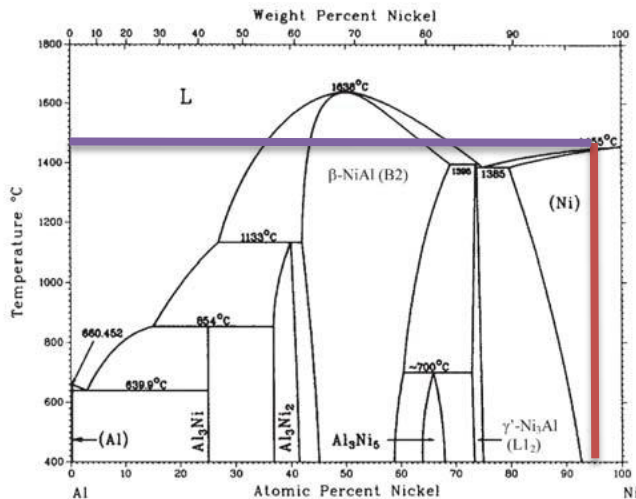
Nickel aluminum coating merupakan salah satu jenis *coating* yang sangat potensial. Campuran Ni-Al pada *wire*, ketika *dispraying* bereaksi secara eksotermal untuk membentuk *nickel aluminide* (Ni_3Al). Reaksi ini meningkatkan kekuatan adhesi ke substrat. Selain itu, *coating* jenis ini juga bisa digunakan untuk ketahanan aus dan *bond coat* pada material *coating* jenis keramik (Chaitanya, 2007). *Coating* berbasis nikel juga digunakan untuk kombinasi dari ketahanan oksidasi dan korosi pada temperatur tinggi. Ketahanan terhadap temperatur tinggi semakin terlihat jika dioperasikan pada temperatur di atas 600°C (Chaitanya, 2007).

Nickel aluminide (Ni_3Al) merupakan senyawa yang memiliki ketahanan terhadap *creep* pada temperatur tinggi. Pada diagram fasa Ni-Al (Gambar 2.13), pada paduan dengan komposisi 22 – 28% Al akan membentuk lapisan protektif aluminium oksida yang meningkatkan ketahanan material terhadap temperatur tinggi. Sedangkan unsur nikel meningkatkan *wetability*, sehingga ketahanan kohesinya meningkat.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Penambahan elemen *deoxidizing* Ni-Al dalam metrik Fe-Cr coating membuat presentase oksida menurun dan meningkatkan area *active zones* sehingga berpengaruh terhadap sifat adhesifnya. Penggunaan Ni-Al sebagai *bond coat* pada lapisan coating *Fe-based amorphous coating* dinilai baik, karena sifat uletnya serta memiliki Coefficient Thermal Expansion (CTE) yang tidak terlalu jauh dengan baja, sehingga tegangan yang terjadi pada saat adanya gesekan dan panas dapat diminimalisir (Pawlowsky, 2008). Untuk melihat titik melting paduan Ni - Al dapat dilihat seperti Gambar 2.13 dibawah ini. Dimana pada paduan Ni 95% dengan Al 5% memiliki titik melting 1415°C.



Gambar 2.13 Diagram Fasa Ni-Al (Okkamuto,1993)

Coefisien thermal expansion adalah nilai yang diberikan pada suatu material ketika mengalami perubahan bentuk ketika diberikan panas (pemuain) atau ketika mengalami pendinginan (penyusutan) (ASM, chap 2, 1994).

Pada coating CTE ini perlu diperhatikan karena ini berhubungan dengan bonding yang terjadi antara material coating dengan material substrate. Pemilihan material coating harus



memiliki nilai CTE yang tidak jauh berbeda dengan nilai CTE dari material substrate. Berdasarkan ASM chap 2, (1994) nilai CTE untuk AISI 4140 adalah 11-14 dan untuk paduan Ni-Al berdasarkan pawlowski, (2008) adalah 13,5. Nilai CTE antara materila coating dan baja AISI 4140 tidak terlalu jauh, dan paduan Ni-Al dapat melapisi baja AISI 4140.

2.8 *Fe-Cr-B-Mn-Si Top Coating*

Fe-Cr-B-Mn-Si self fluxing alloying system amorphous coating. Merupakan salah satu jenis *coating* yang tersedia di pasaran. Jenis *metallic coating* ini menghasilkan fasa *amorphous nanocrystalline* yang memiliki ketahanan aus yang tinggi, ketahanan erosi serta ketahanan korosi. Fasa *amorphous nanocrystalline* terbentuk karena adanya matriks metalik Fe-Cr *coating* dan beberapa jenis borida. Matriks tersebut terdiri dari fasa *amorphous* dan butiran *nanocrystalline*. Pembentukan fasa *amorphous* disebabkan oleh laju pendinginan yang tinggi dan terbentuknya sistem multi komponen yang efektif akibat penambahan unsur Cr, Mn, Si dan B. Sedangkan butiran *nanocrystalline* dihasilkan dari rekristalisasi fasa *amorphous* selama proses *thermal spray*, dimana juga terjadi proses pengintian di daerah *inner* dan *interface amorphous regions* (Yuping,dkk, 2006).

Beberapa elemen yang terkandung dalam *metallic coating* ini, seperti boron yang membuat pengerasan secara signifikan melalui pembentukan *interstitial solid solution* atau melalui proses pembentukan *hard-fine grained precipitated. Solid solution hardening* selalu dapat terjadi di dalam fasa besi selama proses solidifikasi partikel *coating*. Faktanya beberapa elemen seperti B, Si dan Cr dapat larut di dalam fasa Fe dan menghasilkan kekerasan yang tinggi melalui mekanisme *solution hardening*. Selain itu dengan penambahan transformasi *martensite, strain hardening* dan pembentukan lapisan oksida pelindung yang tebal adalah mekanisme yang membuat *coating* dapat tahan terhadap aus (Shukla, 2014). *Jenis wire coating* yang biasa digunakan untuk

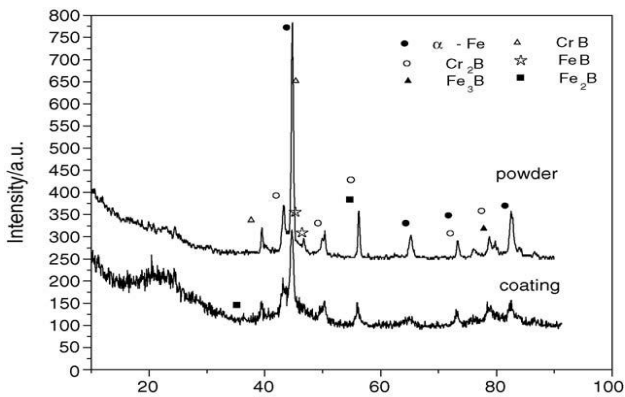


tube boiler dan *superheater* adalah $\text{Fe}_{64}\text{Cr}_{29}\text{B}_{3,75}\text{Mn}_{1,65}\text{Si}_{1,6}$ dengan merk dagang TAFE 95 MXC.

Beberapa penelitian yang menunjukkan keunggulan jenis *wire coating* ini diantaranya, pada penelitian Zheng Zhou, dkk menunjukkan bahwa material substrat SA213 T22 yang *dicoating* dengan Fe-xCr (15,20,25,30,35,40%) menggunakan metode *wire arc spray*, menunjukkan hasil *coating* yang homogen dan tingkat porositas yang rendah. Selain itu dari uji DSC menunjukkan bahwa hasil *coating* mampu bertahan sampai temperatur 650°C di bawah kondisi oksidasi.

Sedangkan pada penelitian Shukla, dkk menunjukkan bahwa material substrat SS310 yang *dicoating* dengan FeCrBSiMn menggunakan metode *wire arc spray*, menunjukkan bahwa hasil *coating* mampu bertahan sampai temperatur 900°C dalam lingkungan garam cair (Na_2SO_4 -82% $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$).

Senyawa yang terbentuk setelah aplikasi *coating* ke substrat dapat dilihat dari hasil XRD lapisan *coating* Fe-Cr-B-Mn-Si pada Gambar 2.14.

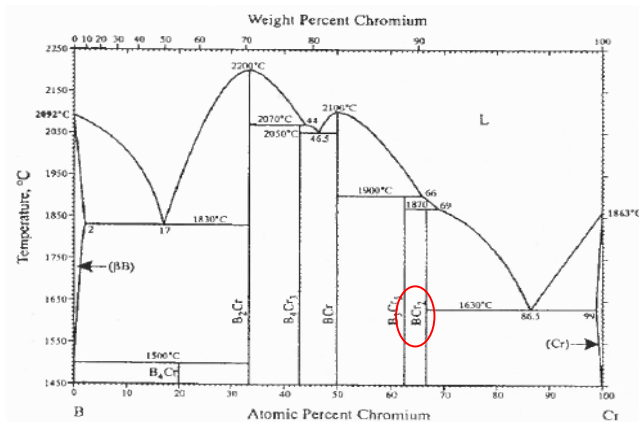


Gambar 2.14 Pola XRD *Powder Coating* dan Hasil *Metallic Amorphous Coating* Fe-Cr-B-Mn-Si (Yuping dkk, 2006)



Pola XRD pada Gambar 2.13 merupakan hasil *metallic amorphous coating* Fe-Cr-B-Mn-Si terhadap material *stainless steel* sebagai substrat, pada rentang $2\theta = 10 - 90^\circ$. Pola XRD menunjukkan bahwa adanya puncak difraksi pada $2\theta = 45^\circ$ dan 65.5° , yang mengindikasikan keberadaan fase amorfus. Pada puncak yang lebar menandakan adanya fase kristalin yang terbentuk adalah senyawa CrB, Cr₂B, Fe₃B, FeB, Fe₂B dan larutan padat α -Fe. Sedangkan pada puncak yang paling tajam terdapat larutan padat α -Fe dan paduan CrB (Yuping, dkk, 2006).

Berdasarkan komposisi kimia *wire coating* yang digunakan yaitu Fe₆₄Cr₂₉B_{3,75}Mn_{1,65}Si_{1,6} dan merujuk pada hasil XRD pada Gambar 2.15, maka prediksi paduan yang terbentuk pada saat aplikasi *coating* dapat diamati dari diagram fasa Cr-B pada Gambar 2.15. Pada diagram fasa Cr-B dengan mengacu komposisi *wire coating*, dengan komposisi boron 3,75% maka senyawa yang kemungkinan besar terbentuk adalah Cr₂B. Senyawa *chrom bromide* atau Cr₂B merupakan senyawa keras yang mampu meningkatkan kekuatan aus serta ketahanan korosi temperatur tinggi pada material *coating* (Yuping, dkk, 2006).

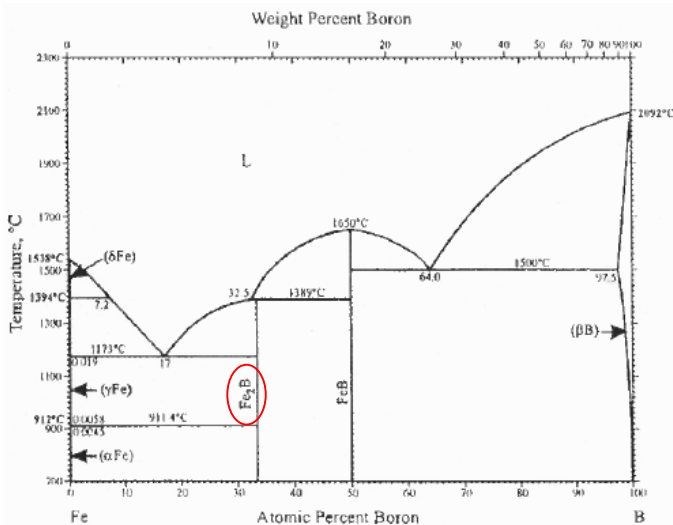


Gambar 2.15 Diagram Fasa Cr-B (Kanaizuka, 1981)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

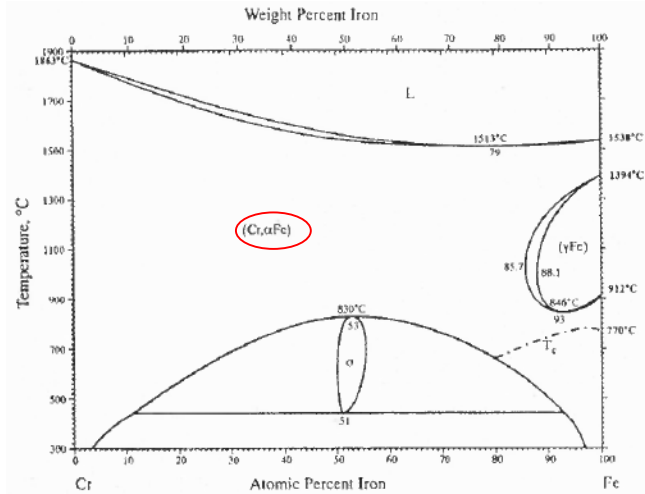


Berdasarkan komposisi *wire coating* dengan komposisi boron sebesar 3,75% membuat boron berikatan dengan Fe menjadi senyawa keras *iron bromide* (Fe_2B) seperti terlihat pada Gambar 2.16. Senyawa ini memiliki nilai kekerasan yang tidak jauh berbeda dengan *chrom bromide*, sehingga dapat menghasilkan lapisan *coating* yang tahan terhadap aus (Yuping, dkk, 2006).



Gambar 2.16 Diagram Fasa Fe-B (Kanaizuka, 1981)

Berdasarkan komposisi *wire coating* dengan komposisi Fe dan Cr sebesar 64% dan 29%, memberikan kemungkinan terbentuknya fasa intermetalik (Fe-Cr fasa alfa dan Fe-Cr fasa sigma) seperti terlihat pada Gambar 2.17. Fasa intermetalik Fe-Cr tidak memiliki kekerasan sebesar *chrom bromide* dan *iron bromide*, namun berpengaruh terhadap ketangguhan lapisan *coating*, sehingga tidak mudah terkelupas saat menerima beban kejut (Yuping, dkk, 2006).



Gambar 2.17 Diagram Fasa Fe-Cr (Kanaizuka, 1981)

Unsur lain yang memiliki pengaruh yang sangat penting adalah silikon. Kandungan silikon yang cukup akan berguna untuk meningkatkan kemampuan pembentukan *glass formation*. Pada waktu yang bersamaan, silikon dapat bereaksi dengan Fe dan Cr untuk membentuk *silicides* yang memiliki kekerasan mikro yang tinggi. Silikon merupakan elemen utama yang mempunyai ketahanan oksidasi yang baik. Dibandingkan dengan logam lain seperti Fe dan Cr, silikon memiliki keuntungan yaitu reaktif dengan oksigen membentuk SiO_2 . Selain itu dengan adanya silikon bisa menjadi deoksidizer pada oksida logam yang terjebak di dalam coating. Sama halnya dengan silikon, kandungan boron yang mudah teroksidasi dengan logam lainnya membentuk B_2O_3 . Namun SiO_2 menunjukkan lebih baik perkembangan deoksidatornya daripada B_2O_3 . SiO_2 berada pada permukaan logam cair dan dengan cara ini dapat menjaga oksidasi dari logam cair tersebut. Kunci utama penambahan silikon sebagai *self fluxing agent* menghasilkan *coating thermal* dengan kandungan oksida yang rendah. Sebab telah dipisahkan dari *molten metal* dengan

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



kandungan oksigennya oleh silikon dengan terbentuknya lapisan SiO_2 pada partikel *molten metal* tersebut (Khanlari, 2015).

Boron juga memiliki kemampuan pembentuk *glass formation*. Namun dengan penambahan boron akan menurunkan stabilitas termal struktur kristalin. Faktanya, boron mendukung terbentuknya ikatan dan memicu untuk meningkatkan *bulk modulus*. Selain itu boron dapat meningkatkan kekerasan *coating* dengan pembentukan fasa keras di dalam *coating* dan juga melalui proses *solid solution strengthening* di dalam fasa Fe. Boron juga menurunkan temperatur leleh dan membantu terbentuknya fasa keras (Khanlari, 2015 dan Linda, dkk, 2011).

Kandungan Cr pada rentang 19 – 29% di samping sebagai pengoksidasi parsial selama proses deposisi, juga dapat meningkatkan kekerasan, ketahanan aus, dan ketahanan korosi. Selain itu, Cr juga dapat digunakan sebagai penghalus butir untuk meminimalisir potensi keretakan pada lapisan *coating* (Khanlari, 2015).

Dari hasil XRD pada Gambar 2.14 menunjukkan adanya fasa amorfus pada lapisan *coating*. Hal ini mengindikasikan bahwa di dalam hasil *coating* berbasis Fe-Cr yang memiliki *Glass Formation Ability* (GFA) yang cukup besar. Nilai GFA *coating* erat hubungannya dengan struktur atom. Komposisi utama *wire coating* yang digunakan adalah Fe-Cr-B-Mn-Si, dimana sudah memenuhi dasar empiris dari sistem yang diperkenalkan oleh Inoue yaitu besaran GFA dipengaruhi oleh (1) Sistem paduan multi komponen yang terdiri minimal tiga unsur penyusun, (2) Memiliki perbedaan rasio ukuran atom di atas 13%, dan (3) Memiliki kecocokan nilai pencampuran panas negatif dari unsur. Pengaruh penambahan unsur Cr, Mn, Si dan B menyebabkan perubahan bertahap pada ukuran atom, dimana $\text{Si} (1,34) > \text{Mn} (1,32) > \text{Fe} (1,24) > (0,95)$. Perbedaan tersebut membuat terbentuknya pasangan atomik baru dengan berbagai hasil *negative heat mixing* (Yuping, dkk, 2006). Hasil hipotesa tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.17, dari hasil *DSC scan* hasil dari temperatur ruang (25°C) sampai temperatur 900°C . Menunjukkan pembentukan dua *exothermic solid state* pada



temperatur 605°C dan 719°C, dimana puncak di 605°C lebih tinggi dari puncak 719°C. Hal tersebut menandakan terjadinya rekristalisasi fasa amorfus pada *coating* yang didukung dengan adanya transformasi *solid state* selanjutnya pada temperatur 719°C (Yuping, dkk, 2006).

2.9 Pengaruh Parameter pada *Arc Spray*

Metode *arc spray* diketahui mempunyai teknik pelapisan yang cepat dan laju percikan yang tinggi untuk menghasilkan lapisan logam yang baik. Mikrostruktur lapisannya tergantung pada banyaknya parameter spray yang digunakan (Irawan, 2016). Metode *wire arc spray* ini secara prinsip terdiri dari lelehan logam yang didorong (partikel yang disemprotkan) oleh gas yang bertekanan tinggi menuju permukaan substrat. Partikel-partikel tersebut akan menjadi percikan setelah mendapat dorongan yang menuju ke lapisan substrat. Percikan tersebut melekat di permukaan substrat melalui mekanisme *interlocking*, yang kemudian terbentuk fenomena kohesi dengan percikan tersebut. Partikel dan percikan tersebut kemudian membentuk lapisan mikrostruktur dan karakterisasinya. Untuk variasi tekanan gas akan diberikan beberapa contoh dari penelitian sebelumnya pada sub bab berikut ini.

2.9.1 Pengaruh Tekanan Gas

Pada penelitian yang dilakukan oleh (Daengmool, 2006), menunjukkan bahwa jarak *nozzle* dan tekanan gas mempunyai pengaruh terhadap hasil percikan. Semakin dekat jarak *nozzle* akan menghasilkan ukuran percikan yang lebih besar, sedangkan tekanan gas yang besar akan menghasilkan ukuran percikan yang lebih kecil. Selain itu, tingkat porositas dan ketebalan lapisan lebih dipengaruhi oleh tekanan gas daripada jarak *nozzle*. Semakin tinggi tekanan gas yang diberikan, maka ketebalan lapisan dan porositasnya semakin meningkat.

Pengaruh tekanan gas terhadap *wire arc spray* sangat berpengaruh terhadap hasil dari bentuk partikel atau *droplet* yang



akan dihasilkan, sehingga perbedaan dari ukuran partikelnya juga akan mempengaruhi kandungan oksida dan sifat porositasnya. Tekanan gas juga dapat berpengaruh pada semburan lelehan kawat sebagai material pelapis ke permukaan substrat. Sehingga jika tingkat tekanan berbeda menyebabkan semburan lelehan kawat juga berbeda, maka akan menyebabkan tingkat kekasaran permukaan juga berbeda (JiXiu, 2005).

Berdasarkan penelitian fitrianova (2014) yang menggunakan material pelapisan Ni-20Cr dengan metode *wire arc spray*, menunjukkan bahwa pengaruh jarak *nozzle* dan tekanan gas pada 300 mm dan 4 bar menunjukkan stabilitas termal yang baik pada temperatur 25-945°C, dikarenakan pada jarak dan tekanan ini oleh hasil *coating* dengan jarak dan tekanan ini memiliki nilai porositas terkecil yaitu sebesar 3.177 μm , sehingga memiliki daya lekat sebesar 14 MPa dan ukuran kekasaran sebesar 4.64 μm .

Sedangkan pada penelitian shauma (2016) tentang pengaruh tekanan gas dan jarak *nozzle* pada proses pelapisan aluminium terhadap ketahanan thermal dan daya lekat, didapatkan kesimpulan bahwa pada jarak *nozzle* 300 mm dan tekanan gas 5 bar menunjukkan stabilitas thermal yang baik pada temperatur 25-1000°C. Dikarenakan pada jarak *nozzle* dan tekanan gas tersebut hasil *coating* tersebut memiliki nilai porositas terkecil yaitu sebesar 27,22%, sehingga memiliki daya lekat sebesar 8,64 Mpa dan ukuran kekasaran sebesar 15,79 μm .

Pada hasil penelitian yang dilakukan oleh wang (1999) semakin tinggi tekanan gasnya semakin baik porositasnya, yaitu tekanan gas 0,31 MPa porositasnya 27% (± 4), 0,45 MPa porositasnya 18% (± 4), dan 0,59 MPa porositasnya 12% (± 3). Semakin tinggi tingkat porositasnya maka densitas hasil pelapisannya juga akan menurun (Wang, 1999). Tingginya tingkat porositas ini akan menurunkan sifat ketahanan korosi dan kekuatan kohesif dari hasil pelapisan (Sidhu, 2006). Kecepatan atomisasi gas atau *air flow rate* yang dihasilkan dari tekanan gas sangat memberikan pengaruh terhadap kualitas dari pelapisan yang dihasilkan (Gedzevicius, 2003).

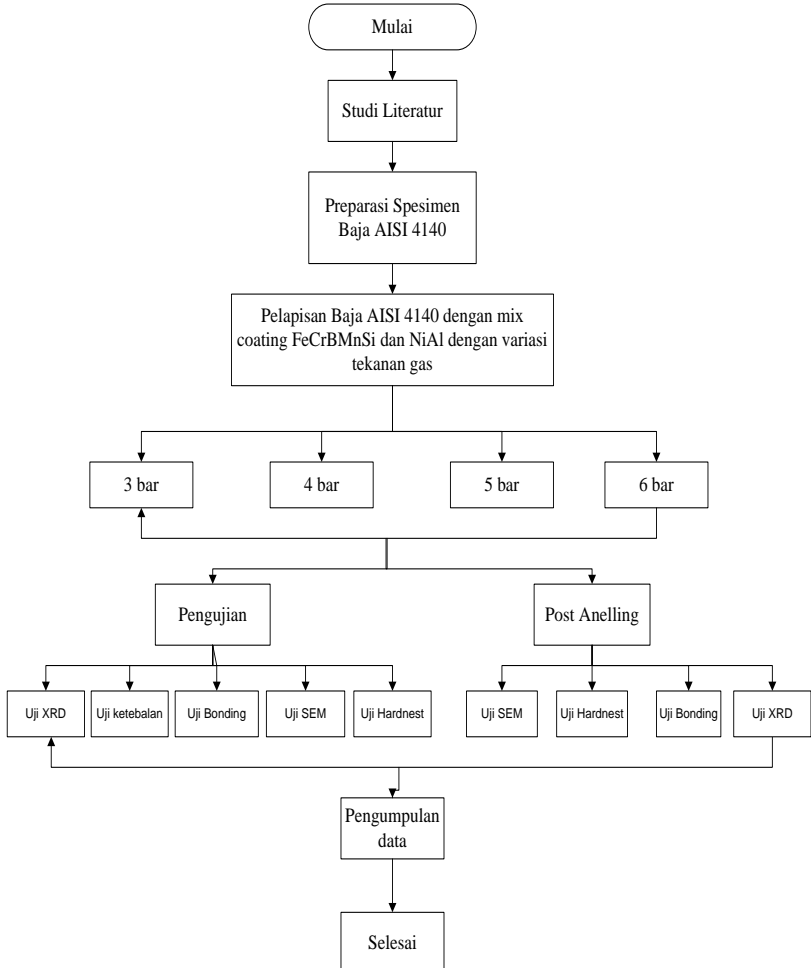


(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian



3.2 Metode Perancangan

Metode yang dilakukan pada perancangan penelitian ini adalah:

1. Studi Literatur

Metode ini mengacu pada buku – buku dan jurnal, informasi dan penelitian dari situs yang mempelajari permasalahan oksidasi temperatur tinggi, metode pelapisan twin wire arc, pengaruh kecepatan dan sudut nozel pada pelapisan baja.

2. Diskusi

Pada tahapan ini dilakukan diskusi untuk menambah wawasan agar lebih memahami permasalahan dan solusi pada penelitian. Diskusi ini dilakukan dengan pihak – pihak terkait dengan penelitian

3. Eksperimental

Metode ini dilakukan dengan pengujian langsung sesuai dengan prosedur dan metode yang ada, yaitu *SEM, XRD, Pull Of Boanding, Thickness Test, Post – Anelling, Surface Rought Test*.

3.3 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan pada penelitian ini:

1. **Material Substrate**

Di dalam penelitian ini menggunakan baja paduan yang digunakan pada temperatur tinggi yaitu ASTM A193 B7 atau di pasaran disebut dengan AISI 4140. Baja AISI 4140 merupakan baja paduan rendah molybdenum yang mengandung kromium dengan karbon 0.4%. Pengaplikasian baja AISI 4140 digunakan temperatur medium dan temperatur tinggi serta dalam kondisi tekana tinggi. Adapun komposisi dari material *substrate*.



Tabel 3.1 Komposisi kimia baja AISI 4140 (Husain Jaya)

Unsur	Persentase
C	0,38-0,43
Mn	0,60-0,90
P	0,40 Max
S	0,05 Max
Si	0,15 – 0,35
Cr	0,80 – 1,10
Ni	0,025 Max
Mo	0,15 – 0,25
Fe	Balance

2. Bahan Wire Coating Akhir (Top Coat)

Bahan wire coating akhir yang dipakai adalah salah satu bahan *coating* komersial untuk proses pelapisan logam pada tube di paket boiler ataupun di area ruang bakar lainnya yang mengandung sulfur dan carbon yang tinggi. Pada penelitian ini lapisan akhir menggunakan paduan logam besi – chrom dengan merk dagang TAFA 95 MXC ataupun dengan istilah lain FeCrBSiMn solid wire *coating*. Adapun komposisi kimia dari lapisan akhir ini dapat dilihat dari tabel di bawah ini.

Tabel 3.2 Komposisi kimia *top coating*

Unsur	Presentase (%)
Fe	64.6
Mn	2
Si	1.7
B	3.7
Cr	28



3. Bahan Intermediate Coating (Bond Coat)

Bahan intermediate coating dalam pengujian ini adalah coating kemersial yang selalu digunakan dalam aplikasi pelapisan *metal spraying* untuk coating perekat (*bond coat*). Pada penelitian ini digunakan merk TAFE 75 Bondarc-*solid wire* dimana komposisi kimianya seperti Tabel 3.3 dibawah ini.

Tabel 3.3 Komposisi kimia *boad coat*

Unsur	Presentase (%)
Ni	95
Al	5

3.4 Alat Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini:

1. *Twin Wire Electric Arc – Spraying*

Twin Wire Electric Arc – Spraying digunakan untuk aplikasi pelapisan logam ke material *substrate*, dimana untuk melelehkan kedua wire yang berada pada sisi katoda dan anodanya menggunakan daya listrik dan untuk meningkatkan kecepatan dari droplet cairan logam menggunakan udara bertekanan. Mesin ini digunakan untuk melakukan *spraying NiAl wire* dan *95 MXC wire* adalah TAFE 9000 *Electrical Wire-Arc Spraying Machine* dengan variasi jarak dan jumlah layer yang telah ditentukan. Adapun spesifikasi lengkap dari mesin tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.4.



Tabel 3.4 Spesifikasi Mesin Aplikasi Arc Spray (Praxair TAFA, 2012)

Spesifikasi	Keterangan
<i>Input Ampere</i>	< 23 A
<i>Input Voltage</i>	200 V
<i>Input Frequency</i>	50 - 60 Hz
<i>Output Ampere</i>	100 – 125 A
<i>Output Voltage</i>	18 – 30 V
<i>Duty cycle (at full Ampere)</i>	100%
<i>Cooling</i>	<i>Ambient Air</i>
<i>Atomizer Air</i>	3 – 4 Bar
<i>Size Wire</i>	1,6 – 2,5 mm
<i>Feed Speed</i>	<i>Depend on material</i> <i>Max. 40 kg/h for Tin</i>
<i>Wire Feed Pressure</i>	2 Bar

2. Sand Blasting

Alat ini digunakan untuk membersihkan permukaan material *substrate* dari kontaminasi seperti karat, cat, tanah, serta digunakan sebagai *surface preparation* yaitu memberikan kekasaran pada permukaan material. Dalam penelitian ini peralatan *abrasive grit blasting* yang digunakan adalah jenis mesin *automatic* dengan merk dagang NORBLAST by Norexox 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)

Spesifikasi	Keterangan
<i>Capacity</i>	35 Liters
<i>Pipe Work</i>	1/2"
<i>Grit Blasting house dia</i>	13 mm
<i>Remote control handle</i>	Pneumatic
<i>Hose length</i>	10 m
<i>Connector Nozzle</i>	1/2" threaded
<i>Filter</i>	Vortex Air Conditionig
<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 ³ min/200 cfm
<i>Required Abrasive</i>	478 kg/hour
<i>Required H.P</i>	39

3. Mesin Gergaji Pita

Alat ini digunakan untuk memotong materila *substrate* sesuai dengan kebutuhan penelitian.

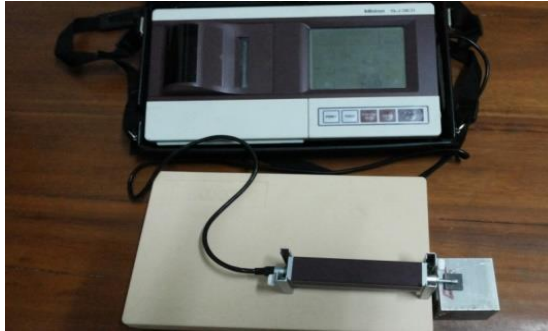


Gambar 3.2 Mesin Gergaji Pita



4. *Roughness Test*

Alat ini digunakan untuk mengetahui nilai kekasaran permukaan sample yang telah dicoating.



Gambar 3.3 *Roughness Test*

5. *Pull Of Test*

Alat digunakan untuk mengetahui nilai kekuatan lekat coating pada permukaan substrat.



Gambar 3.4 Alat *Pull Of Test*



6. *XRD*

XRD digunakan untuk mengetahui unsur dan senyawa yang terbentuk substrat dan hasil coating.



Gambar 3.5 Mesin XRD (*X-Ray Diffraction*)

7. *SEM*

Alat ini digunakan untuk mengetahui morfologi substrat setelah dicoating dan setelah pengujian thermal.



Gambar 3.6 Mesin Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM)



8. *Post - Annealing*

Alat ini digunakan untuk menguji ketahanan thermal pada substrat yang telah di coating.



Gambar 3.7 Muffle Furnace

9. *Hardnest Test*

Alat ini digunakan untuk mengukur kekerasan dari material coating



Gambar 3.8 Hardnest Test



3.5 Prosedur Pengujian

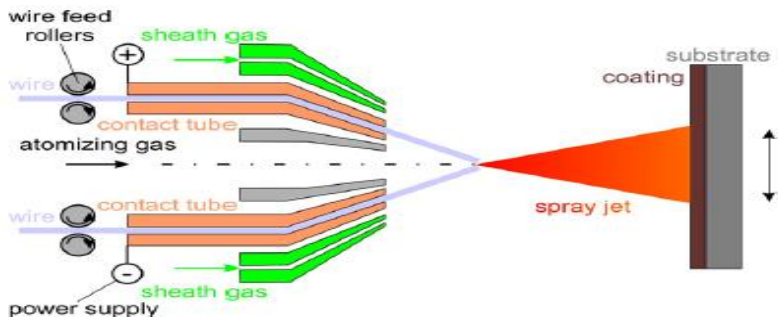
3.5.1 Preparasi Spesimen

Untuk mendapatkan hasil yang baik maka dalam penelitian ini baik dilakukan preparasi dari material substrate, adapun prosedur preparasi sebagai berikut

- Pemotongan spesimen menjadi 9 buah dengan ukuran diameter 75mm tebal 10mm
- Pemotongan spesimen kecil sebanyak 8 buah dengan ukuran 10mm x 10mm x 4mm
- Prosedur sebelum *sand blasting*, (1) Semua kotoran pada *substrate*, oil dan *grease* dibersihkan dengan menggunakan detergen hingga bersih (SSPC – SP 1).
- Sebelum proses pelapisan, permukaan substrat dilakukan abrasive grit blasting untuk membuat permukaan menjadi kasar menggunakan aluminium oxide. Permukaan yang kasar ini dibutuhkan untuk memperbaiki sifat adhesi antara substrat dengan pelapisnya.

3.5.2 Proses Pelapisan

Melakukan spraying mix coat FeCrBMnSi dengan Ni-Al, dengan variasi tekanan gas. Ada beberapa variabel yang konstan dalam penelitian ini yaitu parameter jarak nozzle 200mm sudut nozzle 90°.



Gambar 3.9 Proses pelapisa Arc Spray



3.5.3 Proses Pengujian

Pada penelitian ini menggunakan beberapa pengujian untuk mendapatkan hasil dari beberapa parameter yang digunakan, adapun pengujian tersebut dijelaskan sebagai berikut:

1. Pengujian SEM

SEM (*Scanning Electron Microscopy*) digunakan untuk mengetahui morfologi dari *substrate*. Pengujian pada SEM dilakukan dua kali sebelum dan sesudah *thermal cyclic*. Adapun mekanisme pengamatan SEM:

1. Menyiapkan sampel yang akan diamati, yaitu 8 sampel setelah proses pelapisan.
2. Meratakan permukaan *cross section* yang akan diamati SEM dengan menggunakan kertas amplas.
3. Merekatkan sampel yang akan diuji dengan menggunakan selotip karbon pada tempat sampel, hal ini dilakukan agar ketika pengamatan sampel tidak akan tergelincir saat proses *vacuum*.
4. Memasukkan sampel ke dalam alat pengujian SEM.
5. Melakukan proses *vacuum*.
6. Mengamati hasil gambar dari sampel dengan mencari lokasi dan ukuran yang diinginkan.
7. Mengambil gambar yang diinginkan setelah ditemukan yang sesuai

2. Pengujian X-Ray Diffraction (XRD)

X-Ray Diffraction adalah pengujian yang digunakan untuk mengetahui unsur dan senyawa yang terbentuk substrat dan hasil *coating*. Data hasil XRD berupa grafik dengan puncak intensitas terhadap 2θ . Data XRD ini digunakan untuk perhitungan komposisi unsur dan senyawa. Pengujian XRD ini menggunakan alat merk Xper pro analytical.

❖ Mekanisme Pengamatan XRD :

1. X-Ray (sinar X) di tembakkan dari X-Ray source ke sampel.



2. Hasil dari tembakan akan dipantulkan menuju *X-Ray detector* untuk dikonversikan dalam bentuk kurva agar dapat dianalisis.

3. *Surface Roughness Test*

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui nilai kekasaran permukaan sampel yang telah *dicoating*. Pengujian ini menggunakan 10 sample dengan diameter 75 mm. Pengujian ini menggunakan alat uji *surface roughness tester* SJ-301 user's manual Mitutoyu dengan standard JIS20 (dalam satuan mikro meter). Mekanisme kerja *surface roughness tester* ini menggunakan *stylus traces* pada permukaan spesimen. *Stylus traces* ini berfungsi untuk mengukur kekasaran permukaan benda yang disentuh, *stylus trace* akan melakukan pengukuran sepanjang permukaan benda uji. Hasil yang didapat akan berupa angka secara kuantitatif yang menunjukkan kekasaran permukaan spesimen.

4. *Pengujian Pull Off Bonding*

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui daya lekat *coating* terhadap substratnya. Pengujian ini menggunakan lem *Araldite* yang berfungsi sebagai perekat antara pin dengan spesimen yang akan diuji. Pengujian akan berhenti ketika lem sudah terlepas dari spesimen, dengan menarik sebagian permukaan *coating*. Nilai dari kelekatan akan ditunjukkan dari alat dalam satuan MPa.

❖ Mekanisme pengujian *pull off bonding* :

1. Pin atau *holder* dipusatkan pada permukaan *coating* dengan bagian pembebanan.
2. Putar roda pegangan searah jarum jam kemudian grip diturunkan sehingga grip berada dibawah bagian pembebanan.
3. Sejajarkan ketiga alas pemutar dari tripod sehingga alat tersebut akan menarik permukaan *coating* secara tegak lurus pada cincin *bearing*.
4. Merubah indikator gaya pada tester ke posisi nol.
5. Beban tarik yang diberikan pada bagian pembebanan ditambahkan hingga maksimum atau hingga sistem



tersebut putus. Skala peralatan menunjukkan tegangan langsung dalam satuan MPa.

6. Mencatat nilai tertinggi yang didapatkan dengan membaca angka sepanjang indikator penarikan.

5. Pengujian Kekerasan

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kekerasan pada lapisan *coating* dengan kondisi sebelum dan setelah annealing. Berikut prosedur pengujiannya :

1. Meletakkan sampel (material) pada landasan yang telah tersedia.
2. Mikroskop difokuskan melalui pengatur kasar.
3. Area penjajakan pada sampel ditentukan dengan memutar spindel mikrometer.
4. Memberi beban sebesar 500 gf terhadap permukaan sampel selama 30 detik.
5. Mengukur diameter jejak arah horisontal (d_1) dan diameter jejak arah vertikal (d_2).
6. Nilai kekerasan secara otomatis muncul pada layar monitor.

6. Perlakuan Post – Annealing

Perlakuan post – annealing ini dilakukan setelah setelah aplikasi coating dilakukan yang kemudian dilakukan pengujian morfologi dan sifat mekanik dari material substrate yang telah dicoating. Perlakuan post – annealing dilakukan pada mesin *muffle furnace* dengan temperatur 500°C yang ditahan selama 2 jam dan didinginkan secara perlahan di dalam furnace (Sudiro,2015).



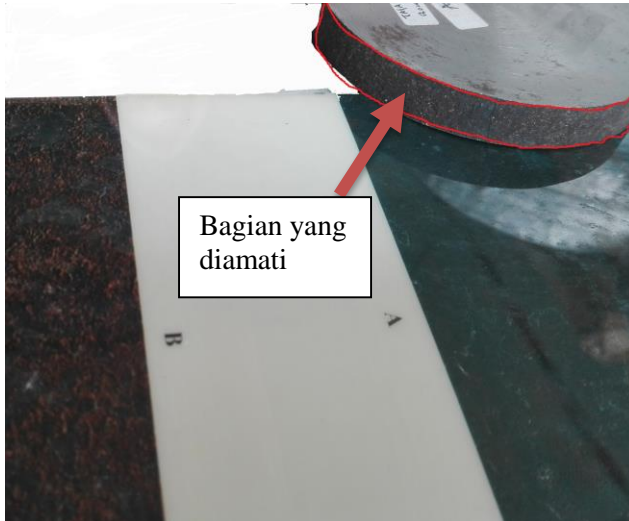
(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Grit Blasting dan Twin Wire Arc Spray

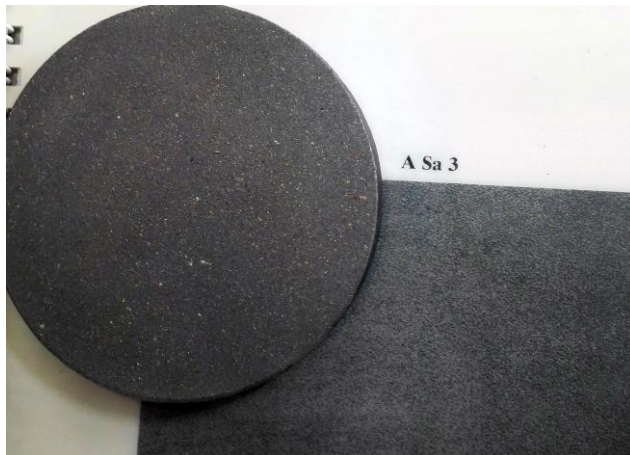
Dalam standar aplikasi *thermal spray coating*, substrat terlebih dahulu di preparasi dengan *grit blasting* untuk mendapat kebersihan dan kekasaran sesuai dengan standar. Berdasarkan standar ISO 8501-1:1988 minimal kebersihan permukaan tipe SA 2,5 dan kekasaran permukaan blasting berkisar 64 – 80 μm (Chaithanya,2007). Kekasaran grit blasting diukur dengan alat elcometer. Sebelum dilakukan *grit blasting* dilakukan pengamatan visual terhadap permukaan substrat dari hasil pengamatan visual, dengan standar ISO 8501-1:1988 subpart berada pada tipe A, dimana tipe ini adalah, merupakan tipe dalam keadaan bagus, tanpa ada karat, cat sebelumnya, permukaan bebas dari grease, kotoran, oil dan mil scale sebelum di blasting. Dapat dilihat seperti Gambar 4.1 dibawah, dengan kekasaran substrat 40,34 μm .



Gambar 4.1 Pengamatan visual permukaan substrat sebelum di blasting



Setelah dilakukan proses grit blasting dengan menggunakan aluminium oxide. Didapat hasil tipe blasting adalah SA 3 yang artinya dilihat tanpa pembesaran permukaan bebas dari grease, kotoran, oil dan mil scale, tanpa ada karat, cat sebelumnya, serta material lainnya. Dengan kekasaran rata – rata kekasaran setelah di grit blasting adalah 85 μm . Hal ini menunjukkan bahwa setelah melakukan grit blasting nilai kekasaran dari permukaan substrat meningkat. Semakin kasar permukaan mengakibatkan ikatan mechanical interlocking yang terbentuk semakin meningkat (Pawlowski, 2008). Hasil grit blasting dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2. Pengamatan visual hasil blasting

Setelah melakukan proses grit blasting, dilanjutkan dengan proses pelapisan substrat dengan metode pencampuran coating, dimana pada metode ini pada bagian anoda dipasang *boanding coat* dan pada katoda dipasang *top coat* dengan variasi tekanan gas. Adapun parameter yang dibuat konstan adalah jarak spray 200 mm, tegangan 30,3 V, arus 175 A. Variasi tekanan yang digunakan adalah 3 bar, 4 bar, 5 bar dan 6 bar.

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



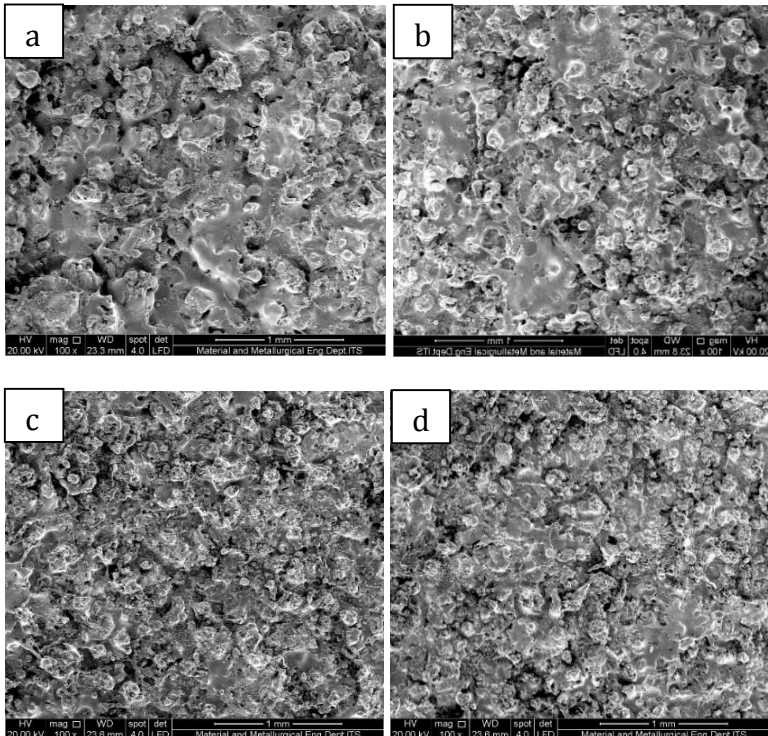
4.2 Hasil Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan *Energy Dispersive X-Ray* (EDAX)

Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) dilakukan untuk mengetahui morfologi pada lapisan coating dengan variasi tekanan gas. Pengujian menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dilakukan dengan perbesaran 100x hingga 500x. Pengujian SEM ini dilakukan pada permukaan dan juga penampang melintang dari substrate yang sudah di coating atau *as-received coating*. Pengujian *Energy Dispersive X-Ray* (EDAX) dilakukan untuk mengetahui unsur – unsur yang terdapat di dalam lapisan coating . Hasil dari pengujian ini berupa jumlah persentase unsur yang ada di morfologi permukaan dan penampang melintang *coating*.

4.2.1 Morfologi Permukaan Coating

Pengamatan morfologi permukaan coating dilakukan dengan cara perbesaran 100x hingga 500x pada SEM. Pengamatan ini dilakukan pada spesimen dengan variasi 3 bar, 4 bar, 5 bar dan 6 bar. Gambar dari perbesaran 100x dapat dilihat seperti Gambar 4.3.

Dari Gambar 4.3 bagian (a) dapat dilihat hasil coating dengan tekanan 3 bar, terlihat permukaan coating terdapat gumpalan yang tidak merata diseluruh permukaan, ada yang berbentuk berupa gumpalan dan berbentuk seperti lelehan. Perbedaan antara yang berbentuk gumpalan dan lelehan sangat jelas terlihat dari pada sample lainnya, selain itu pada Gambar 4.3 bagian (a) terdapat rongga dengan ukuran yang besar dan jelas terlihat, dibandingkan sample lainnya. Untuk Gambar 4.3 bagian (b) sample dengan tekanan 4 bar bentuk permukaan lapisan coating, berupa gumpalan kecil semakin banyak terbentuk dengan rongga – rongga yang ada lebih kecil dari pada Gambar 4.3 bagian (a). Begitu juga pada Gambar 4.3 bagian (c) dan (d) lebih banyak terbentuk pada permukaan coating berupa gumpalan kecil – kecil, dibandingkan pada Gambar 4.3 bagian (a) dan (b).



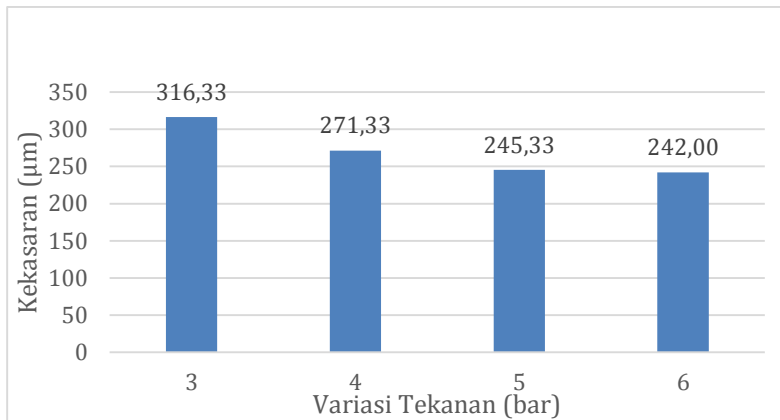
Gambar 4.3 Hasil pengujian SEM pada permukaan coating dengan variasi tekanan (a) 3 bar, (b) 4 bar, (c) 5 bar, (d) 6 bar, pada perbesaran 100x

Perbedaan tekanan menyebabkan perbedaan morfologi pada setiap spesimen. Menurut wang (1999) semakin tinggi tekanan gas maka ukuran droplet atau splat yang dihasilkan semakin kecil. Hal itu dapat dilihat pada Gambar 4.3 dimana pada gambar setiap kenaikan tekanan, makin bentuk gumpalan yang terbentuk semakin kecil. Gumpalan yang terbentuk menurut fitrianova (2014) adalah partikel yang unmelt atau tidak meleleh sempurna ketika mencapai substrat sehingga membentuk seperti gumpalan. Gumpalan kecil atau unmelt kecil banyak terlihat pada Gambar 4.3 bagian (c) dan (d) dengan variasi tekanan 5 bar dan 6 bar. Dengan

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



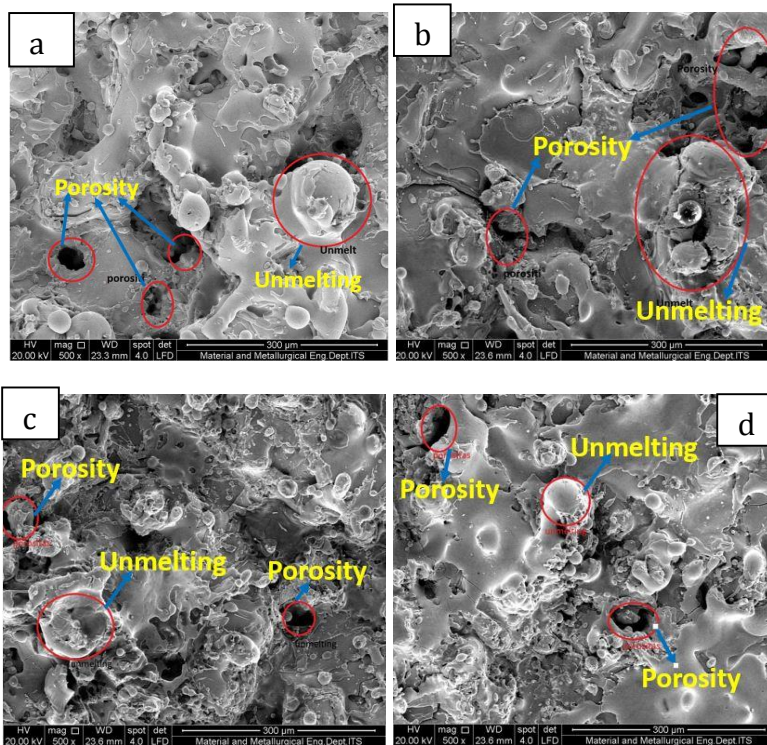
meningkatnya tekanan, maka memperkecil ukuran unmelt pada permukaan coating. Hal ini karena ketika tekanan gas ditingkatkan maka meningkatkan kecepatan impak partikel ke substrat (Fitrianova, 2014), yang menyebabkan partikel belum meleleh secara sempurna. Sehingga ketika mencapai substart bentuk partikel tersebut masih berupa gumpalan. Menurut shauma (2015) semakin banyak partikel yang belum leleh maka kekasaran pada permukaan coating meningkat. Berdasarkan pengujian kekasaran pada permukaan sample dapat dilihat seperti Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Hasil pengujian kekasaran permukaan coating dengan variasi tekanan

Berdasarkan Gambar 4.4 nilai kekasaran pada pada 3 bar lebih tinggi dari pada sample lainnya, yang dapat dilihat juga melalui Gambar 4.3 bagian (a) terbentuk partikel unmelt yang berukuran besar pada permukaan coating.

Banyaknya terbentuk partikel unmelt dengan ukuran yang besar pada permukaan coating meningkatkan rongga dan porositas pada permukaan coating (Fitrianova, 2014). Untuk melihat pada pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) dilakukan perbesaran 500x pada permukaan coating seperti Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Hasil Pengujian SEM pada permukaan coating dengan variasi tekanan, (a) 3 bar (b) 4 bar, (c) 5 bar, (d) 6 bar pada perbesaran 500 x

Dari Gambar 4.5 pada bagian (a) dan (b) partikel unmelt ukurannya lebih besar dibandingkan bagian (c) dan (d). Pada bagian (c) dan (d) partikel unmelt berukuran lebih kecil di permukaan coating. Morfologi yang terbentuk pada lapisan coating berpengaruh dengan adanya porositas dilapisan coating (Fitrianova, 2014).

Untuk melihat sebaran unsur yang ada pada permukaan coating dilakukan pengujian EDAX pada permukaan lapisan

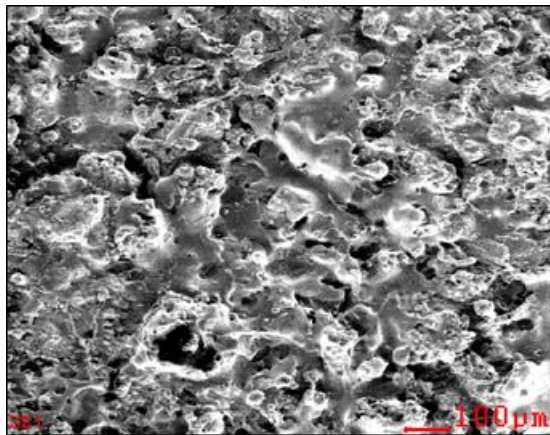
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



coating. Pengujian EDAX dilakukan pada permukaan coating dengan perbesaran 100x hasil pengujian dapat dilihat seperti tabel 4.1.

Tabel 4.1 Tabel hasil EDAX pada permukaan lapisan coating variasi tekanan 3 bar

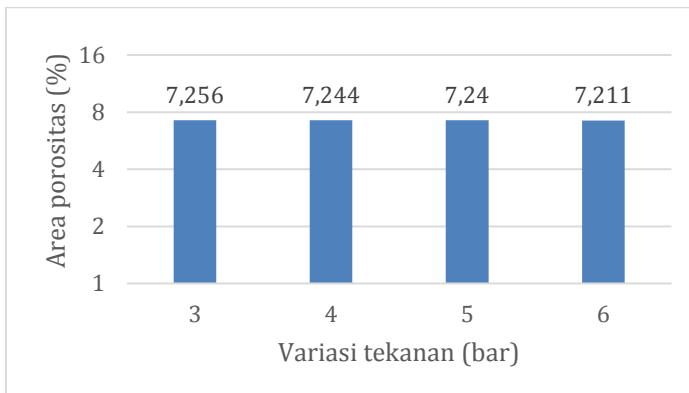
<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>BK</i>	00.80	3,41
<i>OK</i>	04.58	13,18
<i>AlK</i>	05.81	9,92
<i>SiK</i>	00.95	1,56
<i>CrK</i>	16.14	14,3
<i>MnK</i>	00.72	0,6
<i>FeK</i>	32.46	26,78
<i>NiK</i>	38.54	30,25





Dari Tabel 4.1 dapat dilihat unsur - unsur yang ada pada lapisan coating. Dimana pada lapisan coating terdapat banyak unsur Fe, Cr dan juga Ni, yang merupakan penyusun utama dari wire coating yang digunakan. Selain itu juga terdapat sebaran unsur B, Mn, dan Si. Unsur B, Mn, dan Si memiliki fungsi precipitat, self fluxing, dan deoksidator (Irawan, 2016). Precipitat adalah unsur yang menyebabkan senyawa lebih keras dan juga tahan aus. *Self fluxing* adalah unsur berguna untuk mencegah terbentuknya oksida pada permukaan logam ketika dalam keadaan *melting* (Pheely, 2016). Sama halnya dengan *self fluxing* fungsi dari deoksidator adalah mencegah terbentuknya oksida terbentuk pada lapisan coating. Silicon yang ada pada lapisan coating adalah elemen utama dalam ketahanan terjadinya oksida (Irawan, 2016).

Untuk melihat banyaknya area yang mengalami porositas pada permukaan coating maka dilakukan analisa hasil gambar SEM pada bagian permukaan coating. Analisa dilakukan dengan image processing program dalam penelitian ini menggunakan program image J. Pengamatan dilakukan pada 3 posisi pada permukaan coating dalam satu sample dengan perbesaran 100x. Untuk melihat hasil pengamatan image J pada area yang mengalami porositas bisa dilihat seperti Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Hasil analisa porositas permukaan lapisan coating dengan variasi tekanan menggunakan aplikasi image J.

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



Dari hasil analisis didapat rata – rata luas area yang terdapat porositas dimana, setiap kenaikan variasi tekanan gas di dapat penurunan luas area yang terdapat porositas. 3 bar luas area yang terdapat porositas 7,256 %, 4 bar 7,244%, 5 bar 7,240%, 6 bar 7,211%.

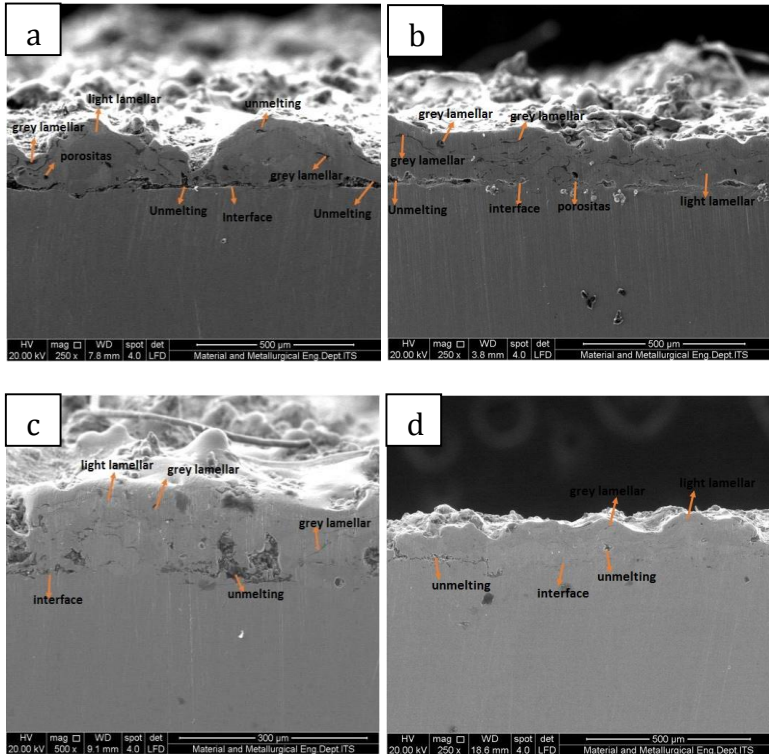
Penyebab porositas pada thermal spray menurut irawan, (2016) terdapat oksigen yang terjebak pada lapisan coating dikarenakan jarak spray yang terlalu jauh menyebabkan oksida terbentuk prematur sebelum ke substrate menyebabkan material coating unmelt yang cenderung diikuti dengan adanya porositas, dan juga dikarenakan terdapat kotoran pada permukaan substrat sebelum di coating. Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan daengmol (2006) diketahui *jarak nozzle* dan tekanan gas memberikan pengaruh terhadap ukuran *splat*. Semakin besar jarak *nozzle* dan tingginya tekanan gas memperkecil ukuran *splat*. Berdasarkan fitrianova, (2014) dengan meningkatnya tekanan gas mengurangi porositas, hal ini dikarenakan dengan meningkatnya tekanan gas akan mempercepat kecepatan lelehan partikel yang lebih kecil ke substrat. Berdasarkan Gambar 4.6 diketahui setiap kenaikan variasi tekanan gas akan mengurangi luas area yang mengalami porositas yang ini disebabkan karena meningkatnya tekanan gas yang digunakan mempercepat kecepatan *impact* dari lelehan partikelnya yang lebih kecil ke permukaan substrat. Sehingga menyebabkan partikel-partikel tersebut melebur secara sempurna dan rongga yang terbentuk antar partikel menjadi sedikit (Wang, 1999).

4.2.2 Morfologi Penampang Melintang Coating

Pengamatan morfologi pada coating selain dilakukan pada bagian permukaan coating, dilakukan juga pada bagian penampang melintang coating. Pengamatan ini dilakukan pada perbesaran 100x hingga 250x pada SEM. Sebelum melakukan pengamatan pada SEM, pada sampel bagian penampang melintang dilakukan proses grinding dengan kekasaran dari 800 hingga 5000 yang bertujuan untuk membelah partikel coating sehingga terlihat



jelas morfologi dari penampang melintang coating, untuk pengamatan morfologi penampang melintang coating dapat dilihat seperti Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Hasil pengujian SEM pada penampang melintang lapisan coating dengan variasi tekanan, (a) 3 bar, (b) 4 bar, (c) 5 bar (d) 6 bar pada perbesaran 250x

Dari Gambar 4.7 terlihat hasil gambar SEM penampang melintang coating dengan variasi tekanan gas. Dari Gambar 4.7 bagian (a) dengan variasi tekanan 3 bar terlihat memiliki bentuk morfologi yang bergelombang di bandingkan variasi tekanan gas lainnya. Hal ini di karenakan pada tekanan rendah akan membuat

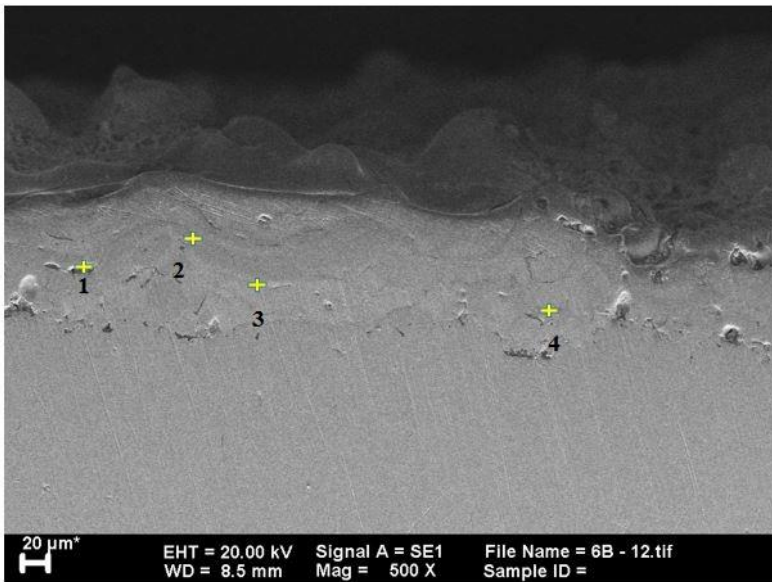
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



bentuk splat lebih besar dibandingkan variasi tekanan yang lebih besar (Wang, 1999), karena bentuk partikel atau splat yang lebih besar membuat morfologi penampang melintang dari 3 bar lebih bergelombang. Menurut davis, (2014) bentuk bergelombang dari morfologi coating didapat dari bentuk spat pada saat proses pelapisan, dimana bentuk spat yang bulat akan menghasilkan bentuk morfologi yang bergelombang. Selain itu peningkatan tekanan juga akan meningkatkan kecepatan impac dari splat dan juga memperkecil bentuk splat sehingga melebur sempurna yang menyebabkan bentuk morfologi coating penampang melintang lebih halus dan lebih padat (Wang, 1999).

Secara visual setiap lapisan coating memiliki struktur lamellar, sebaran porositas, sebaran oksida, dan sebaran *un-melted* material. Mikrostruktur lapisan coating di bagi menjadi tiga fase : (1) stuktur *light lamelan*, (2) struktur *grey lamellar*, (3) *un-melted material* (Irawan, 2016), yang dapat dilihat seperti Gambar 4.8. Berdasarkan Gambar 2.9 *grey lamellar* diindikasi sebagai oksida dengan banyak kandungan oksigen pada hasil EDAX. *Light lamellar* adalah matriks kandungan unsur terbanyak pada *wire bond coat*. *Unmelting* disebabkan karena kandungan silicon yang tinggi pada lapisan coating.

Untuk melihat unsur – unsur yang terbentuk pada setiap struktur lamellar di penampang melintang lapisan coating dilakukan pengamatan unsur pada penampang melintang lapisan coating. Pengamatan dilakukan dengan menggunakan *Energy Dispersive X-Ray* (EDAX). Hasil dari pengujian ini berupa jumlah persentase unsur yang ada dipenampang melintang lapisan coating. Hasil pengujian EDAX dapat dilihat seperti Gambar 4.8.



No	Ni	Al	Fe	Cr	Mn	Si	O
1	7.62	0.00	69.71	16.76	2.69	0.00	0.04
2	5.06	0.03	56.08	23.21	1.55	0.62	0.70
3	77.56	3.04	2.01	0.74	0.44	0.27	0.00
4	43.38	20.07	4.03	1.19	0.67	0.24	20.22

Gambar 4.8 Hasil EDAX pada penampang melintang lapisan coating pada variasi 6 bar.

Dari Gambar 4.8 diketahui bahwa pada lapisan coating FeCrBMnSi+NiAl terdiri dari dua matrik pada *light lamellar* yaitu matrik Fe, lapisan yang kaya unsur Fe dan matrik Ni, lapisan yang kaya unsur Ni. Pada Gambar 4.8 ditandai dengan point nomor 2 (matrik Fe) dan point nomor 3 (matrik Ni). Perbedaan kedua matrik ini terlihat pada perbedaan kontras antar matrik, dimana lebih gelap matrik Fe dan lebih terang matrik Ni. Pada point nomor 4 yaitu *grey lamellar* diindikasikan terbentuknya oksida pada lapisan coating. Hal ini karena tingginya kandungan Ni dan Oksigen yang diindikasikan membentuk oksida NiO. Berdasarkan penelitian yang

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



dilakukan oleh Irawan, (2016) *grey lamellar* merupakan oksida yang terbentuk selama pelaksanaan coating terlihat dengan tingginya kandungan oksigen. Pada point 1 merupakan un-melted coating, hal ini terjadi karena rasio feeding rate droplet dengan temperatur tidak seimbang (Irawan, 2016).

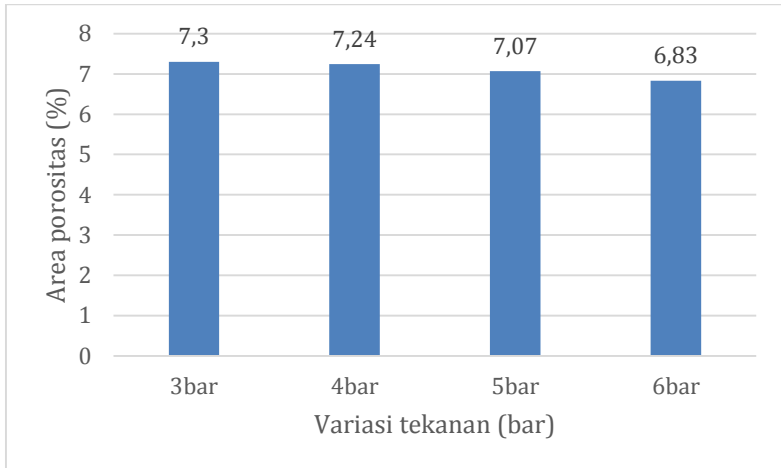
Berdasarkan pengamatan SEM pada Gambar 4.7 setiap variasi kenaikan tekanan gas akan mengurangi jumlah *grey lamellar* (oksida) yang ada pada lapisan coating. Menurut Davis, (2004) oksida terbentuk dipengaruhi oleh kecepatan *splat* ke substrat. Semakin lama *splat* berada pada *dwell times* (ruang terbuka antara sumber panas *gun coating* dengan substrat) akan meningkatkan terbentuknya oksida pada lapisan coating. Kecepatan *splat* ditingkatkan dengan cara meningkatkan tekanan pada *gun coating*. Jadi peningkatan tekanan gas akan meningkatkan kecepatan *splat* dan mengurangi terbentuknya oksida pada lapisan coating.

Selain menganalisa bentuk morfologi dan persentase unsur pada penampang melintang lapisan coating, analisa porositas menggunakan software image J dilakukan pada penampang melintang coating, pengamatan porositas dengan image J lebih akurat pada penampang melintang coating, dikarenakan pada penampang melintang yang telah di grinding, menyebabkan partikel coating terbelah sehingga terlihat jelas rongga yang ada di dalam lapisan coating. Dari Gambar 4.8 dilakukan analisa porositas dengan menggunakan aplikasi image J, hasil analisa porositas image J seperti Gambar 4.9.

Dari Gambar 4.9 semakin tinggi variasi tekanan semakin kecil luasan daerah yang mengalami porositas pada bagian penampang melintang lapisan coating. Hal ini menurut Fitrianova, (2014) disebabkan karena dengan meningkatnya tekanan gas akan mempercepat kecepatan lelehan partikel yang lebih kecil ke substrat. Selain itu menurut Wang, (1999) dengan meningkatnya tekanan gas menyebabkan partikel-partikel tersebut melebur secara sempurna dan rongga yang terbentuk antar partikel menjadi sedikit. Sehingga dengan kenaikan tekanan gas maka ukuran partikel atau



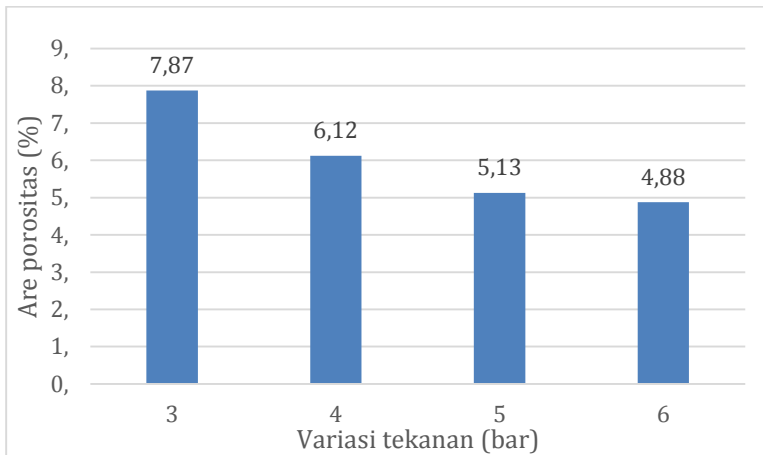
splat lebih kecil dah juga bisa melebur sempurna sehingga rongga yang terbentuk antar partikel menjadi lebih sedikit.



Gambar 4.9 Hasil analisa pengujian porositas pada bagian penampang melintang lapisan coating dengan aplikasi image J

4.2.3 Hasil Uji Porositas

Pengamatan porositas pada lapisan coating, selain menggunakan software pada hasil gambar SEM, uji porositas dengan cara konvensional pada lapisan coating dilakukan untuk mengetahui porositas pada lapisan coating dengan variasi tekanan gas. Uji porositas ini dilakukan dengan cara substrat yang telah di coating atau *as-received coating*, di timbang berat awalnya, dicelupkan kedalam aquades yang kemudian dipanaskan sampai 90° dan ditahan selama 2 jam, kemudian di timbang berat sampel basah, dan juga berat sampel saat kering. Untuk melihat hasil uji porositas dapat dilihat seperti Gambar 4.10.



Gambar 4.10 gambar grafik porositas pada lapisan coating

Dari Gambar 4.10 dapat dilihat setiap kenaikan tekanan gas menurunkan porositas pada lapisan coating. Penurunan ini juga terjadi pada Gambar 4.6 hasil analisa porositas dengan image J pada permukaan coating, Gambar 4.9 hasil analisa porositas dengan image J pada penampang melintang coating. Dari semua gambar tersebut menunjukkan penurunan porositas setiap kenaikan tekanan gas. Penurunan porositas ini menurut wang, (1999) peningkatnya tekanan gas menyebabkan partikel-partikel tersebut melebur secara sempurna dan rongga yang terbentuk antar partikel menjadi sedikit.

Sehingga dengan kenaikan tekanan gas maka ukuran partikel atau splat lebih kecil dan juga bisa melebur sempurna sehingga rongga yang terbentuk antar partikel menjadi lebih sedikit. Rongga yang semakin sedikit maka area pada lapisan coating yang terdapat porositas semakin sedikit (Daengmool, 2006).

Peningkatan tekanan gas berpengaruh pada morfologi lapisan coating dimana pada Gambar 4.5 hasil SEM permukaan lapisan coating terdapat perbedaan setiap kenaikan tekanan gas. Dengan tekanan rendah akan menghasilkan gumpalan yang lebih

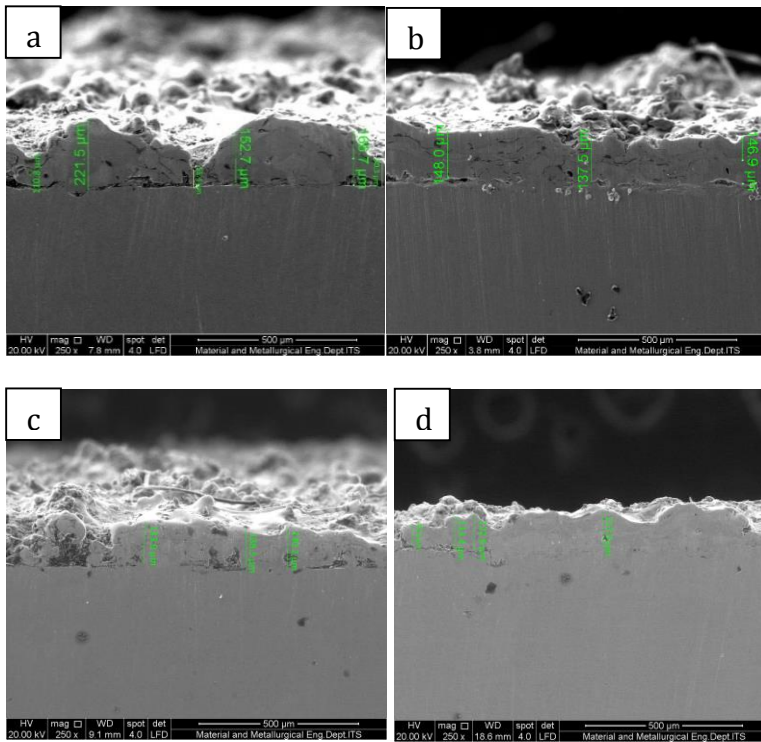


besar dibandingkan tekanan yang lebih tinggi yang berpengaruh pada porositas pada lapisan coating. Hal ini senada dengan Fitrianova, (2014) peningkatnya tekanan gas mengurangi porositas pada lapisan coating, hal ini dikarenakan dengan meningkatnya tekanan gas mempercepat kecepatan lelehan partikel yang lebih kecil ke substrat. Dengan peningkatan tekanan gas akan berpengaruh pada ukuran partikel yang biasa di sebut splat atau droplet, dimana semakin tinggi tekanan gas ukuran splat semakin kecil atau melebur sempurna, yang menyebabkan rongga pada lapisan coating menurun yang menyebabkan porositas pada lapisan coating menurun.

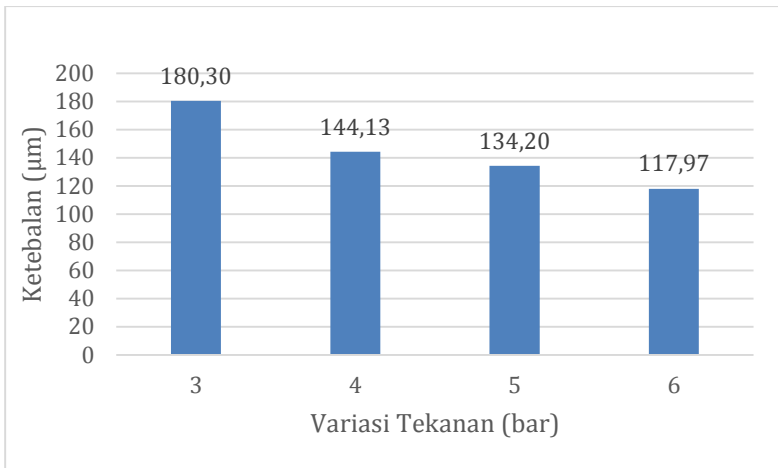
4.3 Ketebalan Coating

Ketebalan coating dapat diukur dengan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dengan perbesaran 250x. Ketebalan coating diukur pada tampak melintang spesimen atau pada bagian *cross section spesimen*. Pengukuran ketebalan coating dilakukan pada coating dengan variasi tekanan 3 bar, 4 bar, 5 bar dan 6 bar. Untuk hasil ketebalan coating dapat dilihat seperti Gambar 4.11.

Dari pengukuran ketebalan dengan perbesaran 250x didapat data ketebalan coating dengan variasi tekanan seperti Gambar 4.11.



(c) (d)
Gambar 4.11 Hasil pengukuran ketebalan lapisan coating dengan variasi tekanan (a) 3 bar, (b) 4 bar, (c) 5 bar, (d) 6 bar



Gambar 4.12 Hasil analisa ketebalan lapisan coating dengan variasi tekanan

Dari hasil Gambar 4.12 dengan variasi tekanan gas dari 3 bar hingga 6 bar. Didapat hasil penurunan ketebalan coating. Pada variasi tekanan 3 bar dengan tebal 180,30 μm , 4 bar 144,13 μm , 5 bar 134,20 μm , dan 6 bar 117,97 μm . Dari hasil pengukuran ketebalan coating, ketebalan coating pada pengujian ini masih termasuk di dalam ketebalan dengan menggunakan metode *wire arc spray* yaitu berkisaran di antara 100 – 1000 μm (Pawlowski, 2008).

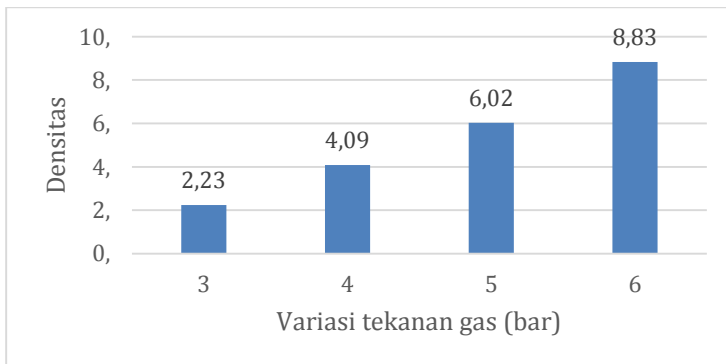
Peningkatan tekanan gas meningkatkan kecepatan droplet sehingga memperbanyak jumlah droplet yang mencapai substrat (Daengmol, 2006). Menurut wang, (1999) semakin tinggi tekanan makan partikel coating akan melebur secara sempurna dan rongga yang terbentuk antar partikel menjadi sedikit. Peningkatan tekanan gas dengan memperkecil ukuran splat dan membuat partikel coating yang disemprotkan melebur secara sempurna, dengan berkurangnya ukuran rongga, maka porositas pada lapisan coating menurun dengan ditandai makin halusya lapisan coating pada pengamatan SEM di lapisan melintang coating yang dapat dilihat

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



pada Gambar 4.7. Dengan berkurangnya porositas pada lapisan coating maka ukuran coating akan semakin menipis dikarenakan sedikit terdapat rongga pada lapisan coating yang menyebabkan lapisan coating semakin padat. Selain itu dengan adanya tekanan yang lebih besar akan menekan lapisan coating sehingga lapisan coating semakin padat. Hal ini juga dapat dilihat pada hasil pengujian SEM Gambar 4.7 dimana pada gambar dengan tekanan yang lebih besar akan menghasilkan morfologi yang lebih halus.

Untuk melihat kepadatan lapisan coating dilakukan uji densitas untuk melihat kepadatan lapisan coating. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan picnometer. Pengujian ini dilakukan dengan menimbang picnometer kosong, picnometer dengan aquades, picnometer dengan sampel, picnometer dengan aquades dengan sample. Dari Gambar 4.13 densitas setiap kenaikan tekanan gas meningkat. Dengan peningkatan tekanan gas mempengaruhi morfologi pada lapisan coating yang semakin halus, semakin halusya morfologi disebabkan karena porositas pada lapisan coating menurun seperti Gambar 4.9, yang menyebabkan peurunan lapisan coating.

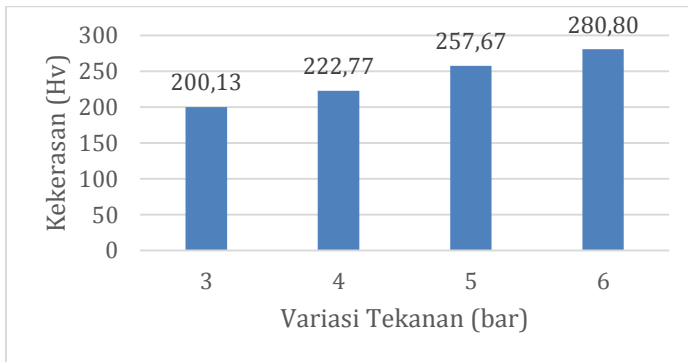


Gambar 4.13 Hasil analisa pengujian densitas pada lapisan coating dengan variasi tekanan gas



4.4 Hasil Pengujian Microhardnest

Pengujian kekerasan lapisan coating dengan menggunakan *microhardness vicker tester* (Model 402MVD S/N “V2D531”) di tiga lokasi pada permukaan coating. Beban yang digunakan adalah 500 gf dengan lama identasi 30 detik. Hasil pengujian dapat dilihat seperti Gambar 4.14.



Gambar 4.14 Hasil pengujian kekerasan pada permukaan coating dengan variasi tekanan

Dari hasil pengujian microhardnest dengan variasi tekanan dari 3 bar hingga 6 bar, didapat peningkatan kekerasan pada setiap kenaikan variasi tekanan. Hasil pengujian kekerasan dengan variasi tekanan 6 bar lebih tinggi dari pada yang lain. Dimana didapat nilai kekerasan pada 3 bar 200,13 Hv, 4 bar 222,77 Hv, 5 bar 257,67 Hv, 6 bar 280,80 Hv.

Hal ini bisa di sebabkan karena beberapa kemungkinan menurut setiyawan, (2016), ketebalan coating berpengaruh terhadap kekerasan pada lapisan coating. Semakin tinggi ketebalan lapisan coating maka kekerasan lapisan coating akan meningkat. Hal senada juga dilihat dari hasil penelitian Hadi, (2016) semakin tebal lapisan coating, maka kekerasan pada lapisan coating akan semakin meningkat. Namun pada Gambar 4.12 ketebalan coating, ketebalan coating mengalami penurunan setiap kenaikan variasi



tekanan, dengan nilai kekerasan yang semakin besar setiap variasi kenaikan tekanan gas.

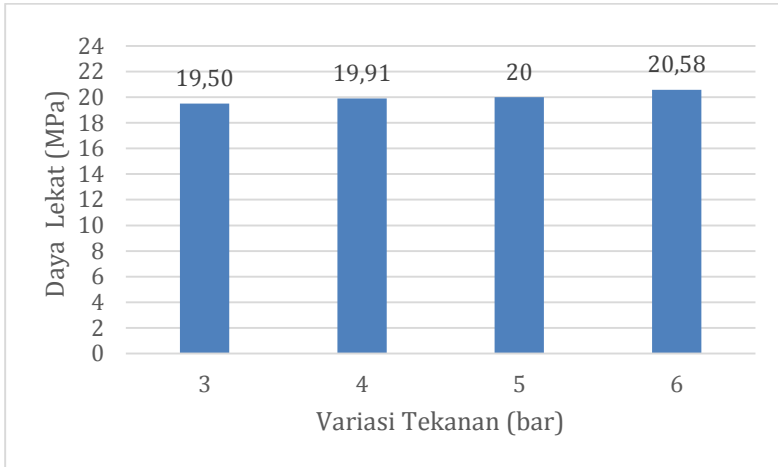
Semakin tingginya nilai kekerasan pada setiap kenaikan tekanan gas disebabkan karena semakin padatnya lapisan coating, semakin padatnya lapisan coating dapat dilihat dari pengamatan penampang melintang lapisan coating pada SEM yang semakin halus. Semakin halus penampang melintang lapisan coating berarti rongga yang terdapat pada lapisan coating semakin sedikit.

Rongga yang semakin sedikit maka area pada lapisan coating yang terdapat porositas semakin sedikit. Hal ini senada dengan penelitian dari daengmool, (2006) dengan meningkatnya kekerasan pada lapisan coating maka porositas dari lapisan coating juga semakin sedikit. Dari Gambar 4.9 yang menggambarkan hubungan antara variasi tekanan dengan luas area yang mengalami porositas pada pengamatan penampang melintang lapisan coating, dilihat dari grafik variasi tekanan gas 6 bar porositas lebih rendah dari pada variasi tekanan lainnya. Dari hasil pengujian SEM Gambar 4.7 variasi tekanan gas 6 bar memiliki morfologi lapisan coating yang lebih halus dari variasi tekanan gas lainnya. Sehingga terjadi peningkatan kekerasan pada setiap kenaikan variasi tekanan gas.

4.5 Hasil Pengujian Pull of Bonding

Pengujian pull of bonding dilakukan untuk mengetahui kekuatan lekat coating dengan substrat. Pengujian ini dilakukan dengan menempelkan dolly (pin), yang bagian bawahnya disand blasting terlebih dahulu, kemudian ditempelkan pada permukaan coating dengan cara direkatkan dengan lem polimer merk araldite, yang di diamkan minimal selama 24 jam. Setelah di diamkan selama 24 jam, dolly (pin) ditarik dengan alat uji berupa pompa hidrolik hingga dolly (pin) tertarik dan sebagian coating terkelupas dari substrat. Angka yang terukur pada proses penarikan (MPa), merupakan nilai lekat coating pada permukaan coating.

Dari hasil pengujian di dapat hasil pengujian kekuatan lekat coating seperti Gambar 4.15 berikut ini



Gambar 4.15 Hasil pengujian pull of bonding lapisan coating dengan variasi tekanan

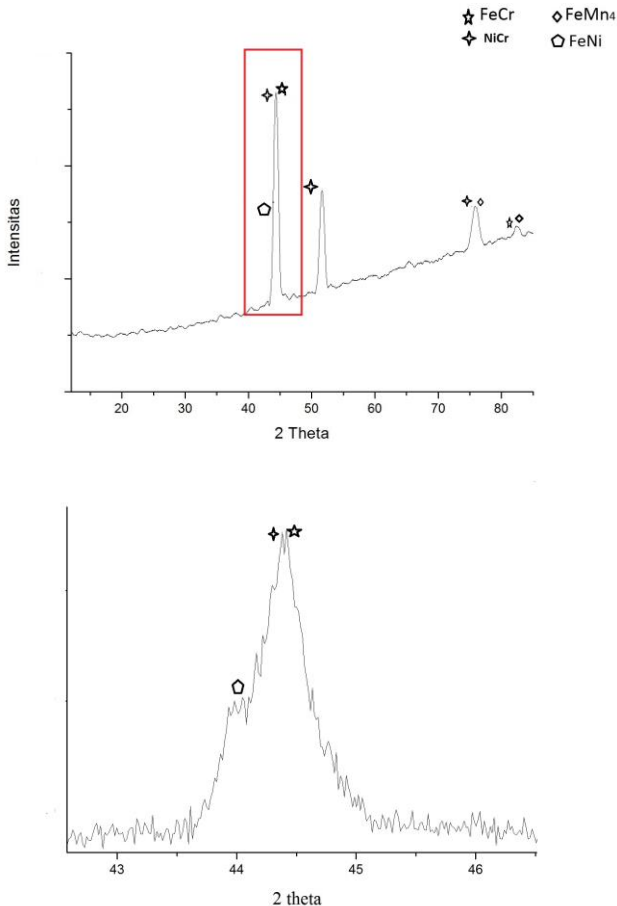
Dari Gambar 4.15 terlihat setiap peningkatan variasi tekanan terjadi kenaikan daya rekat dimana pada tekanan gas 3 bar 19.50 MPa, 4 bar 19.91 MPa, 5 bar 20.00 MPa dan 6 bar 20.58 MPa. Peningkatan ini dikarenakan karena pengaruh hasil morfologi dari setiap kenaikan variasi tekanan gas. Dari Gambar 4.8 hasil pengamatan SEM terlihat morfologi setiap kenaikan tekanan gas semakin halus, dengan ditandai dengan berkurangnya porositas yang dapat dilihat seperti hasil porositas pada Gambar 4.10. Selain itu dari hasil pengamatan EDAX pada Gambar 4.8 terdapat beberapa struktur lamellar, salah satunya adalah *grey lamellar* yang dari hasil EDAX diindikasikan sebagai oksida. Semakin tinggi tekanan yang diberikan struktur *grey lamellar* semakin berkurang pada lapisan coating yang dapat dilihat seperti hasil pengujian SEM Gambar 4.7. Menurut Davis, (2014) oksida yang terdapat lapisan coating mempengaruhi daya lekat pada lapisan coating, semakin banyak oksida yang terbentuk mengurangi daya lekat dari lapisan coating.

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



4.6 Hasil Pengujian XRD

Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan untuk mengetahui senyawa yang terbentuk pada *as-received coating* (spesimen uji setelah proses *coating*). Hasil Pengujian XRD dapat dilihat pada Gambar 4.16



Gambar 4.16 Hasil analisa XRD pada permukaan lapisan coating dengan variasi tekanan 6 bar



Dari Gambar 4.16 Hasil pengujian XRD lapisan coating dengan material coating FeCrBMnSi dan NiAl. Dari hasil XRD menunjukkan intensitas dari tertinggi ke intensitas terendah pada posisi 2θ di 44.3988° terbentuk senyawa larutan padat (solid solution) FeCr dan NiCr, terbentuk dua fasa karena pada hasil XRD terdapat dua puncak peak yang berhimpit. 51.6754° terbentuk solid solution NiCr. 43.9602° terbentuk solid solution FeNi. Pada posisi 2θ 82.5140° mengindikasikan terbentuknya senyawa larutan padat FeMn_4 .

Berdasarkan Gambar 4.16 senyawa FeCr merupakan fasa intermetalik yang terbentuk dari reaksi Fe (64%) dan Cr (29%), berdasarkan tabel 3.2 merupakan unsur yang paling dominan pada material *top coating*. Fasa intermetalik FeCr berpengaruh terhadap ketangguhan lapisan *coating*, sehingga tidak mudah terkelupas saat menerima beban kejut (Yuping Wu, dkk, 2006). Pada posisi yang sama dari hasil analisis XRD terdapat dua puncak, puncak yang kedua mengindikasikan terbentuknya senyawa NiCr.

Senyawa NiCr ini terbentuk berdasarkan komposisi *bond coating* Ni (95%) dan komposisi *top coating* Cr (29%). Pelapisan berbasis Ni digunakan dalam aplikasi ketika ketahanan aus dikombinasikan dengan ketahanan oksidasi atau ketahanan korosi panas (*hot corrosion resistance*) diperlukan (Miguel, 2003). Penambahan logam paduan berbasis Ni bertujuan untuk meningkatkan sifat tertentu.

Chromium memberikan ketahanan terhadap oksidasi dan korosi temperatur tinggi dan meningkatkan kekerasan lapisan dengan membentuk endapan yang sangat keras (Gonzalez, et al., 2007). Dari penjelasan diatas paduan NiCr yang terbentuk adalah paduan yang mampu melindungi substrat dengan kombinasi ketahanan korosi temperatur tinggi dan kekerasan lapisan coating.

Pada Tabel 3.3 penggunaan pada wire bond coating unsur Ni sebesar 90%. Penambahan unsur Ni hingga 70% akan memberikan kekuatan dan ketangguhan pada matriks, menjadikan lapisan coating stabil pada temperatur tinggi, meningkatkan ketahanan oksidasi, karburisasi, nitridisasi juga meningkatkan resistansi terhadap *thermal fatigue* (A 14-12-09-high-temperature notes).

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



Senyawa FeNi adalah senyawa paduan yang memiliki sifat mekanik yang baik pada temperatur tinggi dan memiliki ketahanan korosi yang baik (Shaikh, 1998). Senyawa FeMn₄ adalah senyawa *ferro manganese* adalah senyawa yang meningkatkan sifat mekanik dan sifat ketahanan korosi (Dybkov, 2016).

4.7 Pengamatan Hasil Anneling

Pengamatan hasil anneling dilakukan dengan cara membandingkan hasil yang didapat dari pengamatan coating biasa dengan pengamatan yang dilakukan coating dengan perlakuan anneling. Proses anneling pada coating dilakukan dengan cara memanaskan spesimen yang sudah di coating pada furnace dengan temperatur 500 °C, kemudian di tahan selama 2 jam, kemudian di dinginkan secara perlahan di dalam furnace (Sudiro, 2015). Hasil dari perlakuan anneling akan di bahas pada subsbab berikut ini.

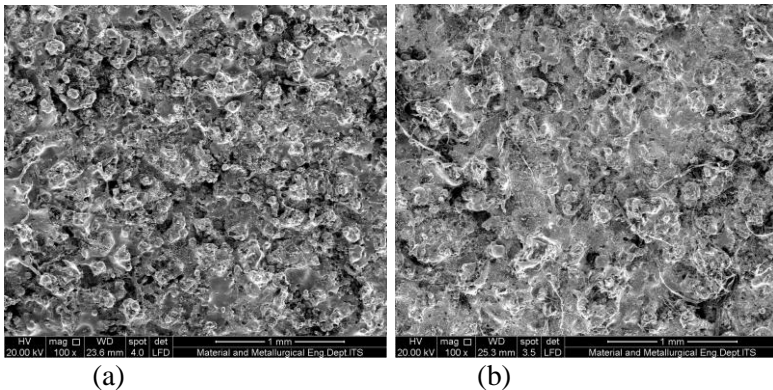
4.7.1 Morfologi Permukaan Coating

Pengamatan anneling pada bagian surface coating di amati dengan menggunakan SEM pada perbesaran 100x hingga 500 x, yang dapat dilihat seperti Gambar 4.17.

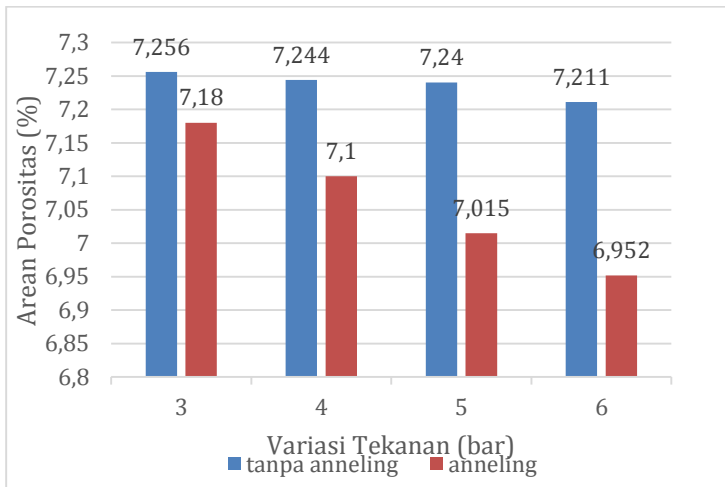
Dari Gambar 4.17 di dapat perbedaan morfologi permukaan dari lapisan coating yang tanpa anneling dan yang di anneling dari pengamatan visual terlihat dengan perlakuan anneling, lapisan coating yang dulunya terdapat gumpalan menjadi lebih melting dibandingkan yang diberi perlakuan. Dengan makin meltingnya permukaan. Menurut mursal, (2015) dengan diberikannya perlakuan anneling pada lapisan coating maka memberikan atom - atom waktu tersusun secara teratur sehingga tersusun morfologi permukaan yang lebih halus. Dengan makin halusya lapisan permukaan coating maka porositas pada permukaan coating makin sedikit (Shauma, 2015). Hal senada juga dikatakan oleh wang, (1999) bahwa dengan berkurangnya ukuran rongga, maka porositas pada lapisan coating menurun dengan ditandai makin halusya morfologi pada lapisan coating.



Untuk membandingkan porositas pada permukaan coating tanpa anneling dan dengan anneling pada permukaan coating dilakukan pengamatan porositas permukaan coating dengan image J, dan hasilnya seperti Gambar 4.18. Dari grafik tersebut dapat dilihat penurunan area yang mengalami porositas pada permukaan coating. Hal ini disebabkan karena adanya proses anneling dengan pemanasan dan waktu tahan tertentu memberika atom – atom waktu lebih leluasa untuk tersusun secara teratur sehingga tersusun morfologi permukaan coating yang lebih halus (Mursal, 2015). Dengan semakin halusya permukaan coating maka rongga yang ada didalam lapisan coating menurun.



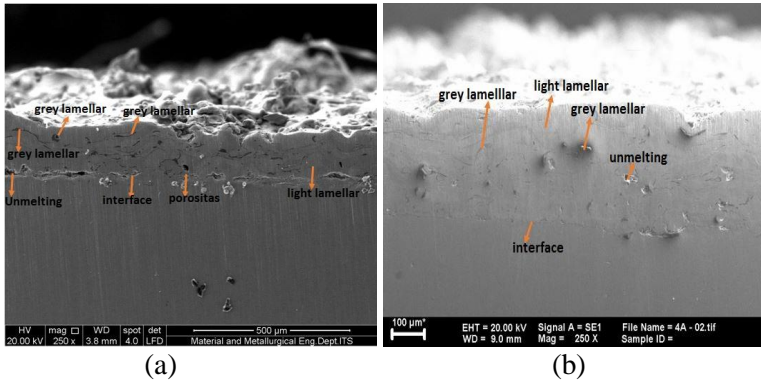
Gambar 4.17 Perbedaan morfologi permukaan coating dengan variasi tekanan 5 bar (a) lapisan coating tanpa anneling , (b) lapisan coating dengan perlakuan anneling pada perbesaran 100x



Gambar 4.18 Hasil analisis pada porositas pada permukaan coating tanpa anneling dengan anneling.

4.7.2 Morfologi Penampang Melintang Coating

Pengamatan dan perbandingan morfologi penampang melintang antara tanpa anneling dengan anneling menggunakan alat SEM dengan perbesaran 100x hingga 250x dapat dilihat seperti Gambar 4.19. Untuk melihat lebih dalam morfologi dari penampang melintang dari lapisan coating antara tanpa anneling dengan anneling dilakukan perbesaran pada SEM 250x. Dapat dilihat seperti Gambar 4.19.



Gambar 4.19 Hasil pengujian penampang melintang pada lapisan coating dengan variasi tekanan 4 bar (a) lapisan coating tanpa annealing, (b) lapisan coating dengan perlakuan annealing

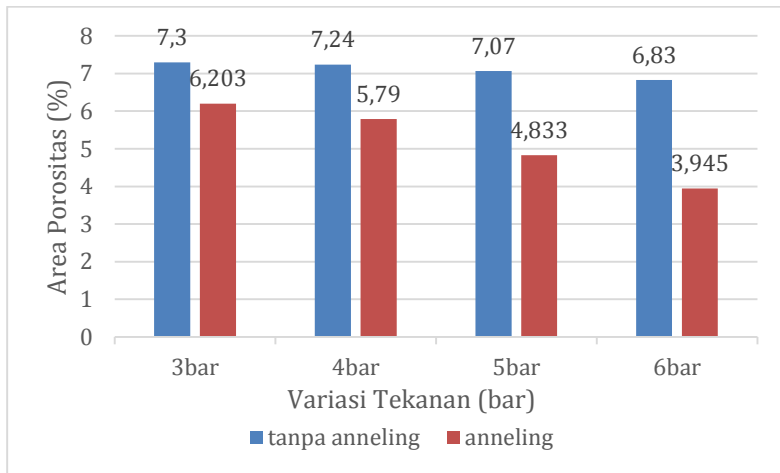
Dari hasil Gambar 4.19 terdapat perbedaan morfologi penampang melintang lapisan coating dengan annealing dan tanpa annealing. Dari pengamatan secara visual, dengan perlakuan annealing memperhalus morfologi dari lapisan coating. Dengan makin halusya lapisan coating maka rongga yang ada di dalam lapisan coating akan menurun.

Menurunya lapisan rongga di akibatkan karena proses annealing yang merupakan pemanasan kembali memberikan partikel menyusun kembali secara teratur, dan juga memberikan kesempatan partikel yang belum meleleh sempurna menjadi lelehan sehingga menutupi rongga – rongga yang ada (Mursal, 2015).

Dari pengamatan secara visual lapisan coating dengan perlakuan annealing memiliki rongga yang lebih sedikit dibandingkan dengan lapisan coating tanpa annealing. Selain itu struktur *grey lamellar* pada lapisan coating dengan perlakuan annealing berkurang, yang menandakan bekurangnya oksida di dalam lapisan coating. Berkurangnya rongga – rongga di dalam lapisan coating berarti porositas di dalam lapisan coating berkurang.



Porositas lapisan coating di amati menggunakan aplikasi image J pada beberapa titik di lapisan coating. Hasilnya dapat dilihat seperti Gambar 4.20 dibawah ini.



Gambar 4.20 Hasil analisa porositas pada penampang melintang lapisan coating tanpa anneling dengan lapisan coating yang di anneling.

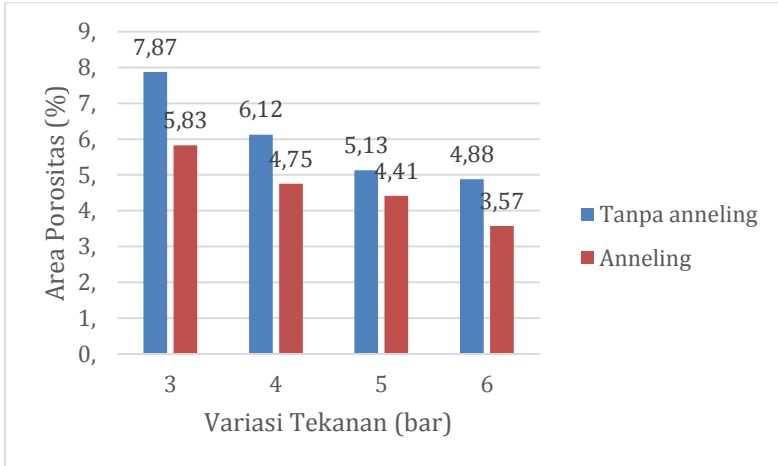
Dari Gambar 4.20 penurunan area yang terdapat porositas setelah diberikan perlakuan anneling. Penurunan area yang mengalami porositas lebih jauh dari pada area surface. Hal ini karena pada bagian penampang melintang yang sudah di grinding lapisan coating partikelnya di belah dan terlihat jelas rongga pada lapisan coating. Sedangkan pada surface bagian yang rendah dapat dianalisa sebagai porositas.

4.7.3 Pengujian Porositas

Pengujian porositas pada lapisan coating yang di anneling dilakukan untuk mengetahui perbandingan porositas pada lapisan coating tanpa perlakuan anneling dengan lapisan coating yang di



annealing. Untuk melihat perbandingan porositas lapisan coating tanpa annealing dengan annealing dapat dilihat seperti Gambar 4.21.



Gambar 4.21 Hasil analisis uji porositas pada lapisan coating tanpa annealing dan annealing.

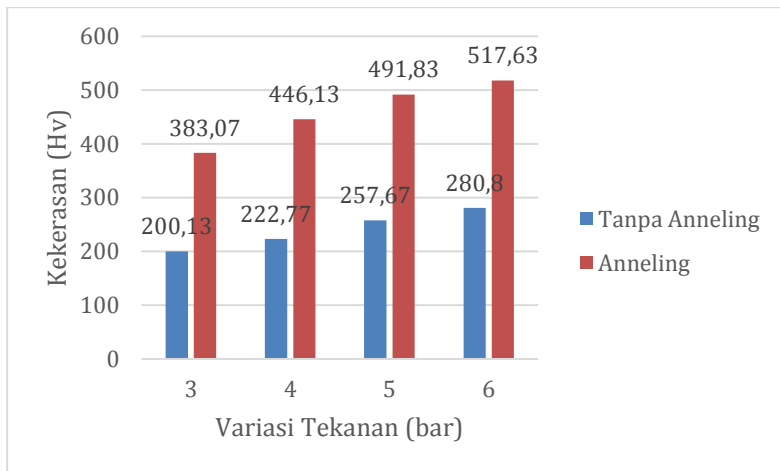
Gambar 4.21 terlihat terjadi penurunan porositas pada lapisan coating yang diberi perlakuan annealing. Hasil penurunan porositas juga didapat dalam pengamatan porositas menggunakan aplikasi image J pada Gambar 4.18 dan 4.20. Dari ketiga data pengujian porositas tersebut, proses annealing berpengaruh pada perubahan morfologi lapisan coating, yang menyebabkan lapisan coating lebih halus, lebih halusanya morfologi lapisan coating akan mengurangi porositas pada lapisan coating (Wang, 1999). Dari data pengujian perbandingan lapisan coating tanpa annealing dan dengan annealing, pada lapisan coating dengan perlakuan memiliki porositas lebih kecil dari pada lapisan coating tanpa perlakuan.

4.7.4 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk membandingkan lapisan coating tanpa perlakuan annealing dengan perlakuan



annealing, pengujian ini menggunakan alat *microhardness vicker tester* (Model 402MVD S/N “V2D531”) di tiga lokasi pada permukaan coating. Beban yang digunakan adalah 500 gf dengan lama identasi 30 detik. Hasil pengujian dapat dilihat seperti Gambar 4.22.



Gambar 4.22 Hasil perbandingan uji kekerasan lapisan coating dengan annealing dan tanpa annealing.

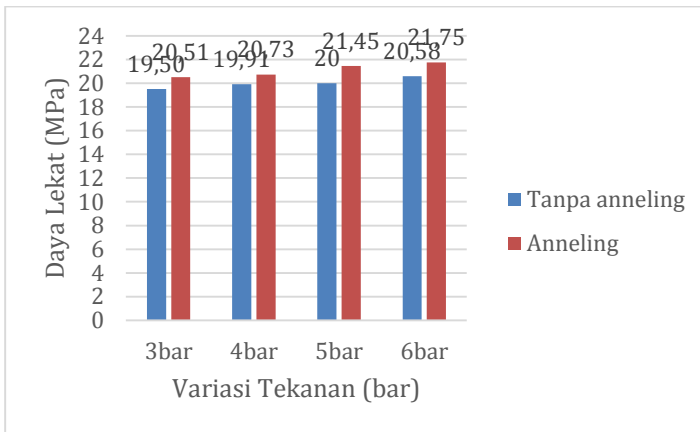
Dari Gambar 4.22 terjadi peningkatan kekerasan pada lapisan coating dengan perlakuan annealing hal ini disebabkan oleh beberap hal salah satunya adalah struktur mikronya lebih homogen (Sudiro, 2015). Menurut mursal, (2015) dengan diberikannya perlakuan annealing pada lapisan coating maka memberikan atom - atom waktu tersusun secara teratur sehingga tersusun morfologi permukaan yang lebih halus. Struktur mikro yang lebih homogen dan halus dapat dilihat dari berkurangnya porositas yang dapat dilihat seperti Gambar 4.21 yang merupakan hasil pengujian porositas pada lapisan coating dengan annealing dan tanpa annealing. Dari gambar grafik tersebut porositas pada lapisan coating annealing berkurang, dari berkurangnya porositas pada



lapisan coating akan meningkatkan kekerasan pada lapisan coating (Daengmool, 2006).

4.7.5 Pengujian Pull of Bonding

Pengujian *pull of* dilakukan untuk membandingkan lapisan coating yang terdapat perlakuan aneling dan tidak di aneling. Untuk melihat hasil pengujian dapat dilihat seperti Gambar 4.23. Pengujian *pull of* dilakukan sama halnya dengan pengujian *pull of* lapisan coating tanpa perlakuan aneling.



Gambar 4.23 Hasil perbandingan pull of lapisan coating dengan aneling dan tanpa aneling.

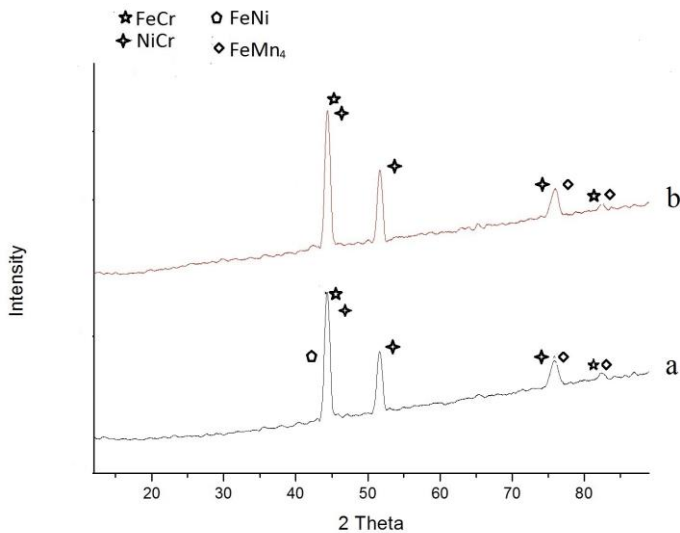
Dari Gambar 4.23 dengan perlakuan aneling akan meningkatkan daya lekat dari lapisan coating dengan material substrat. Meningkatnya daya lekat setelah aneling disebabkan oleh berkurangnya porositas, unmelting material, dan oksida yang ada pada lapisan coating. Hal itu dapat dilihat seperti hasil pengujian SEM Gambar 4.19, dimana hasil SEM terlihat morfologi dari hasil aneling menunjukkan berkurangnya *grey lamellar* yang diindikasikan sebagai oksida (Irawan, 2016). Semakin halus morfologi permukaan yang ditandai dengan berkurangnya porositas seperti Gambar 4.21. Selain itu dengan dilakukannya

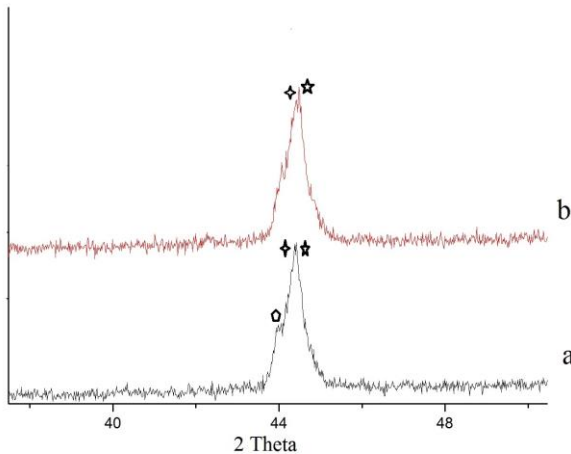


annealing membuat lapisan coating dan substrat membentuk *metallurgical bond* yang lebih baik (Irawan, 2016)

4.7.6 Pengujian XRD

Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan untuk melihat fasa yang terbentuk setelah dilakukan perlakuan annealing pada lapisan coating. Dari hasil pengujian didapat hasil seperti Gambar 4.24





Gambar 4.24 Hasil pengujian XRD lapisan coating dengan variasi tekanan 6 bar, (a) lapisan coating tanpa annealing, (b) lapisan coating dengan annealing.

Dari hasil XRD didapat FeCr memiliki puncak yang tajam. Puncak tajam menandakan fasa tersebut lebih kristalin (Irawan, 2016). Terdapat peningkatan puncak setelah dilakukan proses annealing, peningkatan puncak ini dapat ditandai dengan semakin tajamnya grafik atau turunya nilai FWHM (Irawan, 2016). Nilai FWHM FeCr lapisan coating tanpa proses annealing adalah 0.1004 sedangkan setelah annealing menurun menjadi 0.0612. Turunya nilai FWHM menandakan ukuran grain kristal membesar yang artinya terjadi proses kristalisasi.

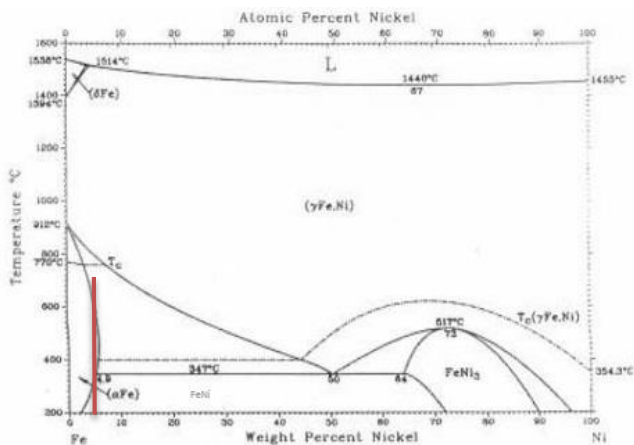
Dari Gambar 4.24 hasil dari XRD menunjukkan setelah perlakuan annealing pada temperatur 500°C terdapat fasa yang hilang yaitu juga FeNi. FeNi merupakan *solid solution* yang terdiri dari dua bagian yaitu solute (terlarut) dan solvent (pelarut). Solute merupakan bagian yang lebih sedikit, sedang solvent adalah bagian yang lebih banyak.

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



Biasanya jumlah solute yang dilarutkan oleh solvent merupakan fungsi temperatur, makin meningkat dengan naiknya temperatur. Ada tiga kemungkinan kondisi larutan yaitu tidak jenuh (unsaturated), jenuh (saturated) dan lewat jenuh (supersaturated). Larutan dikatakan tidak jenuh bila jumlah solute yang terlarut masih di bawah jumlah yang mampu dilarutkan oleh solvent pada temperatur dan tekanan yang dimaksud. Jika jumlah solute yang larut tepat mencapai batas kelarutannya dalam solvent, dikatakan sebagai larutan jenuh. Larutan lewat jenuh terjadi bila jumlah solute yang larut telah melampaui batas kelarutannya pada temperatur dan tekanan tersebut.

FeNi diidentifikasi tidak hilang melainkan membentuk solid solution dengan unsur yang lain, hal ini dibuktikan dari EDAX unsur Fe dan Ni masih ada didalam lapisan coating, hasil EDAX dilihat pada lampiran A.13. Hilangnya senyawa solid solution FeNi diakibatkan proses annealing membuat Ni larut pada matriks Fe hal ini dapat dilihat dari diagram kesetimbangan fasa FeNi pada Gambar 4.25.



Gambar 4.25 diagram fasa FeNi



Dari Gambar 4.25 terlihat batas kelarutan dari FeNi dibawah 500°C dapat menjadi Fe dan membentuk solid solution dengan Cr menjadi FeCr dan Ni membentuk solid solution Cr membentuk NiCr yang terdapat pada hasil XRD.

Dari semua pengujian yang dijelaskan diatas tekanan gas pada pelapisan pencampuran coating FeCrBMnSi dengan NiAl berpengaruh terhadap sifat mekanik dan morfologi coating dengan metode *twin wire arc spray*. Dari beberapa variasi tekanan yaitu 3 bar, 4 bar, 5 bar, dan 6 bar. Hal ini dapat dijelaskan pada lampiran A.12 tabel anova, tabel ini menjelaskan pengaruh tekanan terhadap porositas, densitas, kekerasan, adhesi, dan ketebalan. Pengaruh tekanan terhadap porositas, densitas, kekerasan, adhesi, dan ketebalan dapat dilihat dari hasil analisa tabel anova yang menunjukkan eror kurang dari 5%. Morfologi lapisan coating yang baik didapat pada variasi tekanan 6 bar karena memiliki morfologi yang halus dengan terbentuknya *grey lamellar (oxide stringer)* yang sedikit, porositas yang paling kecil. Sifat mekanik pada tekanan 6 bar memiliki nilai kekerasan paling tinggi yaitu 280,80 Hv dan juga kekuatan lekat paling tinggi yaitu 20,58 MPa. Menurut wang, (1999) dengan hasil penelitian menggunakan variasi tekanan 0,31 MPa (3,1 bar), 0,45 MPa (4,5 bar), dan 0,59 (5,9 bar). Didapat porositas terendah pada tekanan 0,59 MPa, peningkatan gas mengurangi ukuran partikel, meningkatkan kecepatan partikel, meningkatkan densitas dan meningkatkan daya rekat pada lapisan coating. Dari penelitian ini belum didapat titik puncak, semua data yang didapat menunjukkan peningkatan setiap kenaikan variabel tekanan pada lapisan coating. Peningkatan tekanan menjadi lebih besar lagi tidak dapat dilakukan karena keterbatasan alat dalam meningkatkan tekanan pada proses pelapisan coating.



BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan data penelitian dan analisis yang telah dilakukan dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Peningkatan tekanan menyebabkan mikrostruktur lapisan coating lebih baik dan penurunan persentase porositas hingga 4.88% pada variabel tekanan 6 bar.
2. Peningkatan tekanan gas akan menyebabkan penurunan ketebalan lapisan coating, ketebalan lapisan coating terendah 117.97 μm pada variabel tekanan 6 bar.
3. Peningkatan tekanan gas menyebab nilai kekerasan mikro yang cenderung meningkat hingga 280, 8 Hv pada variabel tekanan 6 bar.
4. Peningkatan tekanan gas memberikan peningkatan kekuatan adhesif coating hingga 20.58 MPa pada variabel tekanan 6 bar
5. Proses aneling pada lapisan coating menurunkan persentase porositas, meningkatkan kekerasan, dan meningkatkan kekuatan adhesifnya.

5.2 Saran

Disarankan dalam pelaksanaan penelitian berikutnya agar:

1. Proses pelaksanaan coating lebih diperhatikan, dilakukan pada ruangan yang vakum ataupun tertutup rapat agar mendapat lapisan coating yang maksimal.
2. Parameter kombinasi *feed rate* yang berbeda antara NiAl dan FeCrBMnSi ditambahkan untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat terhadap morfologi dan sifat mekanik lapisan coating.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)



DAFTAR PUSTAKA

- ASME Sec 1. Rules For Construction Power Boilers. 2010
ASME Sec 2. Materials and Spesification. 2010
ASM Handbook 5 Surface Engineering. 1994
ASM Chapter 2 Thermal Expansion. 1994
A 14-12-09-high-temperature notes
Azo Materials. 2012. **Standart Specification for Steel**. United States.
Akbar, Muhammad Sjahid, Fredi Suryadi, and Dedy Dwi Prastyo. 2009. **Economizer Pada Boiler**. Jurnal Teknik Industri, Vol. 11, No.1.
Bahrudin, Imam. 2014. **Peningkatan Efisiensi Boiler dengan Economizer**. Jember. PT Rea Kaltim Platations.
Chaitanya. 2007. **Processing and Characterization of Nickel-Aluminide Coating On Metal Substrates**. Master of Technology In Mechanical Engineering Thesis. National Institute of Technology, Roukela.
Davis, J.R. 2004. **Handbook of Thermal Spray Processing**. ASM International and the Thermal Spray Society
Daengmool, Reungruthai, Sitichai Wirijanupathum, Sukanda J., Apicat Sopadang. **Effect of Spray Parameter on Stainless Steel Arc Sprayed Coating**. MP03 (2006).
eFunda stands for engineering fundamentals. 2017. **Standart Alloy Steel**. Sunnysvale, CA
Gedzevicius, I., Bolot, R., Liao, H., Coddet, C., 2003. **Application of CFD for Wire-Arc Nozzle Geometry Improvement**. Proceeding of The International Thermal Spray Conference. Orlando, 5-8 Mei. Diedit oleh Basil R. Marple dan Christian Moroeau. USA: ASM International.
Hadi, Syafrul. 2016. **Pengaruh Komposisi Larutan dan Waktu Pelapisan Cr Terhadap Ketebalan dan Lapisan Kekerasan Permukaan pada Plat Kuningan**. Padang. Institut Teknologi Padang
-



-
- Irawan, Hengki. 2016. **Analisis Pengaruh Post-Annealing pada Proses Pelapisan Ni-Al dan FeCrBMnSi dengan Metode TWAS Terhadap Mikrostruktur dan Sifat Mekanik**. Surabaya. Program Studi Magister Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS
- JiXiu. 2005. **Arc Spray Forming of Stainless Steel Mould. Advances in Abrasive Technology**. Key Engineering Materials Vol 291-292. 603-608
- Kanaizuka, T. 1981. **Material Journal Bulletin**. Scien Direc
- Khanlari, Khasayar. 2015. **Design of Experiment of A Novel Cermet Coating Sprayed With The HVOF Technology**
- Kurniawan, Yudha. 2015. **Analisa Laju Korosi pada Pelat Baja dengan Variasi Ketebalan Coating**. Surabaya Jurnal Teknik ITS Vol.4, No.1.
- Larasati, Fitrianova. 2014. **Pengaruh Jarak Nozzle dan Tekanan Gas pada Proses Pelapisan Ni-20Cr dengan Metode Wire Arc Spray terhadap Ketahanan Thermal**. Surabaya : ITS
- Linda, Gill., Rodriguez, maria. 2011. **Wear Resistance of Post – Heat Treated HVOF Coatings Based on Cermet-Nickel Based Alloy Mixture**. 9th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology. WE1-1.
- Lisabella, Shaumma. 2016. **Pengaruh Tekanan Gas dan Jarak Nozzle terhadap Ketahanan Thermal dan Daya Lekat pada Proses Pelapisan Aluminium Substrat SS304 dengan Metode Arc Spray**. Surabaya : ITS
- Maranho O., D. Rodrigues, M. Bocalini, and A. Sinatora,. 2008. **Bond Strength of Multicomponent White Cast Iron Coatings Applied by HVOF Thermal Spray Process**, *Journal of Thermal Spray Technology* 18(4), 708-713
- Master of Science Thesis. Tampere University of Technology, Finland.
- Marantz, D.R. 1974. **The basic principles of electric-arc spraying, in The Science and Technology of Surface**
-



-
- Coatings**, B.N. Chapman and J.C. Anderson, (Eds), Academic Press, London, UK, pp. 308–321
- Noerwasisto, V.Totok and Mas Santoso. 2006. **Pengaruh “Thermal Propertiest” Material Bata Merah**. Surabaya Dimensi Teknik Arsitektur, Vol. 34, No.2.
- Okkamuto,H. 1993. **Al-Ni Journal of Phase Equilibria**, 14. No.2, 257-259.
- Otto Knotek. 2001. **Hard Coating with Thermal Spraying Processes**.
- Pawlowski, L. 2008. **The Science And Engineering Of Thermal Spray Coatings**. France .Willey.
- Pheely,2016. **Material standart**. USA
- Sarikaya, O., 2005. **Effect of Some Parameters On Microstructure And Hardness of Alumina Coatings Prepared by Air Plasma Spraying Process**. Surface Coat. Technol., 190: 388-393
- Setiyawan, Muh Taufiq. 2016. **Ketahan Coating Ni yang Dibentuk Melalui Elektroplating Terhadap Beban Panas Kejut**. Surakarta. Universitas Muhammadiyah Surakarta
- Shauma, Lisabella. 2015. **Pengaruh tekanan dan jarak nozel terhadap proses pelapisan ss 301 dengan arc spray**. Surabaya. ITS
- Sihombing, Helmon. 2009. **Mekanisme Proses Pemanasan Air di Dalam Boiler**. Medan. Teknologi Instumen Pabrik, Unsu.
- Sidhu, T. S., Prakash, S., Agrawal, R. D. **Hot Corrosion and Performance of Nickel-Based Coatings**. Current Science, Vol. 09 No.1, 10 January 2006.
- Suherman, Wahid. 1999. **Ilmu Logam 2**. Surabaya : ITS Press
- V. N. Shukla, Nidhi Rana, R. Jayaganthan, V. K. Tewari. 2014. **Degradation Studies of Wire arc Sprayed FeCrBSiMn alloy Coating in Molten Salt Environment**. Indian Institute of Technology, India.
-



-
- Wang, X., Heberlein, J., Pfender, E., Gerberich, W., **Effect of Nozzle Configuration, Gas Pressure, and Gas Type on Coating Properties in Wire Arc Spray**, JTTEE5 8:565-575 (1999)
- Yu, Fu-Bin. 2009. **Effect of Heat Treatment on The Microstructure and Mechanical Propertist of Fe-based Amorphous Coatings**. *Journal of Alloy and Compound*. 480:422-427.
- Yuping Wu, Pinghua, Lin. Guozhie Xie. 2006. **Formation of Amorphous and Nanocrystalline Phase in High VelocityOxy-Fuel Thermally Sprayed a Fe-Cr-B-Mn-Si Alloy**. *Materials Science Engineering. A* 430 34-39.



LAMPIRAN

A.1 Alat Penunjang Pengamatan Visual Hasil Grit Blasting



Gambar ISO 8501-1:1988 Standart pengamatan visual hasil grit blasting

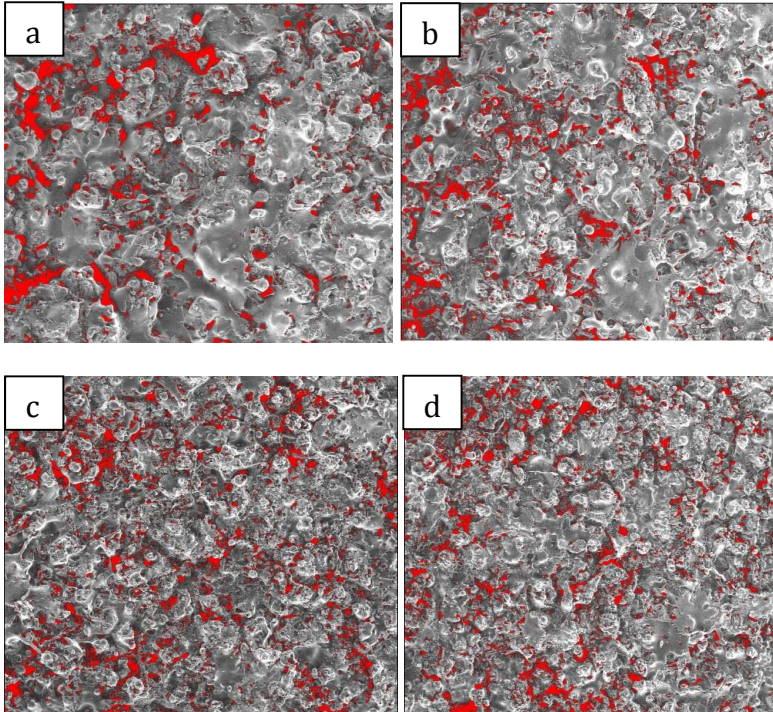
A.2 Bahan Penunjang Pull Of Bonding



Gambar perekat/lem epoxy adhesive



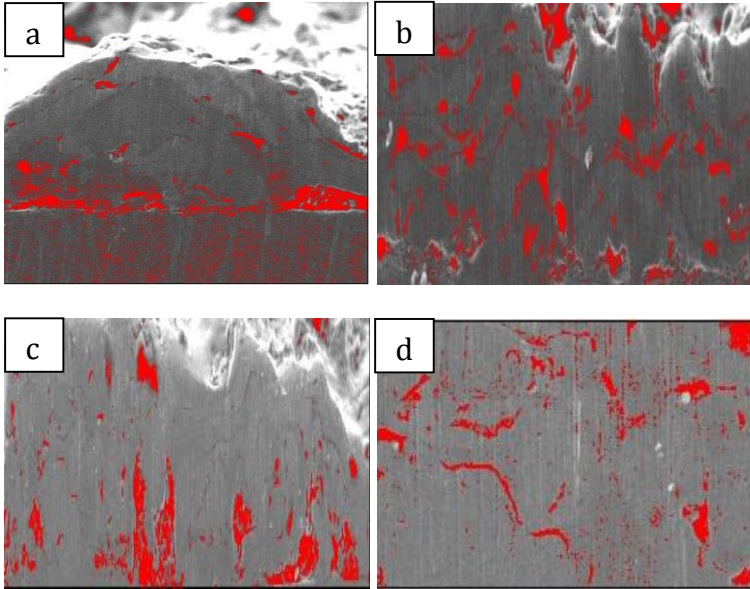
A.3 Hasil Pengujian Porositas Image J Surface Lapisan Coating



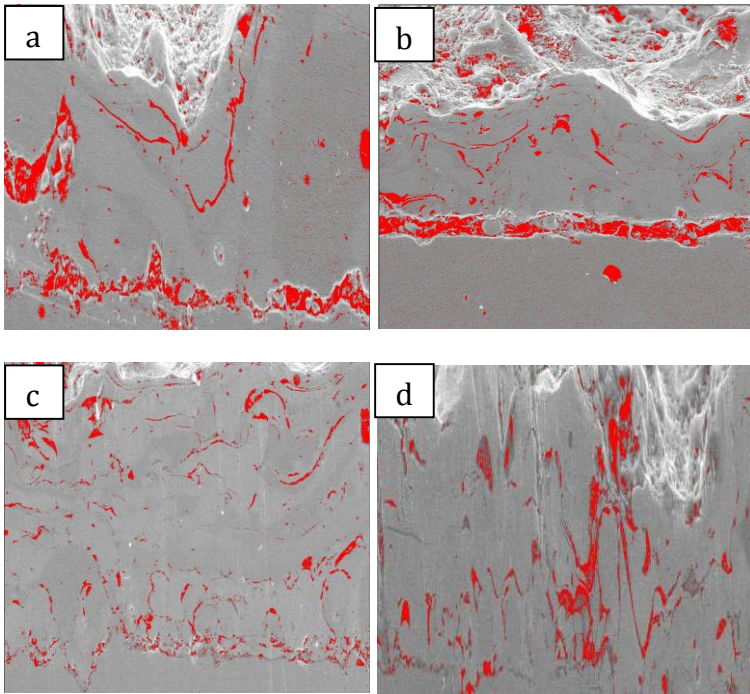
Gambar hasil uji porositas dengan aplikasi image J pada permukaan lapisan coating (a) 3 bar, (b) 4 bar, (c) 5 bar, (d) 6 bar



A.4 Hasil Pengujian Porositas Image J Penampang Melintang lapisan Coating



Gambar hasil uji porositas image J penampang melintang lapisan coating (a) 3 bar, (b) 4 bar, (c) 5 bar, (d) 6 bar

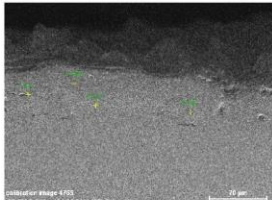


Gambar Hasil Uji Image J Setelah Annealing (a) 3 bar, (b) 4 bar, (c) 5 bar, (d) 6bar

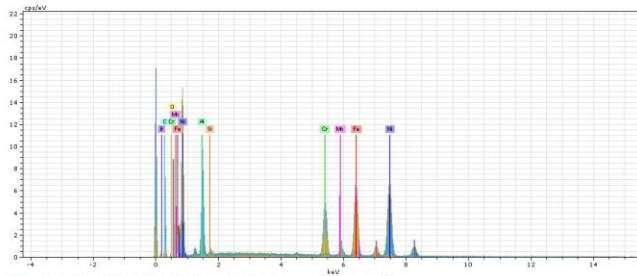


A.5 Hasil Uji EDAX Titik

6B



calibration image 4765 Date:6/22/2017
11:33:32 AM Image size:512 x
384 Mag:500x HV:20.0kV



3 140 Date:6/22/2017 11:35:56 AM HV:20.0kV Puls th.:4.19kcps
3 137 Date:6/22/2017 11:36:32 AM HV:20.0kV Puls th.:4.83kcps
3 138 Date:6/22/2017 11:37:06 AM HV:20.0kV Puls th.:4.79kcps
3 141 Date:6/22/2017 11:40:27 AM HV:20.0kV Puls th.:2.42kcps

Mass percent (%)

Spectrum	B	C	O	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
3 140	0.00	10.20	20.22	20.07	0.24	1.19	0.67	4.03	43.38
3 137	0.00	15.92	0.00	3.04	0.27	0.74	0.44	2.01	77.56
3 138	0.00	12.74	0.70	0.03	0.62	23.21	1.55	56.08	5.06
3 141	0.00	3.18	0.04	0.00	0.00	16.76	2.68	69.71	7.62
Mean value:	0.00	10.51	5.24	5.79	0.28	10.48	1.34	32.96	33.41
Sigma:	0.00	5.42	9.99	9.63	0.26	11.30	1.01	35.03	34.24
Sigma mean:	0.00	2.71	5.00	4.81	0.13	5.65	0.51	17.51	17.12

6/22/2017

4. Page



A.6 Hasil Pengujian Porositas

Tabel Hasil Pengujian Porositas Sebelum Anneling

Tekanan (bar)	Berat Kering di Udara (gr)	Berat Basah (gr)	Berat awal (gr)	Porositas (%)
3	1,7064	1,6937	1,7054	7,874015748
4	1,6337	1,6239	1,6331	6,12244898
5	1,4268	1,419	1,4264	5,128205128
6	1,6299	1,6176	1,6293	4,87804878

Tabel Hasil Uji Porositas Anneling

Tekanan (bar)	Berat Kering di Udara (gr)	Berat Basah (gr)	Berat awal (gr)	Porositas (%)
3	1,5384	1,4647	1,5341	5,834464043
4	1,6442	1,63788	1,6439	4,746835443
5	1,9298	1,8573	1,9266	4,413793103
6	1,8045	1,5605	1,7958	3,56557377

Rumus Porositas: $\frac{W-D}{W-S} \times 100$ W: Berat kering di udara (gr)
D: Berat awal (gr)
S: Berat Basah dalam air (gr)



A.7 Hasil Pengujian Densitas

Tabel Data Uji Densitas

uji picno tanpa aneling berat awal				
Langkah	3bar	4bar	5bar	6bar
Wo	17,4153	17,4692	17,4322	17,4317
W1	19,1178	19,3402	19,0497	19,0736
W3	42,2681	42,2645	42,2165	42,2978
W2	43,3887	43,6582	43,5521	43,7447

Tabel Hasil Perhitungan Densitas

Uji picno tanpa aneling			
variasi tekanan gas			
3	4	5	6
17,4153	17,4692	17,4322	17,4317
19,1178	19,3402	19,0497	19,0736
42,2681	42,2645	42,2165	42,2978
43,1717	43,6582	43,5521	43,7447
2,23	4,09	6,02	8,83

Rumus Densitas : $\frac{w1-w0}{(w3-w0)-(w2-w1)} \times (DL-DA)+DA$

W0: berat pikno kosong

W1: berat pikno+sample

W3: berat pikno+aquadess

W4: berat pikno+aquadess+sample

DA:0,001176

DL:0,996512



A.8 JCPDS FeCr

Date: 6/14/2017 Time: 10:36:56 AM User: Teknik Material

File: 6 bar

User: Teknik Material

Name and formula

Reference code: 00-034-0396
 Compound name: Iron Chromium
 Common name: 434L stainless steel
 Empirical formula: $\text{Cr}_{0,28}\text{Fe}_{1,74}$
 Chemical formula: Fe₂Cr

Crystallographic parameters

Crystal system: Cubic
 Space group: Im-3m
 Space group number: 229
 a (Å): 2.8760
 b (Å): 2.8760
 c (Å): 2.8760
 Alpha (°): 90.0000
 Beta (°): 90.0000
 Gamma (°): 90.0000
 Volume of cell (10^{-6} pm^3): 23.79
 Z: 1.00
 RIR: 0.59

Subfiles and quality

Subfiles: Alloy, metal or intermetallic
 Common Phase
 Educational pattern
 Inorganic
 Quality: Indexed (J)

Comments

Color: Black
 Creation Date: 9/29/1993



Date: 6/14/2017 Time: 10:36:56 AM User: Teknik Material

File: 6 bar

User: Teknik Material

Modification Date: 1/11/2011

Analysis: Spectroscopic analysis (wt %): Fe 80.10, Cr 11.70, Si 0.59, Mn 0.09, Ag 0.01, Mo 1.39, Ni 0.33, P 0.01, plus trace elements. Color: Black.

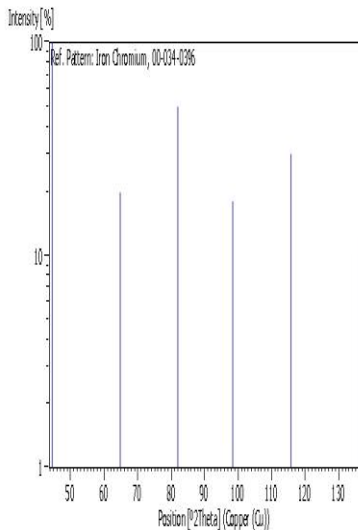
References

Primary reference: Pfoertsch et al., Penn State Univ., University Park, PA, USA., JZDD Grant-in-Aid (1983)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2 θ (deg)	I (%)
1	1	1	0	2.03500	44.485	100.0
2	2	0	0	1.43600	64.779	20.0
3	2	1	1	1.17430	81.986	50.0
4	2	2	0	1.01700	98.475	18.0
5	3	1	0	0.90950	115.763	30.0
6	2	2	2	0.83020	136.204	12.0

Stick Pattern





A.9 JCPDS NiCr

Date: 6/14/2017 Time: 11:07:43 AM User: Teknik Material

File: 6 bar

User: Teknik Material

Name and formula

Reference code: 01-074-5730
Compound name: Chromium Nickel
Empirical formula: $\text{Cr}_{0.1}\text{Ni}_{0.9}$
Chemical formula: $\text{Cr}_{0.1}\text{Ni}_{0.9}$

Crystallographic parameters

Crystal system: Cubic
Space group: Fm-3m
Space group number: 225

a (Å): 3.5350
b (Å): 3.5350
c (Å): 3.5350
Alpha (°): 90.0000
Beta (°): 90.0000
Gamma (°): 90.0000

Volume of cell (10^{-6} pm^3): 44.17
Z: 4.00

RIR: 7.45

Subfiles and quality

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

Comments

ANX: N
Creation Date: 11/19/2008
Modification Date: 1/19/2011
ANX: N



Date: 6/14/2017 Time: 11:07:43 AM User: Teknik Material

File: 6 bar

User: Teknik Material

Analysis: CrO.1 NO.9

Formula from original source: CrO.1 NO.9

ICSD Collection Code: 108344

Calculated Pattern Original Remarks: Cell of Ni: 3.533, annealed at 1273 K. Minor Warning: No e.s.d reported/abstracted on the cell dimension. No R factors reported/abstracted. Wyckoff Sequence: a(FM3-M). Unit Cell Data Source: Powder Diffraction.

References

Primary reference: Calculated from ICSD using POWD-12++

Structure: Ochiai, S, Mishima, Y., Suzuki, T., *Bull. Res. Lab. Precis. Mach. Electron. (Tokyo Inst. Technol.)*, **1984**, 15, (1994)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2 θ (deg)	I (%)
1	1	1	1	2.04090	44.349	100.0
2	2	0	0	1.76750	51.674	42.0
3	2	2	0	1.24980	76.099	16.6
4	3	1	1	1.06580	92.563	14.9
5	2	2	2	1.02050	98.020	4.0
6	4	0	0	0.88380	121.285	1.8
7	3	3	1	0.81100	143.542	5.6

Stick Pattern



A.10 JCPDS FeNi

Date: 6/14/2017 Time: 10:59:44 AM User: Teknik Material

File: 6 bar

User: Teknik Material

Name and formula

Reference code: 00-038-0419

Mineral name: Awanite
Compound name: Iron NickelEmpirical formula: FeNi₃Chemical formula: FeNi₃

Crystallographic parameters

Crystal system: Cubic
Space group: Pm-3m
Space group number: 221

a (Å): 3.5450

b (Å): 3.5450

c (Å): 3.5450

Alpha (°): 90.0000

Beta (°): 90.0000

Gamma (°): 90.0000

Volume of cell (10⁻⁶ cm³): 44.55

Z: 1.00

RIR: -

Subfiles and quality

Subfiles: Alloy, metal or intermetallic
Inorganic
Mineral

Quality: Blank (B)

Comments

Color: White in reflected light

Creation Date: 3/30/1987

Modification Date: 1/11/2011



Date: 6/14/2017 Time: 10:59:44 AM User: Teknik Material

File: 6 bar

User: Teknik Material

Analysis: Chemical analysis (wt.%): Fe 27.34, Ni 69.88, Co 2.78. Color: White in reflected light. General Comments: Highly magnetic. Sample Source or Locality: Specimen from Awarua Bay, New Zealand. Unit Cell Data Source: Powder Diffraction.

References

Primary reference: Williams, K., *Am. Mineral*, **45**, 450, (1960)
Structure: Lutts, A., Gielen, P., *Phys. Status Solidi A*, **41**, K81, (1970)

Peak list

Mo.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	1	2.04400	44.279	100.0
2	2	0	0	1.77200	51.533	60.0
3	2	2	0	1.25300	75.870	30.0
4	3	1	1	1.06900	92.205	40.0
5	2	2	2	1.02300	97.699	10.0
6	3	3	1	0.81400	142.281	10.0
7	4	2	0	0.79200	153.114	10.0

Stick Pattern



A.11 JCPDS FeMn₄

Date: 6/14/2017 Time: 12:33:03 PM User: Teknik Material

File: 200

User: Teknik Material

Name and formula

Reference code: 00-003-1180

Compound name: Iron Manganese
 Common name: β -Fe Mn₄

Empirical formula: FeMn₄
 Chemical formula: FeMn₄

Crystallographic parameters

Crystal system: Cubic
 Space group: P4132
 Space group number: 213

a (Å): 6.2900
 b (Å): 6.2900
 c (Å): 6.2900
 Alpha (°): 90.0000
 Beta (°): 90.0000
 Gamma (°): 90.0000

Volume of cell (10⁻⁶ cm³): 248.86
 Z: 4.00

RIR: -

Subfiles and quality

Subfiles: Alloy, metal or intermetallic
 Inorganic

Quality: Low precision (0)

Comments

Creation Date: 1/1/1970
 Modification Date: 1/11/2011
 Footnotes for D-spacings and Intensities: 1 Probably anomalously high due to absorption. (Ed.)
 General Comments: Quenched at 1025 C, a=6.278 with 70.2 wt.% Mn; a=6.303 with 88.0% Mn. Quenched at 710 C, a=6.274 with 70.6 wt.% Mn; a=6.271 with



Date: 6/14/2017 Time: 12:33:03 PM User: Teknik Material

File: 200

User: Teknik Material

66.1% Mn. (Gaylor, J. Iron Steel Inst., 128 293 (1933))

Reason Quality Was Assigned: O assigned because of inadequate range of intensities. (Ed.)

Unit Cell Data Source: Powder Diffraction.

References

Primary reference: Westgren, Phragmen., *Z. Phys.*, **33**, 764, (1925)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2 θ (deg)	I [%]
1	1	1	1	3.63000	24.509	17.0
2	2	1	0	2.81000	31.820	50.0
3	2	2	1	2.09000	49.254	83.0
4	3	1	0	1.99000	45.547	83.0
5	3	1	1	1.89000	48.104	83.0
6	3	2	0	1.74000	52.553	33.0
7	3	2	1	1.68000	54.582	83.0
8	4	1	0	1.52000	60.899	42.0
9	4	1	1	1.48000	62.728	67.0
10	4	2	0	1.40500	66.495	67.0
11	3	3	2	1.34000	70.178	42.0
12	4	3	0	1.26000	75.374	42.0
13	5	1	0	1.23400	77.251	100.0
14	5	1	1	1.21000	79.079	67.0
15	5	2	0	1.16800	82.524	100.0
16				1.15000	84.107	67.0

Stick Pattern



A.12 Tabel Anova

1. Tekanan dan Porositas

Hipotesis ;

H_0 : Tekanan tidak memberikan pengaruh terhadap porositas

H_1 : Tekanan memberikan pengaruh terhadap porositas

Taraf signifikan : $\alpha = 5\%$

Daerah Penolakan : Tolak H_0 jika $P\text{value} < \alpha$

Output software :

Analysis of Variance					
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	4,6925	4,6925	30,52	0,031
Residual Error	2	0,3075	0,1538		
Total	3	5,0000			

Keputusan : Tolak H_0 karena $P\text{value} (0,031) < \alpha (0,05)$

Kesimpulan : Tekanan memberikan pengaruh terhadap porositas

2. Tekanan dan Densitas

Hipotesis ;

H_0 : Tekanan tidak memberikan pengaruh terhadap densitas

H_1 : Tekanan memberikan pengaruh terhadap densitas

Taraf signifikan : $\alpha = 5\%$

Daerah Penolakan : Tolak H_0 jika $P\text{value} < \alpha$



Output software :

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	4,9459	4,9459	182,72	0,005
Residual Error	2	0,0541	0,0271		
Total	3	5,0000			

Keputusan : Tolak H_0 karena $P\text{value} (0,005) < \alpha (0,05)$

Kesimpulan : Tekanan memberikan pengaruh terhadap densitas

3. Tekanan dan Kekerasan

Hipotesis ;

H_0 : Tekanan tidak memberikan pengaruh terhadap kekerasan

H_1 : Tekanan memberikan pengaruh terhadap kekerasan

Taraf signifikan : $\alpha = 5\%$

Daerah Penolakan : Tolak H_0 jika $P\text{value} < \alpha$

Output software :

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	4,9459	4,9459	182,72	0,005
Residual Error	2	0,0541	0,0271		
Total	3	5,0000			

Keputusan : Tolak H_0 karena $P\text{value} (0,004) < \alpha (0,05)$

Kesimpulan : Tekanan memberikan pengaruh terhadap kekerasan



4. Tekanan dan Adhesi

Hipotesis ;

H_0 : Tekanan tidak memberikan pengaruh terhadap adhesi

H_1 : Tekanan memberikan pengaruh terhadap adhesi

Taraf signifikan : $\alpha = 5\%$

Daerah Penolakan : Tolak H_0 jika $P\text{value} < \alpha$

Output software :

Analysis of Variance					
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	4,6633	4,6633	27,70	0,034
Residual Error	2	0,3367	0,1683		
Total	3	5,0000			

Keputusan : Tolak H_0 karena $P\text{value} (0,034) < \alpha (0,05)$

Kesimpulan : Tekanan memberikan pengaruh pada adhesi

5. Tekanan dan Ketebalan

Hipotesis ;

H_0 : Tekanan tidak memberikan pengaruh terhadap Ketebalan

H_1 : Tekanan memberikan pengaruh terhadap Ketebalan

Taraf signifikan : $\alpha = 5\%$

Daerah Penolakan : Tolak H_0 jika $P\text{value} < \alpha$

Output software :

Analysis of Variance					
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	4,6358	4,6358	25,45	0,037
Residual Error	2	0,3642	0,1821		
Total	3	5,0000			

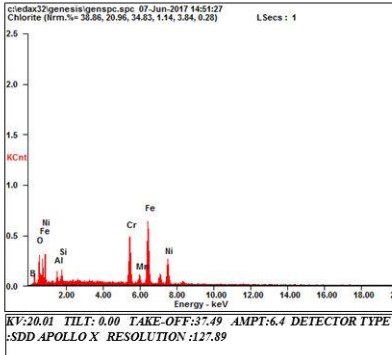
Keputusan : Tolak H_0 karena $P\text{value} (0,037) < \alpha (0,05)$

Kesimpulan : Tekanan memberikan pengaruh pada ketebalan



A.13 Hasil EDAX Lapisan Coating Anneling dan tanpa Anneling

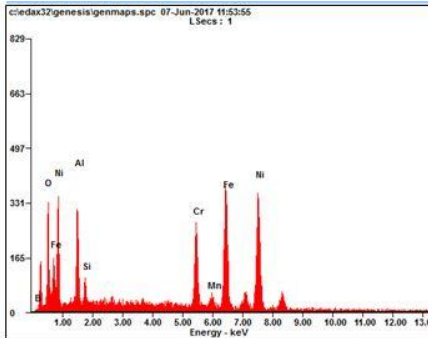
Hasil EDAX Lapisan Coating Sebelum Anneling Variasi Tekanan 6 bar



Element	Wt %	At %
B K	01.19	04.83
O K	06.81	18.70
Al K	02.34	03.81
Si K	02.29	03.59
Cr K	20.89	17.66
Mn K	00.91	00.73
Fe K	41.10	32.36
Ni K	24.47	18.32

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS SEC
TABLE : DEFAULT

Hasil EDAX Lapisan Coating Anneling Variasi Tekanan 6 bar



Element	Wt%	At%
BK	00.83	03.10
OK	09.39	23.75
AlK	09.73	14.58
SiK	01.83	02.64
CrK	12.13	09.44
MnK	00.84	00.62
FeK	25.70	18.62
NiK	39.55	27.25
Matrix	Correction	ZAF



(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Putu Ditha Pratama, lahir di Tabanan 5 Februari 1995. Merupakan anak kembar dari pasangan I Nyoman Parwata dan Ni Luh Putu Manik Widiyanti. Penulis telah menempuh Pendidikan formal, yaitu TK Widyastra, SDN 6 Ubung, SMPN 1 Singaraja, dan SMAN 1 Singaraja. Setelah lulus dari SMA tahun 2012, penulis diterima menjadi mahasiswa di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.

Semasa menjadi mahasiswa ITS penulis aktif dalam kegiatan organisasi HMMT (Himpunan Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi) dan TPKH-ITS (Tim Pembina Kerohanian Hindu ITS). Pada tahun kedua penulis menjadi staff Departemen Hubungan Luar HMMT FTI-ITS. Tahun ketiga penulis menjadi Wakil Ketua Bidang Eksternal TPKH-ITS. Pada tahun ketiga penulis mengambil kerja praktek disalah satu perusahaan pembuat pupuk terbesar di Indonesia yaitu PT.PETROKIMIA GRESIK yang berada di Gresik, Jawa Timur. Penulis menutup kuliah dengan Tugas Akhir berjudul “**Pengaruh Tekanan Gas Terhadap Sifat Mekanik dan Morfologi, Lapisan Coating Pencampuran FeCrBMnSi dan NiAl pada Baja AISI 4140 dengan Metode Twin Wire Arc Spray**”. Penulis dapat dihubungi pada nomor 081330444270

Email: dcebung@gmail.com
