



TUGAS AKHIR - TL 141584

PENGARUH JARAK NOZZLE DAN TEKANAN GAS PADA PROSES PELAPISAN FeCrBMnSi DENGAN METODE WIRE ARC SPRAY TERHADAP KETAHANAN THERMAL

MUHAMMAD SUCHAIMI

NRP. 2713 100 043

Dosen Pembimbing

Ir. Rochman Rochiem, M.Sc

Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI

Fakultas Teknologi Industri

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2017



FINAL PROJECT - TL 141584

EFFECT OF NOZZLE DISTANCE AND GAS PRESSURE ON FeCrBMnSi COATING PROCESS USING WIRE ARC SPRAY METHOD BY THERMAL RESISTANCE

MUHAMMAD SUCHAIMI

NRP. 2713 100 043

Advisor

Ir. Rochman Rochiem, M.Sc

Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si

ENGINEERING OF MATERIAL AND METALLURGY DEPARTMENT

Faculty of Industrial Technology

Sepuluh Nopember Institute of Technology

Surabaya

2017

**PENGARUH JARAK NOZZLE DAN TEKANAN GAS
PADA PROSES PELAPISAN FeCrBMnSi DENGAN
METODE WIRE ARC SPRAY TERHADAP KETAHANAN
THERMAL**

TUGAS AKHIR

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

Oleh :

MUHAMMAD SUCHAIMI
NRP. 2713 100 043

Disetujui oleh Tim Pembimbing Tugas Akhir :

1. Ir. Rochman Rochiem, M.Sc (Pembimbing 1)
2. Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si (Pembimbing 2)



PENGARUH JARAK NOZZLE DAN TEKANAN GAS PADA PROSES PELAPISAN FeCrBMnSi DENGAN METODE WIRE ARC SPRAY TERHADAP KETAHANAN THERMAL

Nama Mahasiswa : Muhammad Suchaimi
NRP : 2713 100 043
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi
Pembimbing : Ir. Rochman Rochiem, M.Sc
Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si

ABSTRAK

Low Temperature Hot Corrosion (LTHC) merupakan jenis *hot corrosion* yang terjadi pada temperatur 700-800°C dan biasa terjadi pada sudu-sudu turbin uap. Akibatnya material pada sudu turbin tersebut mengalami keretakan maupun penurunan efisiensi putaran. Perlindungan terhadap *hot corrosion* dengan cara memberikan penghalang antara substrat dengan lingkungan salah satunya menggunakan metode pelapisan permukaan logam yaitu *wire arc spray*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh jarak *nozzle* dan tekanan gas pada pelapisan FeCrBMnSi dengan metode *wire arc spray* terhadap ketahanan *thermal*. Dari parameter jarak *nozzle* dan tekanan gas yang digunakan, didapatkan parameter terbaik yaitu pada jarak 400 mm dan tekanan gas 3 bar yang mempunyai kekuatan lekat sebesar 22,58 MPa dengan persentase porositas 5,93% dan nilai kekasaran permukaan sebesar 16,36 μm . Sedangkan pada pengujian *thermal cycle* yang dilakukan dengan cara pemanasan dan pendinginan secara kontinyu, pada permukaan *coating* terbentuk senyawa oksida Fe_3O_4 yang menyebabkan perambatan retak dan delaminasi. Selain itu kekerasan lapisan *coating* meningkat akibat adanya senyawa *precipitate boride* (Fe_9B)_{0,2}.

Kata Kunci : Coating, Wire Arc Spray, FeCrBMnSi, Jarak Nozzle, Tekanan Gas, Ketahanan Thermal

EFFECT OF NOZZLE DISTANCE AND GAS PRESSURE ON FeCrBMnSi COATING PROCESS USING WIRE ARC SPRAY METHOD BY THERMAL RESISTANCE

Student Name : Muhammad Suchaimi
Student ID : 2713 100 043
Department : *Materials and Metallurgical Engineering*
Advisor : Ir. Rochman Rochiem, M.Sc
Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si

ABSTRACT

Low Temperature Hot Corrosion (LTHC) is type of hot corrosion which occurred on 700-800°C and usually on turbine blades. So, as a result the material of turbine blades is crack and degradation of rotation efficiency. Hot corrosion protection with the use of barrier that separate substrate and environment is one of using metal surface coating, wire arc spray method. This study has a purpose to analyze the effect of nozzle distance and gas pressure on FeCrBMnSi coating process using wire arc spray method on thermal resistance. The parameter of nozzle distance and gas pressure are used, resulted the best parameter on distance 400 mm and gas pressure 3 bar which has the bond strength of 12,58 MPa with porosity percentage of 5,93% and roughness values of 16,36 μm . While the examination of thermal cycle which by heating and cooling continuously, on the coating surface is formed oxide compound (Fe_3O_4) which cause formed crack propagation and delamination. Beside that hardness of coating surface is increase which caused by precipitate boride (Fe_9B)_{0,2}

Keyword: Coating, SS 304, Wire Arc Spray, FeCrBMnSi, Nozzle Distance, Gas Pressure, Thermal Resistance

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan limpahan karunia sehingga penulis dapat menyelesaikan seluruh rangkaian penyusunan laporan Tugas Akhir dengan judul "*Pengaruh Jarak Nozzle dan Tekanan Gas pada Proses Pelapisan FeCrBMnSi dengan Metode Wire Arc Spray Terhadap Ketahanan Thermal*".

Terima kasih kepada semua pihak yang berperan pada penulisan Tugas Akhir ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Allah Subhanahu Wata'ala, atas Rahmat-Nya sehingga saya dapat mendapatkan hidayah dan bimbingan untuk tetap istiqomah menjadi hamba-Nya yang taat sehingga mampu menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Supangat dan Ibu Ratna Dumilah, sebagai orang tua tercinta, atas jasa-jasanya yang tak terhingga dalam mendidik dan membesarkan saya.
3. Bapak Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.
4. Bapak Ir. Rochman Rochiem, M.Sc sebagai dosen pembimbing pertama yang saya hormati. Terima kasih atas segala bimbingan, masukan, dan saran yang bapak berikan.
5. Ibu Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si sebagai dosen pembimbing kedua yang saya hormati. Terima kasih atas segala bimbingan, masukan, dan saran yang ibu berikan.
6. Bapak Larasanto dan Bapak Dedik PT. Cipta Agung atas kerjasamanya dalam pengerjaan proses *coating*.
7. Mbak Russalia yang sering direpotin untuk pengujian-pengujian, makasih banyak sudah membantu saya dan teman-teman.
8. Seluruh teman – teman seperjuangan saya MT-15, terima kasih selalu saling menguatkan dalam usaha dan doa untuk kesuksesan.

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, Januari 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT.....	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTA GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Turbin Uap.....	5
2.1.1 Klasifikasi Turbin Uap.....	5
2.1.2 Prinsip Kerja Turbin Uap.....	8
2.1.3 Komponen Pendukung Turbin Uap	9
2.1.4 Permasalahan yang Terjadi pada Turbin Uap	12
2.2 Baja.....	15
2.2.1 Baja Paduan	15
2.2.2 Baja AISI 4140	15
2.3 Nickel-Aluminum Bond Coat	16
2.4 Fe-Cr-B-Mn-Si Coating.....	18
2.4.1 Kajian Pola XRD Fe-Cr-B-Mn-Si <i>Coating</i>	19
2.4.2 Kajian Pengujian DSC Fe-Cr-B-Mn-Si <i>Coating</i>	23
2.4.3 Kajian Pengujian Metalografi Fe-Cr-B-Mn-Si <i>Coating</i>	24

2.5 Jenis Ikatan pada Proses Pelapisan	25
2.6 Pelapisan Permukaan Logam	28
2.6.1 Pelapisan Dekoratif.....	28
2.6.2 Pelapisan Protektif	29
2.6.3 Pelapisan Sifat Khusus Permukaan	29
2.7 Proses Pelapisan dengan <i>Thermal Spray</i>	29
2.7.1 Metode <i>Thermal Spray</i>	29
2.7.2 Jenis-Jenis <i>Thermal Spray</i>	30
2.8 Metode <i>Arc Spraying</i>	34
2.9 Pengaruh Tekanan Gas dan Jarak <i>Nozzle</i>	37
2.10 Prinsip Kerja Alat Pengujian.....	39
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Diagram Alir Penelitian	47
3.2 Rancangan Penelitian.....	48
3.3 Metode Perancangan.....	48
3.4 Bahan Penelitian	49
3.5 Alat Penelitian	54
3.6 Prosedur Penelitian	62
3.6.1 Preparasi Spesimen VCL 140	62
3.6.2 Proses Pelapisan	62
3.6.3 Proses Pengujian dan Analisis	63
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	
4.1 Preparasi Sampel dan Karakterisasi Hasil Pelapisan.....	71
4.1.1 Hasil Pengamatan Makro Permukaan <i>Coating</i>	72
4.1.2 Hasil Pengujian Difraksi Sinar-X.....	75
4.1.3 Hasil Pengujian Mikroskop Elektron SEM	78
4.2 Pengujian Kekasaran Permukaan <i>Coating</i>	87
4.3 Pengujian Ketebalan Lapisan.....	89
4.4 Hasil Analisis Kekuatan Lekat.....	92
4.5 Hasil Analisis Porositas pada Bagian <i>Cross Section</i>	96
4.6 Perbandingan Sebelum dan Setelah <i>Thermal Cycle</i>	98

4.6.1 Hasil Pengamatan Makro Spesimen Sebelum <i>Thermal Cycle</i>	98
4.6.2 Hasil Pengamatan Makro Spesimen Setelah <i>Thermal Cycle</i>	99
4.6.3 Hasil Perbandingan Massa Spesimen Sebelum dan Setelah <i>Thermal Cycle</i>	100
4.6.4 Hasil Perbandingan <i>Microhardness</i> Spesimen Sebelum dan Setelah <i>Thermal Cycle</i>	101
4.6.5 Hasil Analisis XRD Spesimen Setelah <i>Thermal</i> <i>Cycle</i>	103
4.6.6 Hasil Pengamatan Metalografi Sebelum dan Setelah <i>Thermal Cycle</i>	105
4.6.7 Hasil Pengamatan Mikroskop Elektron SEM/ EDS Sebelum <i>Thermal Cycle</i>	108
4.6.8 Hasil Pengamatan Mikroskop Elektron SEM/ EDS Setelah <i>Thermal Cycle</i>	110
4.6.9 Hasil Perbandingan <i>Cross Section</i> Spesimen Sebelum dan Setelah <i>Thermal Cycle</i>	111
4.7 Pengaruh Jarak <i>Nozzle</i> dan Tekanan Gas pada Proses Pelapisan FeCrBMnSi Terhadap Ketahanan <i>Thermal</i>	113
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan.....	117
5.2 Saran.....	117
DAFTAR PUSTAKA	xxiii
LAMPIRAN	xxix
BIODATA PENULIS	xxxix

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Distribusi Tekanan dan Kecepatan Uap di Turbin Impuls	6
Gambar 2.2 Distribusi Tekanan dan Kecepatan Uap di Turbin Reaksi.....	7
Gambar 2.3 Sistem Kerja Turbin Uap.....	9
Gambar 2.4 Sudu-Sudu Turbin Uap.....	10
Gambar 2.5 Erosi pad Sudu Turbin Uap Setelah Beroperasi 400 Jam dan 70.000 Jam	13
Gambar 2.6 <i>Hot Corrosion</i> pada Sudu Turbin Uap	14
Gambar 2.7 Diagram Fasa Ni-Al	17
Gambar 2.8 Pola XRD <i>Powder Coating</i> dan Hasil <i>Metallic Amorphous Coating</i> Fe-Cr-B-Mn-Si.....	19
Gambar 2.9 Diagram Fasa Cr-B	20
Gambar 2.10 Diagram Fasa Fe-B	21
Gambar 2.11 Diagram Fasa Fe-Cr	21
Gambar 2.12 Kurva DSC <i>Coating</i> Fe-Cr-B-Mn-Si dengan Laju Pemanasan 10 K/m	23
Gambar 2.13 Mikrostruktur Bagian <i>Cross Section As-Sprayed Coating</i>	24
Gambar 2.14 Mekanisme Fenomena Adhesi	26
Gambar 2.15 Mekanisme Fenomena Difusi dalam Atom	27
Gambar 2.16 Proses <i>Thermal Spray</i>	30
Gambar 2.17 Skema <i>High Velocity Oxy Fuel</i>	31
Gambar 2.18 Skema <i>Wire Flame Spraying</i>	32
Gambar 2.19 Skema <i>Detonation Gun Spraying</i>	33
Gambar 2.20 Skema <i>Vacuum Plasma Spraying</i>	34
Gambar 2.21 Skema <i>Arc Spraying</i>	36
Gambar 2.22 Diagram SEM	40
Gambar 2.23 Ilustrasi Difraksi Sinar-X pada XRD.....	41

Gambar 2.24	<i>Actuator</i> Tampak Samping.....	43
Gambar 2.25	Alur Sinar pada Pengamatan Metalografi.....	45
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	47
Gambar 3.2	<i>Round Bar</i> VCL 140	50
Gambar 3.3	Serbuk <i>Brown Aluminum Oxide</i>	51
Gambar 3.4	NiAl <i>Wire</i>	52
Gambar 3.5	95 MXC <i>Wire</i>	54
Gambar 3.6	Lem <i>Araldite</i>	54
Gambar 3.7	Mesin Gergaji Pita.....	55
Gambar 3.8	Mesin <i>Sand Blasting</i>	56
Gambar 3.9	Mesin <i>Arc Spray</i>	57
Gambar 3.10	Alat <i>Sketmat Digital</i>	58
Gambar 3.11	<i>Surface Roughness Tester</i>	58
Gambar 3.12	Mesin Pengujian SEM.....	59
Gambar 3.13	Mesin Pengujian XRD	59
Gambar 3.14	<i>Muffle Furnace</i>	60
Gambar 3.15	Alat <i>Pull Off Bonding Test</i>	60
Gambar 3.16	Alat <i>Microhardness Vickers Digital</i>	61
Gambar 3.17	Alat Mikroskop Optik Metalurgi.....	61
Gambar 3.18	Dimensi Spesimen VCL 140.....	62
Gambar 3.19	Proses Pelapisan <i>Arc Spray</i>	62
Gambar 3.20	Kurva Pengujian <i>Thermal Cycle</i>	66
Gambar 4.1	Permukaan VCL 140 (a) Sebelum (b) Setelah <i>Abrasive Grit Blasting</i>	71
Gambar 4.2	Permukaan Spesimen <i>Coating</i> Perbesaran 100x. 74	
Gambar 4.3	Hasil XRD (a) Spesimen VCL 140, (b) <i>Bond Coat</i> dan (c) <i>As-Received Coating</i>	76
Gambar 4.4	Permukaan Spesimen <i>Coating</i> Perbesaran 1000x	79
Gambar 4.5	Bagian <i>Cross Section</i> Spesimen <i>Coating</i> Perbesaran 500x	85

Gambar 4.6	Grafik Kekasaran Permukaan.....	88
Gambar 4.7	Grafik Pengaruh Jarak <i>Nozzle</i> terhadap Ketebalan	89
Gambar 4.8	Grafik Pengaruh Tekanan Gas terhadap Ketebalan	90
Gambar 4.9	Grafik <i>Pull Off Bonding</i>	92
Gambar 4.10	Grafik Perbandingan Kekuatan Lekat Spesimen <i>Bond Coat</i> dan Tanpa <i>Bond Coat</i>	93
Gambar 4.11	Gambar Hasil Pengujian <i>Pull Off Bonding</i>	95
Gambar 4.12	Grafik Persentase Porositas	97
Gambar 4.13	Hasil Pengamatan Makro Spesimen Sebelum <i>Thermal Cycle</i> (a) Tampak Permukaan Hasil <i>Coating</i> (b) Tampak <i>Cross Section</i>	98
Gambar 4.14	Hasil Pengamatan Makro Spesimen Setelah <i>Thermal Cycle</i> (a) Tampak Permukaan Hasil <i>Coating</i> (b) Tampak <i>Cross Section</i>	99
Gambar 4.15	Grafik Perbandingan Massa Spesimen Sebelum dan Setelah <i>Thermal Cycle</i>	100
Gambar 4.16	Grafik <i>Microhardness Vicker</i> Spesimen Sebelum dan Setelah <i>Thermal Cycle</i>	102
Gambar 4.17	Hasil XRD Spesimen (a) <i>As-Received Coating</i> dan (b) <i>50 Cycle</i>	103
Gambar 4.18	Hasil Pengamatan Metalografi	106
Gambar 4.19	Hasil Pengujian SEM/EDS Spesimen Sebelum <i>Thermal Cycle</i>	109
Gambar 4.20	Hasil Pengujian SEM/EDS Spesimen Setelah <i>50 Cycle</i>	110
Gambar 4.21	Hasil Pengamatan Spesimen <i>Cross Section</i>	112

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi Kimia Baja AISI 4140	16
Tabel 2.2 Sifat Mekanik Baja AISI 4140.....	16
Tabel 2.3 Properti dari Berbagai Teknik Logam.....	37
Tabel 3.1 Rancangan Pengujian Spesimen	48
Tabel 3.2 Komposisi Kimia VCL 140	49
Tabel 3.3 Propertis Mekanik VCL 140.....	50
Tabel 3.4 Komposisi Kimia <i>Brown Aluminum Oxide</i>	51
Tabel 3.5 Propertis <i>Brown Aluminum Oxide</i>	51
Tabel 3.6 Komposisi Kimia dan Propertis <i>Wire 75B</i>	52
Tabel 3.7 Komposisi Kimia <i>Wire 95 MXC</i>	53
Tabel 3.8 Propertis Fisik <i>Wire 95 MXC</i>	53
Tabel 3.9 Spesifikasi Peralatan <i>Abrasive Grit Blasting</i> Tipe NOB35CE.....	55
Tabel 3.10 Spesifikasi Mesin Aplikasi <i>Arc Spray</i>	57
Tabel 4.1 Data Distribusi Ketebalan Lapisan <i>Coating</i> Berdasarkan Uji SEM	91
Tabel 4.2 Hasil Pengujian <i>Microhardness Vicker</i> Spesimen Sebelum dan Setelah Perlakuan <i>Thermal</i> <i>Cycle</i>	101
Tabel 4.3 Data Posisi 2 <i>Theta</i> Spesimen <i>As-Received Coating</i> dan Perlakuan 50 <i>Cycle</i>	103

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Turbin uap merupakan suatu penggerak mula yang mengubah energi potensial uap menjadi energi kinetik dan selanjutnya diubah menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros turbin. Poros turbin, langsung atau dengan bantuan roda gigi reduksi, dihubungkan dengan mekanisme yang akan digerakkan. Turbin uap dapat digunakan pada berbagai bidang seperti pada bidang industri, untuk pembangkit tenaga listrik dan untuk transportasi. Keuntungan utama menggunakan turbin uap yaitu dapat menghasilkan energi mekanik yang maksimal untuk menggerakkan generator listrik, namun di sisi lain ada biaya tambahan yang diperlukan untuk perawatan yang lebih besar. Tanpa adanya perawatan yang baik pada turbin uap, maka akan menimbulkan masalah-masalah yang berkaitan dengan kinerja dan kualitas turbin uap, bahkan resiko keselamatan sangat mungkin terjadi. Karena turbin uap bekerja pada tekanan dan temperatur yang tinggi. Salah satu komponen pada turbin uap yang sering mengalami kegagalan atau kerusakan yaitu sudu-sudu turbin. Kerusakan tersebut biasanya disebabkan oleh *erosion*, *hot corrosion*, *fouling* dan *high cycle fatigue*.

Hot Corrosion merupakan jenis korosi temperatur tinggi yang terjadi pada sudu-sudu turbin uap. Ada dua jenis *hot corrosion*, yaitu *high temperature hot corrosion* (HTHC) yang terjadi pada temperatur 825°C – 950°C dan *low temperature hot corrosion* (LTHC) yang terjadi pada temperatur 700°C – 800°C. Jenis korosi ini disebabkan adanya kondensasi dari zat kimia yang bekerja pada benda yang bersifat korosif. Korosi dapat menimbulkan berbagai macam kerugian diantaranya adalah berupa biaya perawatan dan biaya penggantian material. Berbagai cara telah dilakukan untuk mengendalikan laju korosi yaitu dengan mengurangi gas-gas yang bersifat korosif, mencegah terbentuknya kerak dan deposit pada sudu-sudu turbin serta memberi lapisan pelindung. Memberi

lapisan pelindung dilakukan dengan cara memutus rantai korosi dengan melindungi logam sehingga konduktor atau kontak metalik tidak berfungsi sehingga elektron tidak bisa mengalir dan korosi terhambat. Sudah banyak jenis bahan pelapisan untuk menanggulangi terjadinya korosi, salah satunya dengan pelapisan logam. Logam metalik adalah penghalang yang berkesinambungan antara permukaan logam dan lingkungan.

Pelapisan permukaan logam adalah suatu cara yang dilakukan untuk memberikan sifat ketahanan thermal dan *hot corrosion* pada suatu permukaan benda kerja, dimana diharapkan benda tersebut akan mengalami perbaikan baik dalam hal struktur mikro maupun ketahanannya, dan tidak menutup kemungkinan pula terjadi perbaikan terhadap sifat fisiknya. Pelapisan logam merupakan bagian akhir dari proses produksi suatu produk maupun bagian dari proses *maintenance* atau pemeliharaan terhadap suatu komponen atau benda kerja. Salah satu metode pelapisan permukaan logam yaitu metode *arc spray*. Metode ini merupakan salah satu jenis dari *thermal spray*. *Arc spray coating* merupakan salah satu teknik pelapisan logam (*coating*) dalam bentuk kawat. Busur antara dua kawat dalam proses *arc spray coating* ini digunakan untuk mencairkan bahan pelapis. Dalam *arc spray coating* tekanan gas sangat berpengaruh terhadap kualitas dari hasil *coating*. Proses ini akan menentukan karakteristik permukaan akhir material substrat.

Dalam penelitian ini dilakukan variasi jarak *nozzle* dan tekanan gas ketika proses pelapisan FeCrBMnSi *coating* untuk memperoleh parameter yang paling optimal terhadap sifat korosi dan ketahanannya pada temperatur tinggi.

1.2 PERUMUSAN MASALAH

Adapun perumusan masalah yang akan dianalisis dalam penelitian ini adalah :

Bagaimana pengaruh tekanan gas dan jarak *nozzle* pada proses pelapisan FeCrBMnSi terhadap ketahanan *thermal*?

1.3 BATASAN MASALAH

Agar hasil akhir yang diperoleh baik dan sesuai dengan yang diharapkan serta tidak menyimpang dari permasalahan yang ditinjau, maka batasan masalah dirasa perlu ada. Pada penelitian ini, batasan masalah yang digunakan adalah sebagai berikut :

1. Parameter dari proses tegangan dan arus dianggap stabil pada semua proses
2. Sudut penyemprotan dianggap sama
3. Kecepatan penyemprotan dianggap konstan
4. Temperatur substrat dianggap homogen
5. Pengaruh lingkungan (temperatur dan tekanan) diabaikan
6. Jumlah *layer* pelapisan dianggap sama

1.4 TUJUAN PENELITIAN

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :
Menganalisis pengaruh tekanan gas dan jarak *nozzle* pada proses pelapisan FeCrBMnSi terhadap ketahanan *thermal*.

1.5 MANFAAT PENELITIAN

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

1. Dapat dijadikan referensi dalam pengendalian korosi menggunakan *metal coating* pada sudu-sudu turbin uap.
2. Dapat dijadikan sebagai referensi metode *thermal spray* lainnya dengan variasi tekanan gas dan jarak *nozzle*.
3. Hasil penelitian dapat dijadikan informasi yang saling melengkapi dan komprehensif dengan hasil penelitian-penelitian sebelumnya terkait *metal coating*.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 TURBIN UAP

Turbin uap merupakan suatu penggerak mula yang mengubah energi potensial uap menjadi energi kinetik dan selanjutnya diubah menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros turbin. Poros turbin, langsung atau dengan bantuan roda gigi reduksi, dihubungkan dengan mekanisme yang akan digerakkan. Turbin uap dapat digunakan pada berbagai bidang seperti pada bidang industri, untuk pembangkit tenaga listrik dan untuk transportasi (Shlyakhin, 1990).

Pengertian energi potensial uap adalah direpresentasikan dalam sifat uap yang menggerakkan turbin, dalam hal ini sifat uap adalah tekanan, temperatur, dan *enthalpy*. Sedangkan energi gerak putar poros adalah besaran momen putar yang ditimbulkan oleh gaya dorong uap pada sudu gerak turbin. Transformasi energi pada sudu gerak turbin adalah perubahan energi kinetik (kecepatan) uap yang masuk dan keluar sudu (Cotton, 1998).

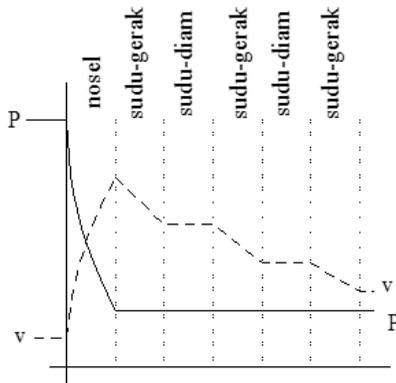
2.1.1 Klasifikasi Turbin Uap

Turbin uap ada bermacam-macam jenis sesuai dengan kegunaannya, apabila digunakan untuk penggerak daya kecil maka lebih dipilih tingkat tunggal sampai tiga tingkat. Akan tetapi bila untuk menggerakkan daya yang besar maka lebih dipilih turbin *multi stage*. Jenis-jenis turbin uap dapat digolongkan atas dasar sebagai berikut :

1. Berdasarkan proses transformasi energi uap :

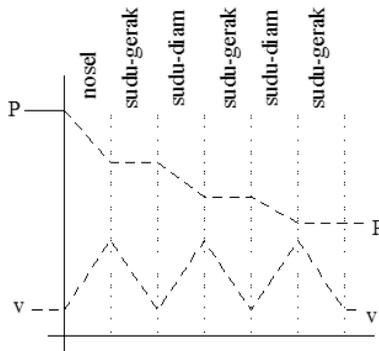
- a. Turbin Impuls, yaitu jenis turbin yang ekspansi uapnya terjadi pada sudu tetap. Terdiri dari satu group nosel yang diikuti beberapa baris sudu. Uap diekspansikan di nosel sehingga terjadi konversi energi termal yang tinggi ke energi kinetik. Uap dengan kecepatan tinggi menghantam bilah dimana sejumlah besar energi kinetik

dan aliran uap diubah menjadi kerja poros turbin. Tekanan statik uap berkurang di nosel dan sebaliknya kecepatan absolut uap meningkat. Kecepatan absolut kemudian berkurang di rotor, tetapi tekanan statik dan kecepatan relatifnya tidak mengalami perubahan. Untuk mendapatkan transfer energi maksimum, bilah-bilah harus berotasi sekitar 1,5 kecepatan semburan uap (Shlyakhin, 1990).



Gambar 2.1 Distribusi Tekanan dan Kecepatan Uap di Turbin Impuls (Shlyakhin, 1990)

- b. Turbin Reaksi, yaitu turbin yang ekspansi uapnya terjadi pada sudu tetap dan sudu bergerak. Nosel dan sudu berekspansi sehingga tekanan statik uap menurun di sudu bergerak dan tetap. Sudu tetap berlaku sebagai nosel dan mengarahkan aliran ke sudu bergerak pada kecepatan yang sedikit lebih tinggi dari kecepatan sudu yang bergerak (Shlyakhin, 1990).



Gambar 2.2 Distribusi Tekanan dan Kecepatan Uap di Turbin Reaksi (Shlyakhin, 1990)

2. Berdasarkan tekanan uap keluar turbin :

- a. Turbin *Back Pressure* adalah turbin yang tekanan akhirnya di atas tekanan atmosfer karena uap keluaran akhir dari turbin tersebut tidak dikondensasikan. Uap yang dihasilkan digunakan untuk keperluan pemanasan dan proses dalam industri (Deckers, 1997).
- b. Turbin *Condensing* adalah turbin uap keluaran sudu terakhirnya dikondensasikan, tekanan akhir dari turbin kondensasi ini dibuat dalam keadaan *vaccum*, sehingga temperatur kondensasinya sedikit di atas temperatur air pendingin yang tersedia. (Deckers, 1997).

3. Berdasarkan tekanan uap masuk turbin :

- a. Turbin Tekanan Super Kritis (*Super Critical Pressure Turbines*), tekanan uap di atas 22,5 MPa
- b. Turbin Tekanan Tinggi (*High Pressure Turbines*), tekanan uap antara 8,8 – 22,5 MPa
- c. Turbin Tekanan Menengah (*Intermediate Pressure Turbines*), tekanan uap antara 1 – 8,8 MPa
- d. Turbin Tekanan Rendah (*Low Pressure Turbines*), tekanan uap di bawah 1 MPa

(Deckers, dkk, 2000)

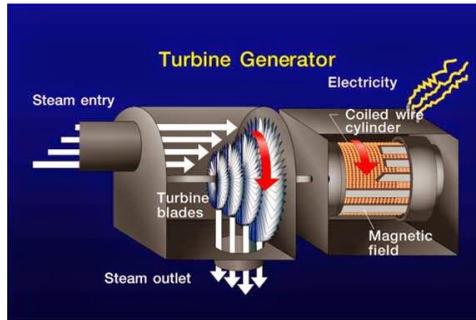
2.1.2 Prinsip Kerja Turbin Uap

Turbin uap ini merupakan jenis turbin uap impuls bertingkat yang mempunyai 21 *stages* terbagi menjadi 3 bagian, dengan masing-masing set terdiri dari sudu tetap (*stationary blade*) dan sudu bergerak (*rotating blade*). Bagian pertama yaitu *high pressure* dengan 9 *stages*, bagian kedua yaitu *intermediate pressure* dengan 7 *stages* dan bagian ketiga yaitu *low pressure* dengan 5 *stages* (Singh Murari, dkk, 2011).

Uap kering (*superheated steam*) dengan temperatur 550°C dan tekanan sebesar 17,4 MPa yang dihasilkan oleh *superheater boiler* masuk ke turbin melalui nosel. Di dalam nosel energi panas dari uap diubah menjadi energi kinetik dan uap kering mengalami pengembangan. Tekanan uap pada saat keluar dari nosel lebih kecil dari pada saat masuk ke dalam nosel, akan tetapi sebaliknya kecepatan uap ke luar nosel lebih besar dari pada saat masuk ke dalam nosel. Uap yang memancar keluar dari nosel diarahkan ke sudu-sudu turbin yang berbentuk lengkungan yang dipasang di sekeliling roda turbin. Uap yang mengalir melalui celah-celah antara sudu turbin tersebut dibelokkan ke arah mengikuti lengkungan dari sudu turbin. Perubahan kecepatan uap ini menimbulkan gaya yang mendorong dan kemudian memutar roda dan poros turbin (Singh Murari, dkk, 2011).

Apabila uap masih mempunyai kecepatan saat meninggalkan sudu turbin, berarti hanya sebagian energi kinetik dari uap yang diambil oleh sudu-sudu turbin yang berjalan. Supaya energi kinetik yang tersisa saat meninggalkan sudu turbin bisa dimanfaatkan lagi, maka pada turbin dipasang lebih dari satu baris sudu gerak. Antara baris pertama dan baris kedua sudu gerak dipasang satu baris sudu tetap (*stationary blade*) yang berguna untuk mengubah arah kecepatan uap, supaya uap dapat masuk ke baris kedua sudu gerak dengan arah yang tepat. Kecepatan uap saat meninggalkan sudu gerak yang terakhir harus dapat dibuat sekecil mungkin, agar energi kinetik yang tersedia dapat dimanfaatkan sebanyak mungkin. Dengan demikian efisiensi turbin menjadi lebih tinggi

karena kehilangan energi yang relatif kecil (Singh Murari, dkk, 2011).



Gambar 2.3 Sistem Kerja Turbin Uap (Najamudin, 2014)

2.1.3 Komponen Pendukung Turbin Uap

Turbin tersusun dari beberapa komponen dengan fungsinya masing-masing, antara lain :

1. Rumah Turbin

Fungsi rumah turbin adalah mendistribusikan uap ke sekeliling sudu pengatur, untuk mendapatkan tekanan dan kecepatan yang sama serta menjaga agar uap tidak keluar dari turbin. Rumah turbin memiliki sudu tetap yang berfungsi untuk mengarahkan aliran uap ke sudu gerak. Di samping itu, rumah turbin juga berfungsi sebagai rumah regulator, rumah bantalan dan sebagai saluran uap bekas atau sisa ke dalam kondensator (Heinz, 2009).

2. Rotor

Rotor adalah bagian yang berputar dari turbin dan letaknya berada di dalam rumah turbin. Rotor berfungsi memutar poros daya yang menggerakkan atau memutar generator. Selain itu rotor juga berfungsi sebagai penggerak pompa oli utama dan regulator serta sebagai bantalan tekan

bantalan dukung penghantar dan bantalan dukung generator (Heinz, 2009).

3. Sudu-Sudu Turbin

Sudu pada turbin terbagi menjadi dua, yaitu sudu tetap (*stationary blade*) dan sudu gerak (*rotating blade*). Sudu tetap merupakan sudu yang terletak di bagian rotor dan berfungsi mengarahkan aliran uap menuju sudu gerak. Sedangkan sudu gerak merupakan sudu yang bergerak bersama dengan rotor, oleh sebab itu sudu gerak letaknya melingkari rotor. Seluruh bagian sudu yang berorientasi dan bagian yang diam dipisahkan secara relatif oleh jarak ruang yang besar dan kecil yang dibuat oleh jalur perapat (*seal*). Jalur ini terbuat dari campuran logam material dengan pelindung yang berkualitas (Heinz, 2009).



Gambar 2.4 Sudu-Sudu Turbin Uap (Heinz, 2009)

4. Thrust Bearing

Rotor turbin yang poros-porosnya dengan kopling fleksibel memiliki bantalan aksial sendiri-sendiri. Tetapi untuk turbin dengan kopling solid hanya dipasang satu bantalan aksial yang biasa diletakkan antara silinder *high pressure* (HP) dan silinder *low pressure* (LP). Bantalan aksial memiliki dua fungsi, yaitu menyerap sisa resultan gaya aksial pada poros serta mengontrol posisi rotor dalam *casing*. Fungsi kedua yaitu mencegah terjadinya

persinggungan antara bagian yang berputar dengan bagian yang stasioner (Heinz, 2009).

5. Throttle Valves

Fungsi utama dari *throttle valves* adalah untuk mematikan debit uap yang masuk ke turbin dengan kecepatan berlebih (*over speed*). Katup ini digunakan untuk mengontrol aliran uap yang masuk ke turbin selama unit sedang dinaikkan kecepatannya. Sistem kontrol tersebut menggunakan oli dengan tekanan yang tinggi, sehingga menyebabkan katup tersebut membuka untuk mengeluarkan aliran uap yang berlebih (Heinz, 2009).

6. Turbin Oil Pumps

Turbin uap didukung atas satu *main oil pump*, *turning gear oil pump*, *emergency bearing* dan *seal oil pump*. *Main oil pump* harus dijalankan terlebih dahulu dengan poros turbin. Pompa ini berfungsi untuk memberikan suplai pelumas pada turbin setelah turbin berputar dengan putaran normal atau mendekati putaran normal. Sedangkan *turning gear oil pump* harus dioperasikan sebelum turbin pada posisi *turning gear* (3 Rpm). Pompa ini menyediakan minyak pelumas terhadap *bearing-bearing* turbin dan *hydrogen shaft steel* serta berfungsi sebagai cadangan *auxiliary oil pump* (Heinz, 2009).

7. Turning Gear

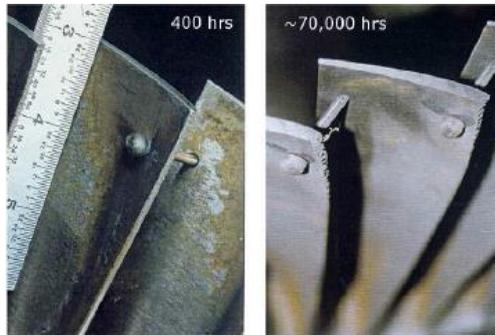
Motor *turning gear* dioperasikan untuk menghindari distorsi atau bending akibat dari proses pemanasan atau pendinginan yang tidak seragam pada rotor saat setelah *start* awal atau *shut down*. Putaran motor ini berkisar 3 Rpm dan dioperasikan dari *control panel* (Heinz, 2009).

2.1.4 Permasalahan yang Terjadi pada Turbin Uap

Turbin uap yang beroperasi untuk mengubah energi potensial uap dengan temperatur dan tekanan yang cukup tinggi sangat rawan terjadi penurunan kualitas bahkan kegagalan material. Permasalahan tersebut timbul akibat dari kurangnya penanganan dan perhatian khusus terhadap komponen-komponen pendukung di turbin uap. Salah satu komponen atau bagian turbin uap yang sering mengalami kegagalan yaitu sudu-sudu turbin. Penyebab kegagalan tersebut diantaranya *erosion*, *hot corrosion*, *fouling* dan *high cycle fatigue*.

a) Erosion

Erosion atau erosi merupakan salah satu penyebab kegagalan material yang biasa terjadi di sudu-sudu turbin uap. Erosi ini bisa terjadi dalam bentuk *solid particle* atau *liquid droplet erosion*. *Solid particle erosion* biasanya disebabkan adanya kontaminan atau pengotor dari luar. Sedangkan *liquid droplet erosion* terjadi akibat adanya kondensasi selama proses kompresi fluida pada saat proses *cleaning*. Partikel atau *droplet* tersebut terbawa oleh uap kering (*superheated steam*). Sehingga menyebabkan beban kejut atau *impact* terhadap material, misalnya terbentuk celah dan *microcracks* pada permukaan material. Selain itu erosi juga disebabkan oleh korosi dan *cyclic stress*. Pada lingkungan yang korosif, erosi bisa mempercepat serangan korosi. Sedangkan pada *cyclic stress*, *microcracks* semakin mudah terbentuk dan setelahnya terjadi *fatigue cracking* (Phillip, 2008).



Gambar 2.5 Erosi pada Sudu Turbin Uap Setelah Beroperasi 400 Jam dan 70.000 Jam (Phillip, 2008).

b) Hot Corrosion

Hot Corrosion merupakan jenis korosi temperatur tinggi yang terjadi pada sudu-sudu turbin uap. Ada dua jenis *hot corrosion*, yaitu *high temperature hot corrosion* (HTHC) yang terjadi pada temperatur $825^{\circ}\text{C} - 950^{\circ}\text{C}$ dan *low temperature hot corrosion* (LTHC) yang terjadi pada temperatur $700^{\circ}\text{C} - 800^{\circ}\text{C}$. Proses korosi ini dimulai dengan adanya kondensasi dari zat kimia yang bekerja pada benda yang bersifat korosif. Dengan adanya reaksi kimia yang berlangsung secara terus menerus maka akan menyerang lapisan oksida lalu akan menghilangkan kromium dari substratnya. Dengan hilangnya kromium maka oksidasi pada *base material* akan cepat dan akan munculnya poros pada material tersebut. Secara morfologi jenis korosi ini dapat dikarakterisasi dengan adanya sulfidasi dan daerah yang terkelupas (Phillip, 2008). Untuk mengurangi terjadinya peristiwa *hot corrosion* dapat dilakukan pencegahan sebagai berikut :

- ✓ Mengurangi gas-gas yang bersifat korosif
- ✓ Mencegah terbentuknya kerak dan deposit pada sudu turbin uap
- ✓ Menggunakan material pelapis untuk sudu turbin uap yang dapat menghambat peristiwa korosi



Gambar 2.6 *Hot Corrosion* pada Sudu Turbin Uap (Phillip, 2008)

c) Fouling

Fouling merupakan salah satu jenis permasalahan yang terdapat di turbin uap, tidak hanya menyebabkan kerusakan material tetapi juga mengurangi efisiensi turbin uap. Hal ini disebabkan adanya senyawa garam hidroskopis (NaOH) yang mampu menyerap uap basah ketika uap kering (*superheated steam*) menjadi uap basah (*saturated steam*) dan mengalami proses kondensasi pada tahap selanjutnya di dalam turbin uap. Natrium hidroksida mempunyai kecenderungan untuk melekat di permukaan material turbin serta bisa menjerat elemen pengotor seperti silika, oksida logam, dan fosfat. Ketika pengotor tersebut sudah berdeposisi akan sulit untuk dibersihkan dari permukaan. Dengan demikian akan menyebabkan penurunan efisiensi dan meningkatkan getaran (Phillip, 2008).

d) High Cycle Fatigue

Resonant fatigue atau kelelahan akibat getaran merupakan mekanisme kegagalan material yang disebabkan adanya tekanan atau beban periodik terhadap sudu turbin uap. Apabila pembasahan tidak cukup untuk menyerap energi masuk secara periodik, amplitudo dan pertumbuhan tegangan maka akan terjadi *overstress* atau perambatan retak. *High cycle fatigue* (HCF) ini disebabkan oleh eksitasi

aerodinamika (misalnya nosel) atau adanya getaran. Kerusakan HCF akan terjadi ketika tingkat tegangan berada di atas kekuatan *fatigue* material. Kekuatan *fatigue* ini sangat sensitif terhadap lingkungan yang korosif (Phillip, 2008).

2.2 BAJA

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).

2.2.1 Baja Paduan

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).

2.2.2 Baja AISI 4140

Baja AISI 4140 merupakan jenis baja paduan atau *alloy steel*. Berdasarkan komposisi kimia pada Tabel 2.1 dan sifat mekanik pada Tabel 2.2, baja ini digunakan untuk aplikasi *power transmission gear* dan *aircraft landing gear*. (AZO Materials, 2012).

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

Komposisi	Wt.%	Komposisi	Wt.%
C	0,38 – 0,43	Cr	0,8 – 1,1
Mn	0,75 – 1,0	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 (°C)	1416

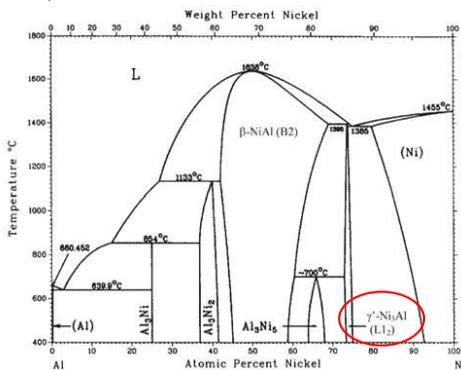
2.3 NICKEL-ALUMINUM BOND COAT

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 2.7), 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.

Penambahan elemen *deoxidizing* Ni-Al dalam metriks 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 *Coeffisient Thermal Expansion* (CTE) yang tidak terlalu jauh dengan baja, sehingga tegangan yang terjadi pada saat adanya gesekan dan panas dapat diminimalisir (Pawlowsky, 2008 dan Sa Barito, dkk, 2012).



Gambar 2.7 Diagram Fasa Ni-Al (Okamoto, 2004)

2.4 Fe-Cr-B-Mn-Si 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 Wu, 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 $Fe_{64}Cr_{29}B_{3,75}Mn_{1,65}Si_{1,6}$ dengan merk dagang TAFA 95 MXC.

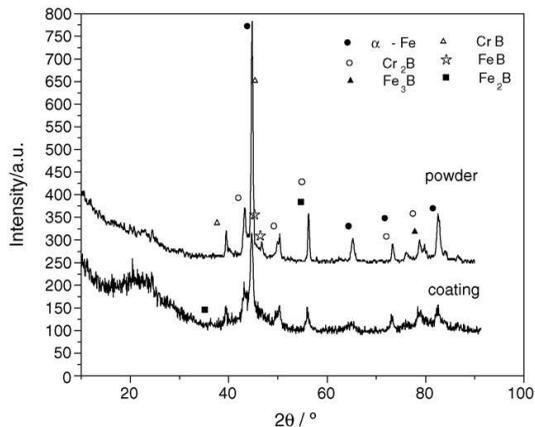
Beberapa penelitian yang menunjukkan keunggulan jenis *wire coating* ini diantaranya, pada penelitian Zheng Zhou, dkk menunjukkan bahwa material substrat SA213 T22 yang *dicoating* dengan Fe-xCr (15,20,25,30,35,40%) menggunakan metode *wire arc spray*, menunjukkan hasil *coating* yang homogen dan tingkat

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% $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$).

2.4.1 Kajian Pola XRD Fe-Cr-B-Mn-Si Coating

Senyawa yang terbentuk setelah aplikasi *coating* ke substrat dapat dilihat dari hasil XRD lapisan *coating* Fe-Cr-B-Mn-Si pada Gambar 2.8.

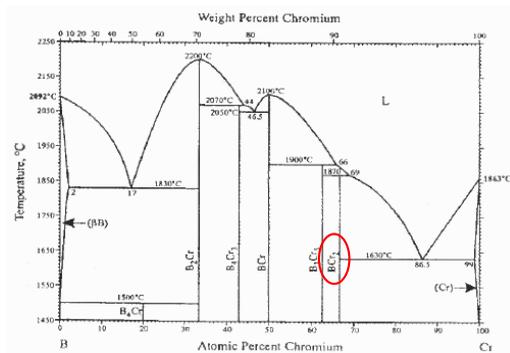


Gambar 2.8 Pola XRD *Powder Coating* dan Hasil *Metallic Amorphous Coating* Fe-Cr-B-Mn-Si (Yuping Wu, dkk, 2006)

Pola XRD pada Gambar 2.8 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

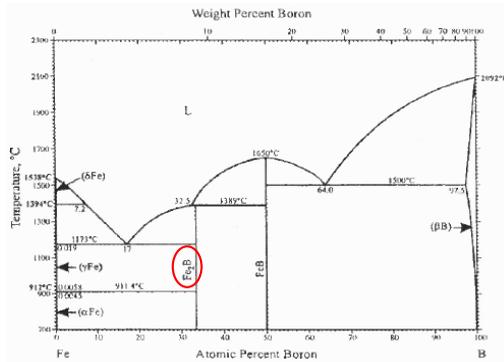
terbentuk adalah senyawa CrB, Cr₂B, Fe₃B, FeB, Fe₂B dan larutan padat α -Fe. Sedangkan pada puncak yang paling tajam terdapat larutan padat α -Fe dan paduan CrB (Yuping Wu, dkk, 2006).

Berdasarkan komposisi kimia *wire coating* yang digunakan yaitu Fe₆₄Cr₂₉B_{3,75}Mn_{1,65}Si_{1,6} dan merujuk pada hasil XRD pada Gambar 2.8, maka prediksi paduan yang terbentuk pada saat aplikasi *coating* dapat diamati dari diagram fasa Cr-B pada Gambar 2.9. 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 Wu, dkk, 2006).



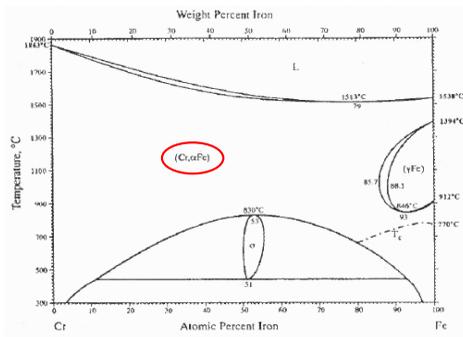
Gambar 2.9 Diagram Fasa Cr-B (Kanaizuka, 1981)

Berdasarkan komposisi *wire coating* dengan komposisi boron sebesar 3,75% membuat boron berikatan dengan Fe menjadi senyawa keras *iron bromide* (Fe₂B) seperti terlihat pada Gambar 2.10. Senyawa ini memiliki nilai kekerasan yang tinggi sekitar 1224 – 2141 HV (Dybkov, 2016), sehingga dapat menghasilkan lapisan *coating* yang tahan terhadap aus (Yuping Wu, dkk, 2006).



Gambar 2.10 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 2.11. 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 Wu, dkk, 2006).



Gambar 2.11 Diagram Fasa Fe-Cr (Kanaizuka, 1981)

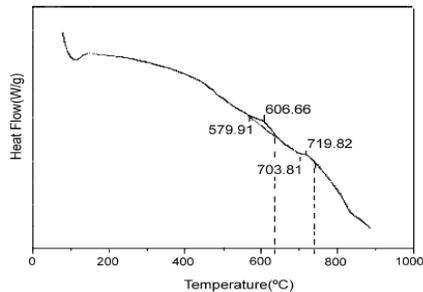
Unsur lain yang memiliki pengaruh yang sangat penting adalah silikon. Kandungan silikon yang cukup akan berguna untuk meningkatkan kemampuan pembentukan *glass formation*. Pada waktu yang bersamaan, silikon dapat bereaksi dengan Fe dan Cr untuk membentuk *silicides* yang memiliki kekerasan mikro yang 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 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).

2.4.2 Kajian Pengujian DSC Fe-Cr-B-Mn-Si Coating

Dari hasil XRD pada Gambar 2.8 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 $Si (1,34) > Mn (1,32) > Fe (1,24) > (0,95)$. Perbedaan tersebut membuat terbentuknya pasangan atomik baru dengan berbagai hasil *negative heat mixing* (Yuping Wu, dkk, 2006). Hasil hipotesa tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.10, 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 Wu, dkk, 2006).

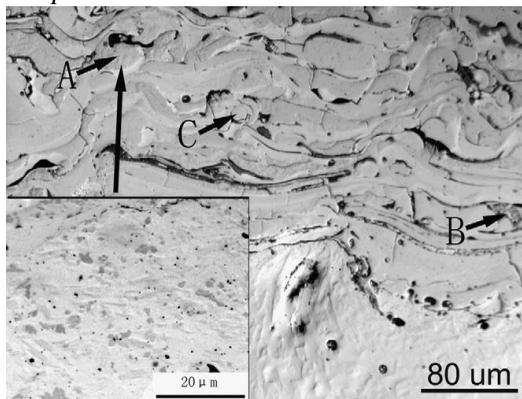


Gambar 2.12 Kurva DSC *Coating* Fe-Cr-B-Mn-Si dengan Laju Pemanasan 10K/m (Yuping Wu, dkk, 2006)

Dari Gambar 2.12, area *Supercooled Liquid Region* (SLR), ΔT_x didefinisikan melalui perbedaan antara temperatur transisi glass (T_g) dan temperatur onset rekristalisasi (T_x) sebesar 40K (620 – 579,9K). Nilai ΔT_x fasa amorfus pada hasil *coating* sesuai dengan paduan *bulk amorphous Fe based coating* (Inoue, dkk, 1998). Semakin besar nilai SLR yang berhubungan dengan nilai GFA dan besaran nilai ΔT_x juga mempunyai hubungan yang sama dengan nilai GFA pada fasa amorfus. Sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai ΔT_x dapat merepresentasikan nilai GFA (Yuping Wu, dkk, 2006).

2.4.3 Kajian Pengujian Metalografi Fe-Cr-B-Mn-Si Coating

Penelitian yang dilakukan oleh Fu Bin You, dkk (2009) tentang pengaruh proses perlakuan panas terhadap mikrostruktur dan sifat mekanik material *Fe-based amorphous coating* menunjukkan bahwa hasil pengujian mikrostruktur lapisan *as-sprayed coating* pada bagian *cross section* menggunakan mikroskop optik terdapat fasa *light metal lamellar*, *gray lamellar* dan *unmelted particles*.



Gambar 2.13 Mikrostruktur Bagian *Cross Section As-Sprayed Coating* (Fu Bin You, dkk, 2009)

Pada Gambar 2.13 menunjukkan gambar mikrostruktur bagian *cross section* pada *as-sprayed coating*. Lapisan *coating* terdiri dari tumpukan lamelar-lamelar yang menempel pada permukaan substrat, terlihat partikel-partikel *coating* yang *dispraying (droplet)* mengalami peleburan baik secara keseluruhan maupun sebagian mengalami fenomena dampak ke permukaan substrat. Mikrostruktur pada lapisan *as-sprayed coating* terdiri dari tiga fasa, yaitu pada (a) *light metal lamellar*, (b) *gray lamellar* dan (c) *unmelted particles*. Pada fasa *light metal lamellar* mengandung unsur Fe yang tinggi dan area yang terbentuk lebih besar daripada area fasa *gray lamellar*, sehingga persebaran area fasa *gray lamellar* tidak merata. Sedangkan pada fasa *gray lamellar* mengandung senyawa borida yang tinggi. Senyawa borida tersebut tidak larut dalam senyawa matriks Fe, sehingga terbentuk kristalisasi borida selama proses *spraying*. Sedangkan *unmelted particles* terlihat seperti partikel-partikel bulat, hal ini disebabkan adanya kandungan oksida yang cukup tinggi dalam partikel tersebut. Sebab proses *spraying* dilakukan pada ruang terbuka, sehingga banyak oksigen yang terperangkap dalam droplet dan membentuk senyawa oksida ketika mengalami solidifikasi di permukaan substrat (Fu Bin, dkk, 2009).

2.5 JENIS IKATAN PADA PROSES PELAPISAN

Pada saat proses pelapisan suatu logam terutama baja dengan berbagai bentuk paduannya, terjadi fenomena terbentuknya ikatan antara material substrat dan material pelapis. Terdapat dua fenomena yang dapat terjadi yaitu :

1. Fenomena adhesi
2. Fenomena difusi dalam atom

Terjadinya fenomena tersebut dipengaruhi oleh metode pelapisan yang digunakan serta karakteristik dari tiap jenis material substrat dan material pelapis.

1. Fenomena Adhesi

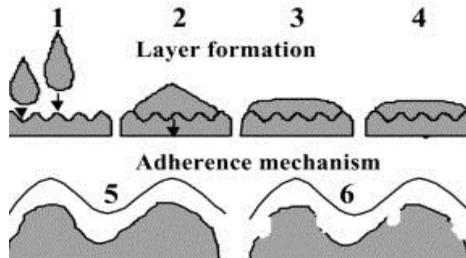
Adhesi atau *bonding* adalah fenomena yang terjadi bila dua substansi yang berbeda bergabung menjadi satu, berkontak karena

adanya gaya tarik menarik diantara keduanya. *Bonding* dapat terjadi apabila cairan masuk ke dalam porus atau celah permukaan material. Karena adanya *mechanical interlocking* yang terjadi ketika cairan tersebut mengeras, maka akan terbentuk ikatan (*bond*) yang kuat.

Terjadinya fenomena adhesi apabila dua substansi bergabung atau berkontak karena adanya gaya tarik menarik antara keduanya. Material adhesif adalah material yang digunakan untuk menghasilkan adhesi, sedangkan adheren adalah tempat dilekatkannya material adhesif. Kualitas adhesi tergantung pada sifat permukaan dan material adhesif. Adhesi yang baik dapat diperoleh apabila permukaan material adheren atau substrat cukup kasar secara mikroskopis dan makroskopis, serta bersih dari debris (Ferracane, 2001).

Agar diperoleh suatu perlekatan yang baik maka hendaknya :

1. Permukaan substrat harus bersih
2. Material adhesif dapat membasahi subsrat dengan baik, mempunyai sudut kontak kecil, dan mengalir ke seluruh permukaan
3. Adaptasi dari substrat menghasilkan perekatan material tanpa adanya udara yang terperangkap.
4. *Interface* mempunya sifat fisik, mekanik yang cukup atau kekuatan mekanik yang dapat menahan kekuatan *debonding* (pelepasan)
5. Adhesif *hams* bisa sempurna dibawah kondisi yang direkomendasikan dalam penggunaannya



Gambar 2.14 Mekanisme Fenomena Adhesi (Ferracane, 2001)

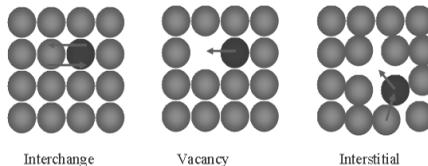
Partikel yang disemprotkan oleh *nozzle thermal spray* berada pada kondisi temperatur tinggi. Mengakibatkan partikel ini bersifat sangat ulet atau bahkan meleleh. Pada saat partikel ini bersentuhan dengan substrat maka terjadi mekanisme *quenching* hingga muncul tegangan lokal pada daerah tersebut. Tegangan ini berhubungan dengan energi menarik ikatan atom bila partikel berada pada keadaan leleh. Adhesif antara substrat dan material pelapis sebagian besar ditentukan dengan ikatan ini (Otto Knotek, 2001).

2. Fenomena Difusi dalam Atom

Difusi adalah peristiwa mengalirnya atau berpindahnya suatu zat dari bagian berkonsentrasi tinggi ke bagian yang berkonsentrasi rendah. Contoh yang sederhana adalah penambahan karbon ke dalam baja karbon rendah sehingga pada baja, karbonnya lebih besar. Apabila temperatur pada suatu material naik, akan menyebabkan atom-atomnya bergetar dengan energi yang lebih besar dan sejumlah kecil atom akan berpindah dalam kisi. Mekanisme perpindahan atom dalam suatu logam dapat terjadi secara interstisi dan kekosongan. Perpindahan secara interstisi terjadi bila atom tidak memiliki ukuran yang sama. Sedangkan perpindahan secara kekosongan dapat terjadi bila semua atom memiliki ukuran sama (Otto Knotek, 2001).

Proses difusi dapat terjadi lebih cepat apabila :

1. Temperatur tinggi
2. Atom yang berdifusi kecil
3. Ikatan struktur induk lemah (dengan titik cair rendah)
4. Terdapat cacat-cacat dalam bahan (kekosongan atau batas butir)



Gambar 2.15 Mekanisme Fenomena Difusi dalam Atom (Otto Knotek, 2001)

2.6 PELAPISAN PERMUKAAN LOGAM

Pelapisan permukaan logam adalah suatu cara yang dilakukan untuk memberikan sifat tertentu pada suatu permukaan benda kerja, dimana diharapkan benda tersebut akan mengalami perbaikan baik dalam hal struktur mikro maupun ketahanannya, dan tidak menutup kemungkinan pula terjadi perbaikan terhadap sifat fisiknya. Pelapisan logam merupakan bagian akhir dari proses produksi suatu produk. Proses tersebut dilakukan setelah benda kerja mencapai bentuk akhir atau setelah proses pengerjaan mesin serta penghalusan terhadap permukaan benda kerja yang dilakukan. Dengan demikian, proses pelapisan termasuk dalam kategori pekerjaan *finishing* atau sering juga disebut tahap penyelesaian suatu produksi benda kerja (Supriyani, 2012). 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. Metode pelapisan harus sesuai dengan metode fabrikasi komponen.
4. Tebal pelapisan harus homogen dan tidak mengandung pori.

2.6.1 Pelapisan Dekoratif

Pelapisan dekoratif bertujuan untuk menambah keindahan tampak luar suatu benda atau produk. Sekarang ini pelapisan dengan bahan krom sedang digemari karena warnanya yang cemerlang, tidak mudah terkorosi dan tahan lama. Produk yang dihasilkan banyak digunakan sebagai aksesoris pada kendaraan bermotor baik yang beroda dua maupun pada kendaraan beroda empat. Dengan kata lain pelapisan ini hanya untuk mendapatkan bentuk luar yang baik saja. Logam-logam yang umum digunakan

untuk pelapisan dekoratif adalah emas, perak, nikel dan krom (ASM Handbook Volume 5, 1994)

2.6.2 Pelapisan Protektif

Pelapisan protektif adalah pelapisan yang bertujuan untuk melindungi logam yang dilapisi dari serangan korosi karena logam pelapis tersebut akan memutus interaksi dengan lingkungan sehingga terhindar dari proses oksidasi (ASM Handbook Volume 5, 1994).

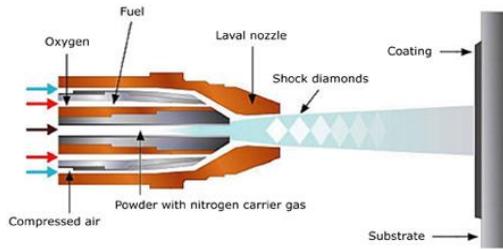
2.6.3 Pelapisan Sifat Khusus Permukaan

Pelapisan ini bertujuan untuk mendapatkan sifat khusus permukaan seperti sifat keras, sifat tahan aus dan sifat tahan temperatur tinggi atau gabungan dari beberapa tujuan di atas secara bersama-sama. Misalnya dengan melapisi bantalan dengan logam *stainless steel* agar bantalan lebih keras dan tidak mudah aus akibat gesekan pada saat berputar (ASM Handbook Volume 5, 1994).

2.7 PROSES PELAPISAN DENGAN *THERMAL SPRAY*

2.7.1 Metode *Thermal Spray*

Thermal spray merupakan salah satu teknik rekayasa permukaan, yaitu dengan mendepositkan partikulat dalam bentuk cair, semi cair atau padat ke substrat dan struktur mikro lapisan dihasilkan dari pembekuan partikel tersebut, seperti terlihat pada Gambar 2.16. Jenis material yang didepositkan ke permukaan substrat ini dapat berupa logam, keramik maupun komposit. Bentuk material yang digunakan sebagai pelapis dapat berupa serbuk (*powder*), ataupun kawat (*wire*), tergantung dari jenis material dan proses pelapisan yang digunakan (ASM Handbook Volume 5, 1994).



Gambar 2.16 Proses *Thermal Spray* (ASM Handbook Volume 5, 1994)

Material diumpungkan ke dalam *gun*, kemudian material dipanaskan hingga mencair, lalu dipercepat dengan adanya tekanan gas yang disempotkan menuju substrat. Pada saat partikel cair, hasil semprotan tadi mengenai bagian permukaan substrat, partikel tersebut kemudian mengalami pendinginan yang membentuk struktur berupa lapisan (*lamellar*), dengan demikian akan membentuk lapisan atau endapan hasil *spray*.

Proses pelapisan dengan metode *thermal spray coating* mudah digunakan, biaya operasi lebih kecil dan dapat meningkatkan kinerja serta umur pakai komponen. Perbedaan tingkat porositas dan jumlah inklusi oksida pada hasil lapisan akhir merupakan fungsi dari kecepatan partikel cair dan lingkungan, udara dan gas *inert* yang digunakan. Secara khusus lapisan menempel dan terikat pada substrat dengan ikatan mekanik (*mechanical interlocks*) di mana permukaan substrat telah dikasarkan terlebih dahulu dengan *grit blasting*. Ikatan seperti ini disebut dengan kekuatan ikatan adhesif, sedangkan ikatan antara partikel dengan partikel yang sama disebut ikatan kohesif (M.N Task, 2013).

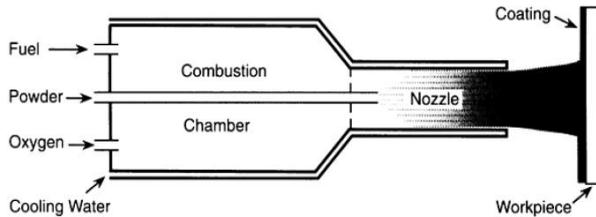
2.7.2 Jenis-Jenis *Thermal Spray*

Berikut ini merupakan jenis-jenis dari metode *thermal spray*:

1. Proses *High Velocity Oxy Fuel* (HVOF)

Proses pelapisan dengan metode *High Velocity Oxy Fuel* (HVOF) menggunakan energi kinetik yang luar biasa tinggi dan

energi panas yang dihasilkan serta menghasilkan lapisan dengan tingkat porositas yang lebih rendah, kekuatan ikatan lebih tinggi, permukaan lapisan lebih halus dan tegangan sisa yang lebih rendah jika dibandingkan dengan lapisan yang dihasilkan dari proses *spraying* lainnya seperti *flame spraying*, *electric arc spraying* atau *plasma spraying* (Aprilia, 2009).



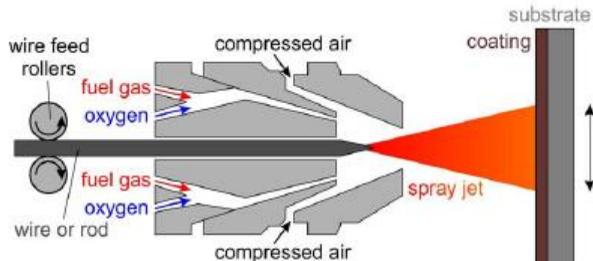
Gambar 2.17 Skema *High Velocity Oxy Fuel* (HVOF) (ASM Handbook Volume 5, 1994)

Pada metode *High Velocity Oxy Fuel* (HVOF) serbuk diumpungkan secara aksial ke dalam nosel dengan gas-gas pembakaran (kerosin, *propylene*, *propane*, *hydrogen*) bertekanan tinggi. Gas-gas tersebut lewat melalui nosel dengan peningkatan kecepatan yang tinggi ketika dibakar dengan oksigen untuk mempercepat partikel-partikel cair yang mencapai kecepatan supersonik. Masing-masing partikel dipanaskan dalam ruang pembakaran pada *High Velocity Oxy Fuel* (HVOF) *gun*, dan berpenetrasi ke permukaan substrat. Pada saat terjadi tumbukan dengan substrat, partikel tersebut berubah bentuk menjadi *laurel* yang mengalami pendinginan ke titik leburnya yang mengeras dan selama tumbukan tersebut terjadi percikan (Aprilia, 2009).

2. Proses *Wire Flame Spraying* (WPS)

Proses pelapisan dengan metode *Wire Flame Spraying* menggunakan material pelapis berbentuk kawat, dengan diameter antara 1 – 8 mm. Kawat tersebut dimasukkan secara aksial ke dalam busur serta di dalamnya terdapat tembakan atau *gun*. Kawat dilebur dan kemudian dilakukan proses atomisasi menggunakan

gas inert (*acetylene, propane, hydrogen*). Gas tersebut berfungsi sebagai gas pembakaran, sedangkan udara yang bertekanan berperan sebagai gas atomisasi (DIN EN 657, 2005).



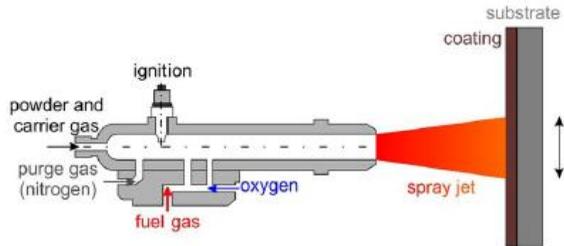
Gambar 2.18 Skema *Wire Flame Spraying* (DIN EN 657, 2005)

Metode *Wire Flame Spraying* digunakan untuk misalnya proses deposisi pelapisan aluminium atau seng untuk proteksi katodik atau struktur baja untuk perbaikan pada komponen yang digunakan untuk material yang sama, misalnya material substrat. Meskipun mengalami kenaikan pada harga material, *molybdenum* masih digunakan secara luas untuk penggunaan lapisan protektif dari keausan, misalnya komponen piston atau *gear*, hal ini disebabkan karena lapisan tersebut mempunyai ketahanan terhadap aus (William, 2002).

3. Proses *Detonation Gun Spraying* (DGS)

Proses *Detonation Gun Spraying* merupakan salah satu metode pelapisan logam yang sudah dikembangkan mulai tahun 1950 di Amerika Serikat. Metode ini berdasarkan proses pembakaran yang tidak berkelanjutan (*discontinuous*), yang dikarakterisasi oleh rangkaian pengisian berupa gas pembakaran (*acetylene* dan *oxygen*). Material pelapisnya menggunakan serbuk dengan membawa gas nitrogen yang diinjeksikan ke dalam tabung, proses pengapian serta pembilasan tabung tersebut menggunakan gas nitrogen. Frekuensi pengapian pada awalnya sekitar 4 – 8 Hz dan sekarang sudah berkembang menjadi 100 Hz dan digunakan untuk *spraying gun*, dimana proses tersebut berkerja menggunakan

sistem kontrol dinamika fluida pada penginjeksian gas atau disebut dengan *High Frequency Pulse Detonation* (HFPD) (DIN EN 657, 2005).

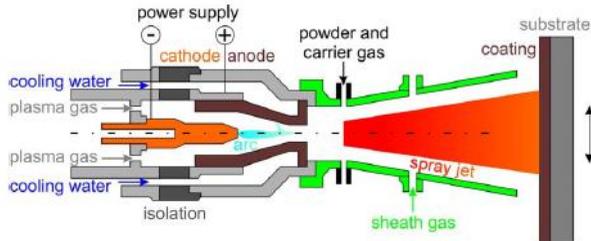


Gambar 2.19 Skema *Detonation Gun Spraying* (DIN EN 657, 2005)

Metode *Detonation Gun Spraying* dikarakterisasi oleh temperatur gas yang relatif tinggi, bisa mencapai temperatur 4.000°C dan kecepatan partikel yang tinggi (hingga 900 m/s). Proses oksidasi partikel percikan logam dibatasi berdasarkan waktu interaksi antara gas pembakaran dengan partikel serbuk. Kecepatan partikel yang tinggi akan menghasilkan densitas lapisan yang tinggi serta kekuatan ikatan lapisan yang kuat (DIN EN 657, 2005).

4. Proses *Vacum Plasma Spraying* (VPS)

Proses *Vacum Plasma Spraying* merupakan salah satu jenis metode pelapisan logam yang menggunakan tekanan gas yang cukup rendah. Tekanan yang digunakan lebih dari 2kPa selama proses pelapisan berlangsung. Hal ini bertujuan untuk mencapai kondisi chamber yang *inert*. Proses pelapisannya cukup sederhana, hasilnya berupa lapisan MCrAlY yang cukup protektif terhadap korosi gas panas, densitas yang tinggi, serta permukaan lapisan yang homogen pada gas *turbine blades*. Kandungan oksigennya yang rendah digunakan untuk mengoptimalkan ketahanannya terhadap oksidasi. Lapisan tersebut berperan sebagai *bond coat* seperti ZrO₂ untuk lapisan isolasi termal (Schwenk, 2003).



Gambar 2.20 Skema *Vacum Plasma Spraying* (Schwenk, 2003)

Metode *Vacum Plasma Spraying* mempunyai peranan cukup penting untuk aplikasi medis, misalnya produksi berbagai jenis implan serta implan untuk gigi. Selain itu juga ada beberapa aplikasi khusus dari metode ini, misalnya untuk proses deposisi lapisan protektif korosi tantalum, produksi target *sputtering* dengan kualitas tinggi yang digunakan untuk lapisan tipis (*thin films*) serta produksi logam refraktori (McKechine, 1993).

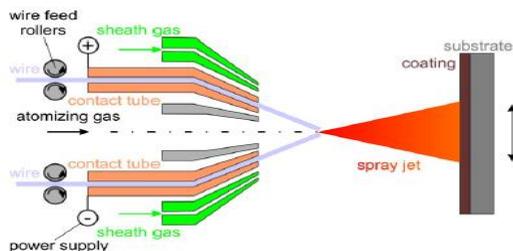
2.8 METODE ARC SPRAYING

Proses *Arc Spraying* merupakan salah satu metode pelapisan permukaan logam yang menggunakan material pelapis berupa kawat. Kawat tersebut dilebur menggunakan busur arus listrik yang tinggi. Setelah kawat meleleh (*droplet*), kemudian ditekan menggunakan gas inert, namun temperatur turun drastis setelah melewati *wire tip*. Partikel *spray* cair membentuk *splat* ketika membentur permukaan substrat karena efek temperatur dan energi kinetik yang tinggi. Partikel *spray* cair tersebut memipih, pecah, menyebar dan ter-*quenched* pada rentang waktu yang pendek sekitar 10^{-8} dan 10^{-6} s. Meskipun temperatur pemanasan partikel atau *wire* dinaikkan hingga di atas temperatur solid substrat, namun reaksi fusi tetap tidak terjadi karena laju pendinginan yang sangat cepat. *Wire arc spray* selalu terdapat lapisan oksida tipis yang menyebar dan terperangkap di antara struktur lamelar *coating* yang sering disebut inklusi oksida (*stringer*). Proses *wire arc spray* bisa dilakukan hanya untuk material yang mempunyai konduktivitas

listrik yang baik, khususnya untuk material pelapisnya. Di dalam alat *arc spraying*, terdapat kawat tunggal (*single wire*) yang disambungkan dengan busur penyalu (*arc burning*), dan di antara kedua alat tersebut terdapat elektroda *non consumable* yang berperan sebagai *nozzle* untuk proses atomisasi gas (Heberlein, 2002).

Tetapi di banyak industri menggunakan kawat ganda (*twin wire*), di mana kedua kawat tersebut berperan sebagai elektroda dan secara kontinyu akan dilebur untuk diinjeksikan menuju ke permukaan substrat. Perbedaan potensial di antara kedua kawat tersebut sekitar 15 – 50 V. Hal ini bertujuan untuk menjaga proses oksidasi pada material yang dilapisi serta menyediakan tegangan paling rendah, karena *superheating* pada lelehan material pelapis akan meningkat seiring dengan meningkatnya nilai tegangan (Heberlein, 2002).

Superheating dan oksidasi dari lelehan kawat akan menentukan nilai viskositas lelehan dan energi permukaan. Ukuran *droplets* yang diatomisasi tergantung pada parameter jenis atomisasi gas, laju aliran dan bentuk nosel. Pada proses oksidasi partikel percikan tergantung pada ukuran *droplet* dengan permukaan yang spesifik dan kandungan oksigen dalam *spray jet*. Hal ini bertujuan untuk proses atomisasi gas seperti nitrogen atau argon pada lingkungan atmosfer yang akan menghasilkan oksidasi dalam jumlah yang banyak (DIN EN 657, 2005).



Gambar 2.21 Skema *Arc Spraying* (DIN EN 657, 2005)

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

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 2.3 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

2.9 PENGARUH TEKANAN GAS DAN JARAK *NOZZLE*

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 (Dallair, 2000). 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 (Fang, 2004).

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 (Ji Xiu, 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 (Shaumma, 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 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.

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).

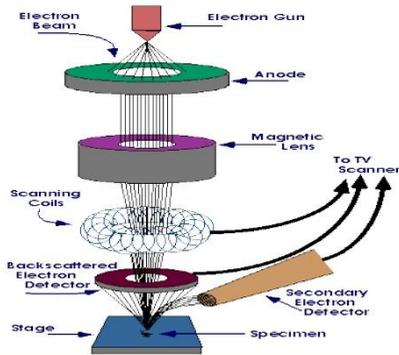
Sedangkan pada penelitian lain menunjukkan bahwa semakin besar arus busur yang digunakan maka semakin besar pula tegangan busur yang dihasilkan. Apabila tegangan busurnya rendah, maka ukuran partikel lelehannya semakin kecil. Selain itu, semakin besar arus busur yang digunakan maka akan semakin tinggi pula temperatur permukaan substrat (Canghe Li, 2008).

Lalu, penelitian yang dilakukan oleh (Sugiono, 2009) menunjukkan bahwa adanya pengaruh sudut dan jarak *nozzle* pada nilai kekerasan dan ketahanan abrasif pada lapisan *coating* dengan menggunakan metode *Arc-Spray*. Nilai kekerasan dan nilai ketahanan abrasif yang paling besar terjadi pada parameter sudut 90^0 dengan jarak 200 mm.

2.10 PRINSIP KERJA ALAT PENGUJIAN

1. Scanning Electron Microscope

Scanning Electron Microscope (SEM) merupakan mikroskop elektron yang banyak digunakan dalam ilmu pengetahuan material. SEM banyak digunakan karena memiliki kombinasi yang unik, mulai dari persiapan spesimen yang sederhana dan mudah, kapabilitas tampilan yang bagus serta fleksibel. SEM digunakan pada sampel yang tebal dan memungkinkan untuk analisis permukaan. Pancaran berkas yang jatuh pada sampel akan dipantulkan dan didifraksikan. Adanya elektron yang terdifraksi dapat diamati dalam bentuk pola – pola difraksi. Pola – pola difraksi yang tampak sangat bergantung pada bentuk dan ukuran sel satuan dari sampel. SEM juga dapat digunakan untuk menyimpulkan data – data kristalografi, sehingga hal ini dapat dikembangkan untuk menentukan elemen atau senyawa (JEOL, 2012).

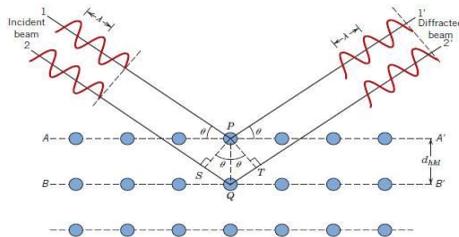


Gambar 2.22 Diagram SEM (JEOL, 2012)

2. X-Ray Diffraction

X-Ray Diffraction (XRD) digunakan untuk analisis pengujian fasa atau senyawa pada material dan juga karakterisasi kristal. Prinsip XRD adalah mendifraksi cahaya yang datang melalui celah kristal. Difraksi cahaya oleh kisi-kisi atau kristal ini dapat terjadi apabila difraksi tersebut berasal dari radius yang memiliki panjang gelombang yang setara dengan jarak antar atom, yaitu sekitar 1 Angstrom. Radiasi yang digunakan berupa radiasi sinar-X, elektron, dan neutron (Thermo ARL, 1999).

Ketika berkas sinar-X berinteraksi dengan suatu material, maka sebagian berkas akan diabsorpsi, ditransmisikan, dan sebagian lagi dihamburkan terdifraksi. Hamburan terdifraksi inilah yang dideteksi oleh XRD. Berkas sinar-X yang dihamburkan tersebut ada yang saling menghilangkan karena fasanya berbeda dan ada juga yang saling menguatkan karena fasanya sama. Berkas sinar-X yang saling menguatkan itulah yang disebut sebagai berkas difraksi. Hukum Bragg merumuskan tentang persyaratan yang harus dipenuhi agar berkas sinar-X yang dihamburkan tersebut merupakan berkas difraksi (Thermo ARL, 1999).



Gambar 2.23 Ilustrasi Difraksi Sinar-X pada XRD (Thermo ARL, 1999)

3. Sketmat Digital

Sketmat digital atau *vernier caliper* merupakan alat ukur yang lebih teliti dari mistar ukur. Pada batang ukurnya terdapat skala utama dengan cara pembacaan sama seperti mistar ukur. Pada ujung yang lain dilengkapi dengan dua rahang ukur yaitu rahang ukur tetap dan rahang ukur gerak. Dengan adanya rahang ukur tetap dan rahang ukur gerak maka sketmat digital dapat digunakan untuk mengukur dimensi luar, dimensi dalam, kedalaman dan ketinggian dari benda ukur. Di samping skala utama, sketmat digital dilengkapi pula dengan skala tambahan yang sangat penting perannya di dalam pengukuran yang disebut dengan skala nonius. Skala nonius inilah yang membedakan tingkat ketelitian sketmat digital.

Skala ukur sketmat digital terdapat dalam sistem inchi dan ada pula sistem metrik. Biasanya pada masing-masing sisi dari batang ukur dicantumkan dua macam skala, satu sisi dalam bentuk *inchi* dan sisi lain dalam bentuk metrik. Dengan demikian dari satu alat ukur bisa digunakan untuk mengukur dengan dua sistem satuan sekaligus yaitu inchi dan metrik. Ketelitian sketmat digital bisa mencapai 0.001 *inchi* atau 0.05 milimeter. Untuk skala pembacaan dengan sistem metrik, terdapat sketmat digital dengan panjang skala utama 150 mm, 200 mm, 250 mm, 300 mm, dan bahkan ada juga yang 1000 mm (Wagiran, 2013).

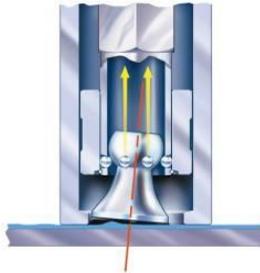
4. Surface Roughness Tester

Surface roughness tester merupakan alat yang mampu mengukur tingkat kekasaran permukaan. Setiap permukaan komponen dari suatu benda mempunyai beberapa bentuk dan variasi yang berbeda baik menurut strukturnya maupun dari hasil proses produksinya. *Roughness* atau kekasaran didefinisikan sebagai ketidakhalusan bentuk yang menyertai proses produksi yang disebabkan oleh pengerjaan mesin. Nilai kekasaran dinyatakan dalam *Roughness Average* (Ra). Ra merupakan parameter kekasaran yang paling banyak dipakai secara internasional. Pengukuran kekasaran permukaan diperoleh dari sinyal pergerakan *stylus* berbentuk *diamond* untuk bergerak sepanjang garis lurus pada permukaan sebagai alat *indicator* pengukur kekasaran permukaan benda uji. Prinsip kerja dari alat ini adalah dengan menggunakan *transducer* dan diolah dengan *microprocessor* (Wagiran, 2013).

5. Pull Off Bonding

Pull-off adhesion tester merupakan alat untuk mengukur kekuatan yang dibutuhkan untuk menarik diameter *coating* dari substrat. Pengukuran ini memberikan informasi kekuatan adhesi antara *coating* dan substrat. Berdasarkan beberapa pengujian sebelumnya, terdapat kerusakan *bonding* antara adhesif dan preparasi *dolly* yang kurang, mengakibatkan hasil uji adhesi menjadi mudah diprediksi. Komponen utama dari alat ini yaitu *pressure source*, *pressure gage* dan *actuator*. Selama proses operasi, permukaan *coating* dan pin untuk tarikan (*dolly*), dilekatkan untuk mendapatkan nilai *bond strength*. Setelah itu, *coupling connector* pada *actuator* dilekatkan pada pin. Tekanan dari *pressure source* dioperasikan dengan lambat pada *actuator*. Ketika tekanan yang diberikan lebih besar daripada kekuatan lekat antara substrat dan *coating*, maka akan terjadi proses pemisahan antara pin dan permukaan

coating. Tekanan maksimum yang diberikan memberikan informasi tentang kekuatan lekat antara substrat dan *coating* yang dikonversikan dalam satuan MPa (TQC, 2012).



Gambar 2.24 *Actuator* Tampak Samping (TQC, 2012)

6. Thermal Cycle (Muffle Furnace)

Muffle furnace atau tanur merupakan seperangkat alat yang digunakan untuk proses pemanasan material. Proses pemanasan ini didapat dari energi listrik dengan daya lebih dari 100 Watt. Bentuk *muffle furnace* pada umumnya yaitu seperti oven dengan lapisan material keramik berupa batu tahan api. Temperatur operasional mampu bekerja sampai 950°C (Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS). Proses pemanasan di dalam tungku ini tidak terdapat pembakaran dari gas tetapi berasal dari energi listrik, sehingga kontrol temperatur lebih seragam. Fenomena perpindahan panas di dalam tungku di antaranya konduksi, konveksi, radiasi serta hambatan listrik dari elemen panas (Liebermen, 2003).

7. Microhardness

Uji kekerasan indentasi menggunakan alat model *Micro Hardness Vickers*. Perbedaan kekerasan dapat diketahui dari bentuk indenter yang ditekan pada permukaan material. Alat pengujian kekerasan ini menggunakan indenter berbentuk piramid yang membuat jejak pada material dengan pembebanan tertentu. Masa penjejakan berlangsung 30 detik dan dapat menghasilkan ketelitian antara 2–3 μm . Panjang

diagonal jejak yang diukur pada arah horisontal ditandai sebagai d-1 dan panjang diagonal jejak pada arah vertikal ditandai sebagai d-2, lalu dihitung d-rerata sebagai panjang diagonal jejak. Nilai kekerasan material uji dicari pada tabel yang tersedia dengan memproyeksikan d-rerata serta bobot beban yang digunakan atau dapat dihitung berdasarkan rumus Vickers sebagai berikut :

$$HVN = \frac{189 \times F \times 10^3}{d^2}$$

HVN : Nilai Kekerasan Vicker's

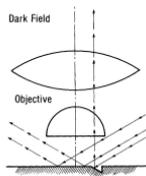
F : Beban tumbukan (N)

D : Panjang diagonal jejak (μm)

(Callister, 2009)

8. Mikroskop Optik

Mikroskop optik merupakan alat yang berfungsi untuk melakukan pengujian metalografi. Tetapi menurut Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) menyebutkan bahwa mikroskop yang dirakit lensa optik itu memiliki kemampuan terbatas dalam memperbesar suatu objek. Hal itu disebabkan keterbatasan difraksi cahaya yang ditentukan panjang gelombang cahaya. Panjang gelombang cahaya pada mikroskop optik hanya sampai 200 nanometer. Tujuan dilakukannya pengujian metalografi pada penelitian ini adalah melihat struktur mikro dan perubahan yang terbentuk pada spesimen logam. Adapaun larutan etsa yang digunakan sesuai ASTM E-407 yaitu menggunakan gliseregia.

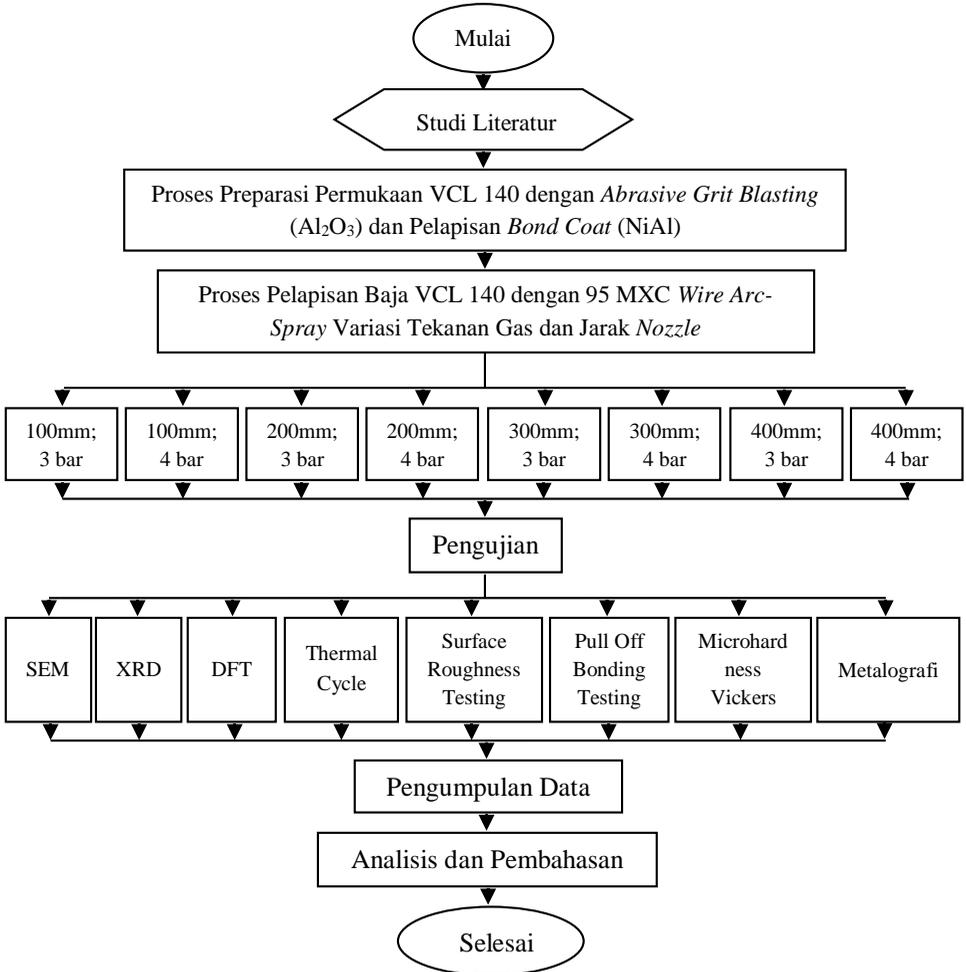


Gambar 2.25 Alur Sinar pada Pengamatan Metalografi
(Kaufmann, 2003)

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 DIAGRAM ALIR PENELITIAN



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 RANCANGAN PENELITIAN

Pada rancangan penelitian dengan menggunakan metode *wire arc spray* pada VCL 140 dilakukan rancangan penelitian sebagai berikut :

Tabel 3.1 Rancangan Pengujian Spesimen

No	Perlakuan Permukaan		Pengujian						
	Bond Coat	Top Coat	DFT	SR	SEM	XRD	POB	TM	VM
1	200 mm	100 ; 3	v	v	v	v	v	v	v
	4 bar	100 ; 4	v	v	v	v	v	-	-
2	200 mm	200 ; 3	v	v	v	v	v	-	-
	4 bar	200 ; 4	v	v	v	v	v	-	-
3	200 mm	300 ; 3	v	v	v	v	v	-	-
	4 bar	300 ; 4	v	v	v	v	v	-	-
4	200 mm	400 ; 3	v	v	v	v	v	-	-
	4 bar	400 ; 4	v	v	v	v	v	-	-

3.3 METODE PERANCANGAN

Metode yang dilakukan pada perancangan penelitian ini antara lain :

1. Studi Literatur

Metode ini mengacu pada buku-buku dan jurnal-jurnal, informasi dan penelitian situs industri yang mempelajari

mengenai permasalahan korosi, pengaruh tekanan gas dan jarak *nozzle* pada pelapisan FeCrBMnSi *coating*, dengan metode *wire arc spray*.

2. Diskusi

Pada tahapan ini dilakukan untuk menambah wawasan tambahan agar penulis dapat lebih memahami tentang masalah dan solusi penelitian yang dilakukan. Diskusi ini dilakukan dengan dosen pembimbing atau dosen mata kuliah terkait.

3. Eksperimental

Metode ini dilakukan dengan pengujian langsung sesuai dengan prosedur dan metode yang ada. Pengujian yang diperlukan dalam eksperimen ini yaitu SEM, XRD, Uji Ketebalan Lapisan/DFT, *Thermal Cycle*, *Surface Roughness Test*, *Pull Off Bonding Testing*, *Microhardness Vickers* dan Metalografi.

3.4 BAHAN PENELITIAN

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu :

1. AISI 4140 (VCL 140)

Digunakan sebagai material dasar atau *base material* yang akan diproteksi, komposisi dari baja ini sebagai berikut :

Tabel 3.2 Komposisi Kimia VCL 140 (PT. BHINNEKA BAJANAS, 2016)

Komposisi	Wt. %	Komposisi	Wt. %
C	0,42	Cr	1,12
Mn	0,77	Mo	0,18
P	0,017	Cu	0,23
S	0,020	Ni	0,12
Si	0,26	Fe	96,863



Gambar 3.2 Round Bar VCL 140

Tabel 3.3 Propertis Mekanik VCL 140 (PT. BHINNEKA BAJANAS, 2016)

Properties	Nilai
Ultimate Tensile Strength (MPa)	1006
Yield Strength (MPa)	892
Elongation (%)	17,4
Hardness (HRB)	250 - 275
Temperature Melting (°C)	1416

2. *Brown Aluminum Oxide (Al_2O_3)*

Aluminum oxide 24 mesh digunakan sebagai *abrasive grit blasting* permukaan yang akan *dicoating*, berfungsi untuk membersihkan permukaan dan membuat permukaan menjadi kasar.

Tabel 3.4 Komposisi Kimia *Brown Aluminum Oxide* (Pearl International Material Safety Data Sheet, 2004)

Komposisi	Wt.%
Aluminum Oxide (Al_2O_3)	96.69%
Titanium Dioxide (TiO_2)	2.52%
Silicon Dioxide (SiO_2)	0.44%
Iron Oxide (Fe_2O_3)	0.10%
Others (MgO , CaO , Cr_2O_3)	0,25%

Tabel 3.5 Propertis *Brown Aluminum Oxide* (Pearl International Material Safety Data Sheet, 2004)

Crystal Form	Alpha-Alumina
True Density	3.95 gr/cm ³
Hardness	Knoop (100) 2050 kg/mm
Melting Point	2000°C
Colour	Brown-Tan

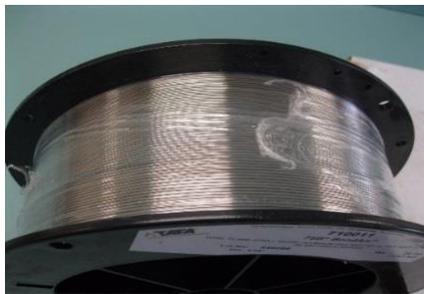


Gambar 3.3 Serbuk *Brown Aluminum Oxide*

3. NiAl (wire 75B) - Bond Coat

Tabel 3.6 Komposisi Kimia dan Propertis Wire 75B (Pearl International Material Safety Data Sheet, 2004)

Komposisi/Propertis	Keterangan
Nickel	95%
Aluminum	5%
Manufaktur	TAFA
Wire Size	1,6 mm
Melting Point	1450°C
Bond Strength	62,8 MPa



Gambar 3.4 NiAl Wire

4. 95 MXC Wire (Top Coat)

Merupakan salah satu jenis *iron-chrom based coating* yang digunakan sebagai *top coating*. Menggunakan wire dengan diameter 1,6 mm.

Tabel 3.7 Komposisi Kimia *Wire 95 MXC* (TAFSA Safety Data Sheet, 2015)

Komposisi	Wt.%
Fe	64,0
Cr	29,0
Si	1,60
Mn	1,65
B	3,75

Tabel 3.8 Propertis Fisik *Wire 95 MXC* (TAFSA Safety Data Sheet, 2015)

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



Gambar 3.5 95 MXC Wire

5. Lem Araldite

Lem ini berfungsi sebagai perekat antara pin dengan spesimen yang akan diuji *pull off test*. Lem *araldite* yang berwarna biru digunakan sebagai *hardener*, sedangkan yang berwarna putih digunakan sebagai resin.



Gambar 3.6 Lem Araldite

3.5 ALAT PENELITIAN

Alat yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut :

1. Mesin Gergaji Pita

Mesin ini digunakan untuk memotong *roundbar* VCL 140 menjadi beberapa bagian sesuai ukuran yang diinginkan.



Gambar 3.7 Mesin Gergaji Pita

2. Peralatan *Abrasive Grit Blasting*

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 3.9.

Tabel 3.9 Spesifikasi Peralatan *Abrasive Grit Blasting* Tipe NOB35CE (NORBLAST by Norexox Specification Datasheet, 2015)

Spesifikasi	Keterangan
<i>Capacity</i>	<i>35 Liters</i>
<i>Pipe Work</i>	$\frac{1}{2}$ "
<i>Grit Blasting house dia</i>	13 mm
<i>Remote control handle</i>	<i>Pneumatic</i>
<i>Hose length</i>	10 m
<i>Connector Nozzle</i>	$\frac{1}{2}$ " threaded
<i>Filter</i>	<i>Vortex Air Conditionig</i>

<i>Hose Nozzle (As Required)</i>	3/8" (9 mm)
<i>Pressure (for steel)</i>	7 Bar
<i>Required air for nozzle 3/8</i>	5 m ³ min/200 cfm
<i>Required Abrasive</i>	478 kg/hour
<i>Required H.P</i>	39



Gambar 3.8 Mesin Sand Blasting

3. Mesin Arc Spray

Mesin ini digunakan untuk melakukan *spraying NiAl wire* dan *95 MXC wire* adalah Tafa 9000 *Electrical Wire-Arc Spraying Machine* dengan variasi jarak dan tekanan gas yang telah ditentukan. Adapun spesifikasi lengkap dari mesin tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.10.

Tabel 3.10 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 Max.</i> 40 kg/h for Tin
<i>Wire Feed Pressure</i>	2 Bar



Gambar 3.9 Mesin *Arc Spray*

4. Alat Sketmat Digital

Alat ini berfungsi untuk mengetahui ketebalan lapisan yang dihasilkan.



Gambar 3.10 Alat *Sketmat Digital*

5. Alat Uji Kekasaran Permukaan (*Surface Roughness Tester*)

Alat ini berfungsi untuk mengetahui nilai kekasaran permukaan material sampel yang telah *dicoating*.



Gambar 3.11 *Surface Roughness Tester*

6. Mesin Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Mesin pengujian ini digunakan untuk mengetahui morfologi permukaan substrat setelah mengalami proses *abrasive* dan pelapisan dengan material *coating*.



Gambar 3.12 Mesin Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM)

7. Mesin Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD)

Mesin pengujian ini digunakan untuk mengetahui unsur dan senyawa yang terbentuk pada substrat dan hasil *coating*.



Gambar 3.13 Mesin Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD)

8. Mesin Pengujian *Thermal Cycle* (*Muffle Furnace*)

Mesin ini digunakan untuk mengetahui perilaku dan kestabilan termal material terhadap temperatur tinggi



Gambar 3.14 *Muffle Furnace*

9. Alat *Pull Off Bonding Test*

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



Gambar 3.15 Alat *Pull Off Bonding Test*

10. Alat *Microhardness Vickers*

Alat ini digunakan untuk mengetahui distribusi kekerasan fasa pada permukaan lapisan *coating*.



Gambar 3.16 Alat *Microhardness Vickers Digital*

11. Alat Mikroskop Optik

Alat ini berfungsi untuk mengetahui struktur mikro dan distribusi fasa yang terbentuk pada lapisan *coating*.



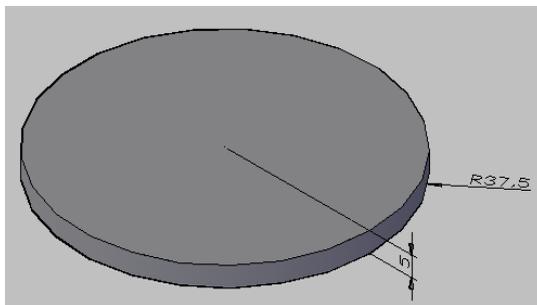
Gambar 3.17 Alat Mikroskop Optik Metalurgi

3.6 PROSEDUR PENELITIAN

Untuk mendapatkan hasil yang diharapkan maka dalam penelitian ini dilakukan tahapan-tahapan sebagai berikut :

3.6.1 Preparasi Spesimen VCL 140

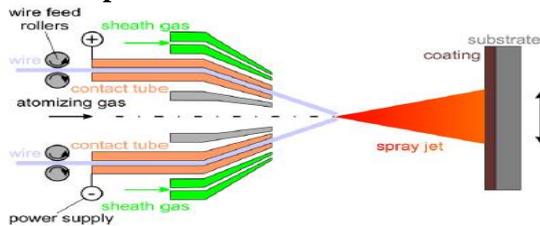
1. Pemotongan spesimen *round bar* VCL 140 sebanyak 8 buah dengan ukuran diameter 75 mm dan ketebalan 5 mm.



Gambar 3.18 Dimensi Spesimen VCL 140

2. Sebelum proses pelapisan, permukaan substrat dilakukan *abrasive grit blasting* untuk membuat permukaan menjadi kasar menggunakan *aluminum oxide 24 mesh* dengan tekanan sebesar 7 bar dan jarak *nozzle* 100 mm. Permukaan yang kasar ini dibutuhkan untuk memperbaiki sifat adhesi antara substrat dengan pelapisnya.

3.6.2 Proses Pelapisan



Gambar 3.19 Proses Pelapisan Arc Spray

1. Melakukan proses *abrasive grit blasting* menggunakan *aluminum oxide 24 mesh* dengan tekanan sebesar 7 bar dan jarak *nozzle* 100 mm. Hal ini bertujuan agar permukaan spesimen menjadi kasar serta untuk meningkatkan ikatan mekanik antara material substrat dengan pelapisnya.
2. Melakukan *spraying bond coat* NiAl dengan tekanan 4 bar dan jarak *nozzle* 200 mm. *Bond coat* ini berfungsi sebagai lapisan perekat antara substrat dengan lapisan *top coat*.
3. Melakukan *spraying 95 MXC wire* dengan sudut 90°, dengan variasi jarak dan tekanan gas yang digunakan. (variasi jarak yang digunakan adalah 100 mm, 200 mm, 300 mm dan 400 mm, sedangkan tekanan yang digunakan adalah 3 bar dan 4 bar).

3.6.3 Proses Pengujian dan Analisis

Pada tahapan ini akan dilakukan beberapa pengujian untuk mendapatkan data yang sesuai dengan tujuan dari penelitian. Kemudian dilakukan analisis dari data yang sudah didapat untuk

memperoleh karakteristik dari masing-masing spesimen. Pengujian yang dimaksud antara lain :

1. Pengujian Ketebalan (*Sketmat Digital*)

Pengujian ini digunakan untuk mengetahui ketebalan lapisan. Pengukuran dilakukan di tiga titik lapisan, yaitu di bagian atas, tengah dan bawah pada sisi depan lapisan.

❖ Mekanisme pengujian *sketmat digital* :

1. Kendurkan baut pengunci dan geser rahang geser, pastikan rahang geser bekerja dengan baik. Serta jangan lupa untuk memeriksa ketika rahang tertutup harus menunjukkan angka nol.
2. Membersihkan permukaan benda dan permukaan rahang agar tidak ada benda yang menempel yang bisa menyebabkan kesalahan pengukuran.
3. Menutup rahang sampai mengagap benda yang diukur. Pastikan posisi benda sesuai dengan pengukuran yang ingin diambil. Kemudian tinggal membaca ketebalan dari spesimen.

2. *Surface Roughness Test*

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui nilai kekasaran permukaan sampel yang telah *dicoating*. Pengujian ini menggunakan 8 sampel dengan ukuran 1.5 cm x 1.5 cm. 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.

3. Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Pengujian *Scanning Electron Microscopy* (SEM) menggunakan mesin merek FEI Inspect S-50. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui morfologi permukaan dan ketebalan lapisan dari penampang substrat VCL 140 setelah mengalami proses *abrasive grit blasting*, dan kemudian dilapisi *bond coat* serta *top coat*.

❖ 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.

4. 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 panlythical.

❖ Mekanisme Pengamatan XRD :

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

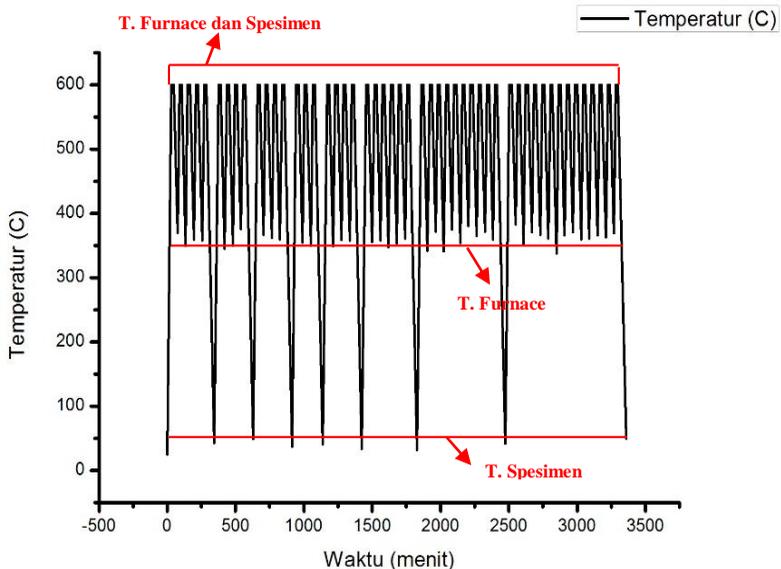
2. Hasil dari tembakan akan dipantulkan menuju *X-Ray detector* untuk dikonversikan dalam bentuk kurva agar dapat dianalisis.

5. Pengujian *Thermal Cycle*

Pengujian *thermal cycle* ini digunakan untuk mengukur massa yang hilang, morfologi permukaan *coating*, dan senyawa yang terbentuk ketika dipanaskan dari temperatur kamar sampai temperatur tertentu yang diinginkan. Analisis ini digunakan untuk mengetahui perilaku dan kestabilan termal dari material. Pengujian *thermal cycle* menggunakan mesin *muffle furnace* dengan *heating rate* sekitar 30°C/menit dan temperatur pemanasannya dari 25 - 600°C dalam keadaan *vacum*.

❖ Mekanisme pengujian *thermal cycle* :

1. Spesimen yang telah disiapkan ditimbang terlebih dahulu untuk mengetahui massanya menggunakan timbangan digital.
2. Spesimen diletakkan di dalam *muffle furnace* dengan bantuan penopang batu tahan api.
3. Setelah spesimen dimasukkan, program harus diaktifkan dan diatur dari temperatur 25 – 600°C.
4. Setelah mencapai temperatur 600°C, spesimen di*holding* dengan waktu penahanan sekitar 15 menit.
5. Spesimen dikeluarkan dari *muffle furnace* untuk proses pendinginan secara *normalizing* sampai temperatur kamar selama 30 menit.
6. Pengujian *thermal cycle* membutuhkan waktu sekitar 1 jam tiap *cycle*, dengan rincian waktu pemanasan 15 menit, waktu penahanan 15 menit serta waktu pendinginan 30 menit.
7. Untuk mempermudah pengujian *thermal cycle*, jumlah *cycle* dibagi menjadi beberapa bagian diantaranya 17 cycle, 34 cycle dan 50 cycle.



Gambar 3.20 Kurva Pengujian *Thermal Cycle*

Gambar 3.20 merupakan kurva pengujian *thermal cycle* dimana berisi data historis temperatur selama pengujian *thermal cycle* dari 0 cycle sampai 50 cycle. Data tersebut menunjukkan temperatur yang digunakan terdiri dari *room temperature* (25 – 50°C), *medium temperature* (340 – 380°C) dan *high temperature* (600°C). *Room temperature* merupakan temperatur awal dari spesimen untuk mendapatkan proses pemanasan sampai temperatur 600°C. *Medium temperature* merupakan temperatur awal dari *furnace* yang kemudian diatur lagi untuk pemanasan sampai 600°C. Dan *high temperature* merupakan target temperatur dari spesimen dan *furnace* untuk proses perlakuan *thermal cycle*. Dari data tersebut menunjukkan bahwa total waktu yang dibutuhkan sampai 50 cycle yaitu 3360 menit atau 56 jam. Sehingga waktu yang dibutuhkan untuk setiap *cyclenya* sekitar 67 menit.

6. 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 specimen, 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.

7. Pengujian *Microhardness Vickers*

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui distribusi kekerasan fasa pada lapisan *coating* dengan kondisi sebelum dan setelah perlakuan *thermal cycle*. Berikut prosedur pengujiannya :

1. Meletakkan sampel (material) pada landasan yang telah tersedia.
2. Mikroskop difokuskan melalui pengatur kasar.
3. Area peninjauan 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.

8. Pengujian Metalografi

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui perubahan struktur mikro dan fasa pada spesimen sebelum (*as-received coating*) dan setelah perlakuan *thermal cycle*. Berikut prosedur pengujiannya :

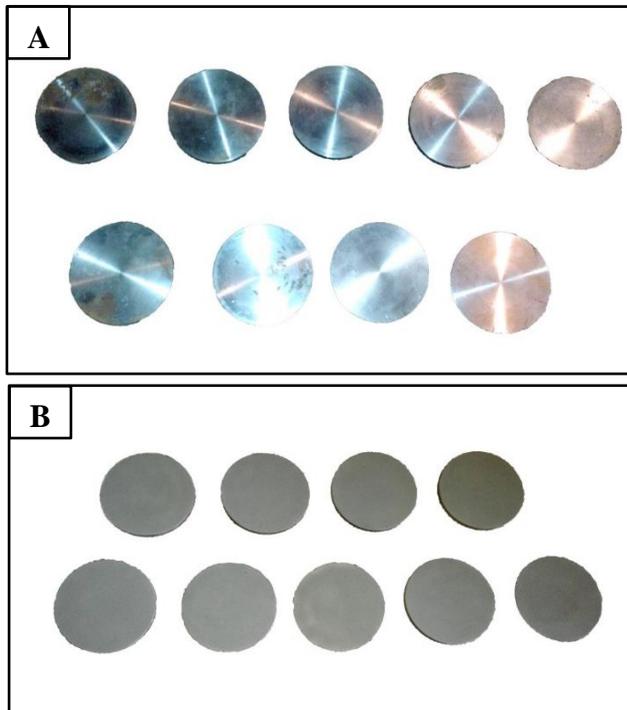
1. Melakukan proses *grinding* terhadap spesimen menggunakan kertas amplas *grade* 2000 dan 5000.
2. Melakukan proses *polishing* terhadap spesimen menggunakan mesin *polishing* dengan autosol.
3. Melakukan proses etsa menggunakan larutan gliseria (4 ml HNO_3 , 6 ml gliserol dan 6 ml HCL), dengan metode *immerse* selama 5 detik.
4. Meletakkan spesimen pada landasan preparat.
5. Mengatur lensa objektif dari perbesaran 5x.
6. Memfokuskan gambar struktur mikro yang akan diambil menggunakan pengatur fokus.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 PREPARASI SAMPEL DAN KARAKTERISASI HASIL PELAPISAN

Proses pelapisan dengan *wire arc spray* terlebih dahulu dilakukan proses preparasi permukaan substrat yaitu dengan metode *abrasive grit blasting* untuk membersihkan permukaan substrat dari pengotor seperti karat, cat serta meningkatkan kekasaran permukaan substrat dengan menggunakan *aluminium oxide 24 mesh*.



Gambar 4.1 Permukaan VCL 140 (a) Sebelum (b) Setelah *Abrasive Grit Blasting*

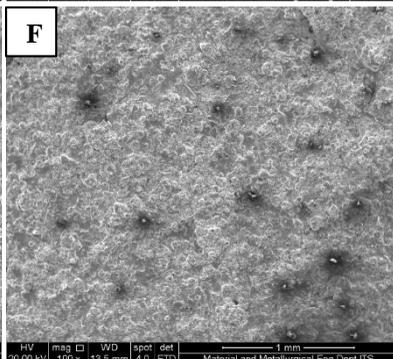
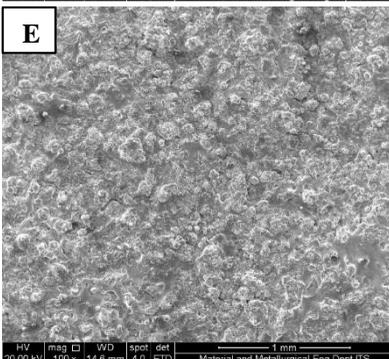
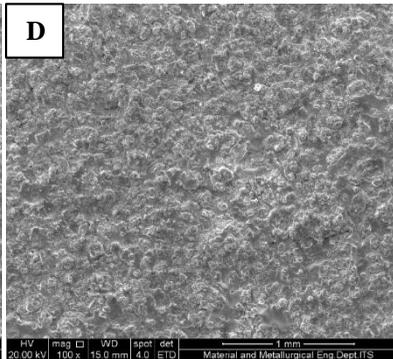
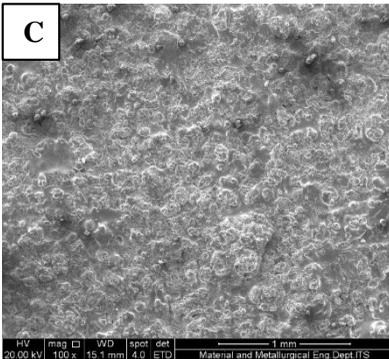
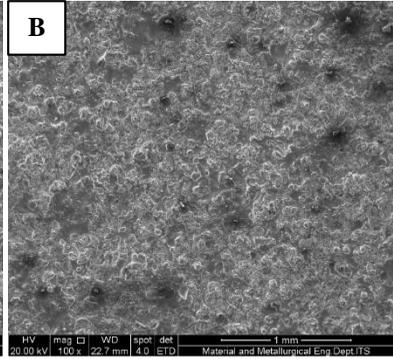
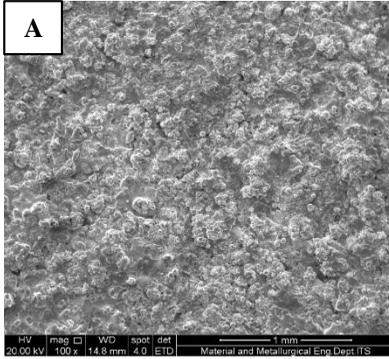
Gambar 4.1 menunjukkan hasil proses *abrasive grit blasting* memiliki warna abu-abu. Permukaan spesimen yang telah dilakukan *abrasive grit blasting* memiliki bentuk yang lebih kasar. Semakin kasar permukaan mengakibatkan ikatan *mechanical interlocking* yang terbentuk semakin meningkat (Pawlowski, 2008).

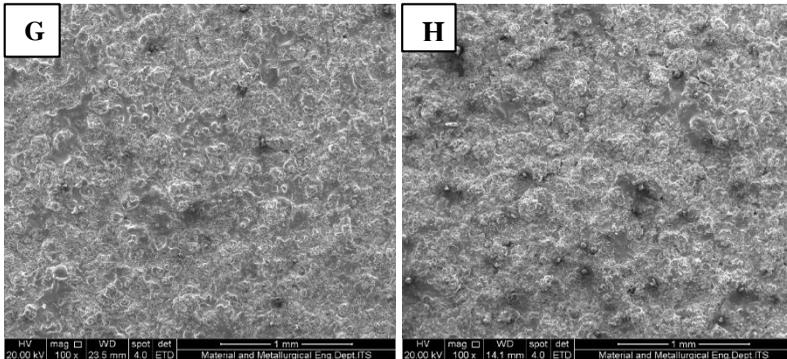
Hasil pengujian kekasaran permukaan dilakukan pada permukaan material substrat yaitu VCL 140 sebelum dan sesudah proses *abrasive grit blasting* adalah 2,34 μm , sedangkan setelah dilakukan proses *abrasive grit blasting* adalah 5,96 μm . Hal ini menunjukkan bahwa setelah melakukan *abrasive grit blasting* nilai kekasaran dari permukaan substrat meningkat. Nilai tersebut merupakan kekasaran yang ideal karena dapat meningkatkan sifat adhesif lapisan *coating* dengan bidang kontak yang besar dan terjadinya *mechanical interlock* (Chaitanya, 2007). Namun kekasaran permukaan yang terlalu tinggi tidak disarankan untuk metode *wire arc spray* karena bisa menimbulkan celah dasar *grit blasting* substratnya.

Setelah melakukan proses *abrasive grit blasting*, dilanjutkan dengan proses pelapisan NiAl sebagai *bond coat* menggunakan parameter tekanan gas sebesar 4 bar dan jarak *nozzle* sejauh 200 mm. Setelah itu dilakukan proses pelapisan FeCrBMnSi sebagai *top coat* menggunakan variasi tekanan gas dan jarak *nozzle*. Jarak *nozzle* dan tekanan gas yang digunakan adalah 100 mm ; 3 bar (100;3), 100 mm ; 4 bar (100;4), 200 mm ; 3 bar (200;3), 200 mm ; 4 bar (200;4), 300 mm ; 3 bar (300;3), 300 mm; 4 bar (300;4), 400 mm ; 3 bar (400;3), dan 400 mm ; 4 bar (400;4).

4.1.1 Hasil Pengamatan Makro Permukaan *Coating*

Pengamatan makro terhadap permukaan hasil *coating* FeCrBMnSi dilakukan dengan pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) perbesaran 100x. Spesimen yang diamati terdiri dari variasi 100 mm; 3 bar, 100 mm; 4 bar, 200 mm; 3 bar, 200 mm; 4 bar, 300 mm; 3 bar, 300 mm; 4 bar, 400 mm; 3 bar, dan 400 mm; 4 bar.





Gambar 4.2 Permukaan Spesimen *Coating* Perbesaran 100x dengan Variasi (a) 100;3 (b) 100;4 (c) 200;3 (d) 200;4 (e) 300;3 (f) 300;4 (g) 400;3 (h) 400;4

Hasil *Scanning Electron Microscope* (SEM) dengan perbesaran 100x pada permukaan hasil *coating* digunakan untuk mengetahui kekasaran pada masing-masing permukaan dengan variasi 100 mm; 3 bar, 100 mm; 4 bar, 200 mm; 3 bar, 200 mm; 4 bar, 300 mm; 3 bar, 300 mm; 4 bar, 400 mm; 3 bar, dan 400 mm; 4 bar. Gambar 4.2 merupakan permukaan material hasil *coating* dengan variasi tekanan gas dan jarak *nozzle*.

Pada Gambar 4.2 (a) dan (b) merupakan sampel dengan variasi 100 mm; 3 bar dan 100 mm 4 bar. Kedua sampel jarak *spraying* sama dan sangat dekat antara *nozzle* dan permukaan substrat. Hasilnya permukaan *coating* terlihat sangat kasar yang ditandai dengan adanya partikel-partikel kasar (*coarse grain*) dan bergerombol di beberapa lokasi akibat dari proses solidifikasi yang tidak sempurna. Sedangkan perbedaan kedua sampel tersebut yaitu distribusi kekasaran permukaan yang dihasilkan terutama pada Gambar 4.2 (b) tidak merata. Hal ini disebabkan adanya beberapa partikel yang sudah melebur dengan baik.

Pada Gambar 4.2 (c) dan (d) memperlihatkan kondisi yang lebih baik dari Gambar (a) dan (b). Terlihat beberapa partikel yang sudah mengalami solidifikasi dan membentuk ikatan antar partikel

dengan baik. Untuk perbedaan kedua gambar tersebut yaitu distribusi partikel yang meleleh terlihat lebih merata.

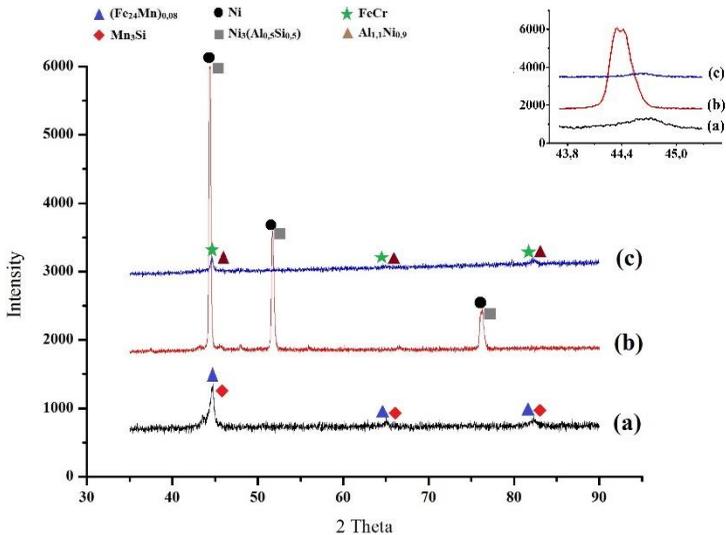
Pada Gambar 4.2 (e) dan (f) memperlihatkan hasil permukaan *coating* yang lebih baik dari kondisi sebelumnya. Terlihat distribusi partikel yang sudah melebur mulai merata di seluruh permukaan. Tetapi dengan kondisi meningkatnya tekanan gas menghasilkan partikel-partikel yang lebih halus (*fine grain*), sehingga tingkat kekasaran permukaan hasil *coating* pun menurun.

Sedangkan pada Gambar 4.2 (g) dan (h) memperlihatkan hasil *coating* yang paling maksimal dari kondisi sebelumnya. Distribusi partikel-partikel halus pun mulai merata di seluruh permukaan, sehingga terlihat profil permukaan yang lebih rata dan halus. Pada Gambar (h) terlihat perbedaan hasil yang sedikit lebih baik dari Gambar (g) terutama partikel-partikel yang terbentuk lebih halus.

Dengan demikian pada kondisi dengan jarak *spraying* yang digunakan semakin jauh, menyebabkan kekasaran permukaan pada hasil *coating* semakin menurun. Sebab, semakin jauh jarak *spraying* semakin sedikit pula partikel-partikel material *coating* disemprotkan (*droplet*) yang mencapai permukaan substrat. Sedangkan dengan kondisi meningkatnya tekanan gas yang digunakan, menghasilkan permukaan hasil *coating* yang lebih halus dan rata. Sebab, kecepatan *impact droplet* pada saat mencapai permukaan substrat semakin meningkat. Hal ini dapat menghasilkan ikatan antar partikel lebih baik serta rongga yang terbentuk pun semakin sedikit (Wang, 1999).

4.1.2 Hasil Pengujian Difraksi Sinar X

Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan untuk mengetahui senyawa yang terbentuk pada substrat VCL 140, hasil *bond coat* dan *as-received coating* (spesimen uji setelah proses *coating*). Hasil pengujian XRD terhadap ketiga spesimen tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Hasil XRD (a) Spesimen VCL 140, (b) *Bond Coat* dan (c) *As-Received Coating*

Gambar 4.3 merupakan hasil pengujian XRD terhadap spesimen substrat VCL 140, hasil *bond coat* dan *as-received coating*. Pada material substrat menunjukkan pola XRD yang mempunyai tiga puncak difraksi pada $2\theta = 44,7416^\circ$; $65,0810^\circ$ dan $82,4353^\circ$, yang mengindikasikan terbentuknya fasa kristalin diantaranya terdapat senyawa paduan $(\text{Fe}_{24}\text{Mn})_{0,08}$ dan Mn_3Si . Berdasarkan Tabel 3.2, material substrat VCL 140 terdiri dari unsur mayoritas yaitu Fe dimana mampu membentuk paduan Fe. Tetapi pada saat proses produksi material tersebut kemungkinan besar terbentuk senyawa paduan lain dan terbukti dengan hasil pengujian XRD ini, yaitu terbentuk senyawa paduan $(\text{Fe}_{24}\text{Mn})_{0,08}$ dan Mn_3Si . Senyawa paduan $(\text{Fe}_{24}\text{Mn})_{0,08}$ atau *ferro manganese* mampu meningkatkan sifat mekanik material dan ketahanan korosi (Drynda, 2015). Sebab unsur Mn merupakan unsur yang sengaja ditambahkan untuk memproduksi baja paduan yang mampu meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus (Suherman, 1999). Sedangkan senyawa paduan Mn_3Si merupakan senyawa yang

memberikan pengaruh sifat magnetik terhadap material VCL 140 (Ivanova, 2008). Dengan demikian, dengan adanya kedua senyawa paduan tersebut memberikan keuntungan terutama dalam hal aplikasi pelapisan logam.

Pada pola XRD terhadap spesimen hasil *bond coat* menunjukkan bahwa terdapat 3 puncak difraksi pada $2\theta = 44,3145^\circ$; $44,4449^\circ$; $51,6314^\circ$; $51,8247^\circ$; $76,0573^\circ$ dan $76,3296^\circ$, yang mengindikasikan terbentuknya fasa kristalin diantaranya terdapat senyawa paduan Ni dan $Ni_3(Al_{0,5}Si_{0,5})$. Berdasarkan Tabel 3.6, senyawa paduan Ni merupakan unsur mayoritas material *bond coat* dengan komposisi 95%. Dengan adanya Ni, material tersebut mempunyai kekuatan dan ketahanan korosi pada temperatur tinggi (Suherman, 1999). Sedangkan senyawa paduan $Ni_3(Al_{0,5}Si_{0,5})$ merupakan senyawa paduan hasil reaksi antara unsur Ni dan Al yang membentuk senyawa *nickel aluminide*. Senyawa tersebut mampu meningkatkan kekuatan adhesi antara material substrat dan *coating* (Chaitanya, 2007). Terbukti dengan data pengujian *pull off bonding* antara spesimen *coating* tanpa *bond coat* dengan spesimen *full system* ditampilkan pada Gambar 4.10.

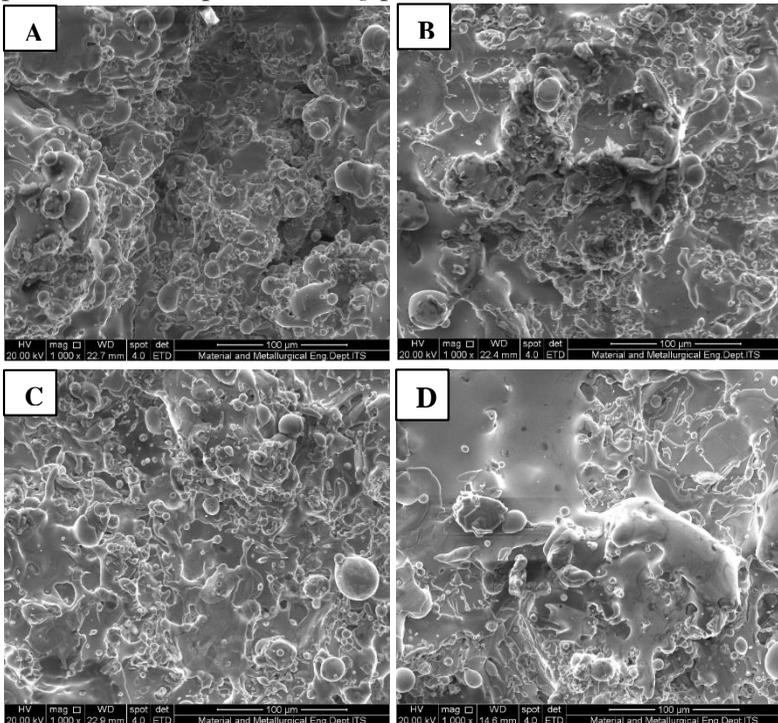
Sedangkan pada Pola XRD material *as-received coating* menunjukkan bahwa adanya puncak difraksi pada $2\theta = 44,6492^\circ$; $64,921^\circ$ dan $82,3322^\circ$, yang mengindikasikan adanya senyawa paduan FeCr, dan $Al_{1,1}Ni_{0,9}$. Berdasarkan Tabel 3.7, Fe merupakan unsur mayoritas yang terkandung dalam material *coating* sebesar 64%. Sedangkan unsur Cr mempunyai komposisi sebesar 29%. Kedua unsur tersebut bereaksi dan membentuk senyawa paduan FeCr atau disebut juga sebagai fasa intermetalik. Fasa intermetalik Fe-Cr tidak memiliki kekerasan yang cukup tinggi, namun berpengaruh terhadap ketangguhan lapisan *coating*, sehingga tidak mudah terkelupas saat menerima beban kejut (Yuping Wu, dkk, 2006). Sedangkan pada hasil XRD *as-received coating* terbentuk senyawa paduan $Al_{1,1}Ni_{0,9}$. Hal ini menandakan bahwa senyawa paduan yang terbentuk pada material *bond coat* dan *as-received coating* mengalami proses difusi dan berikatan dengan baik, sehingga meningkatkan kekuatan adhesi antara material *bond coat*

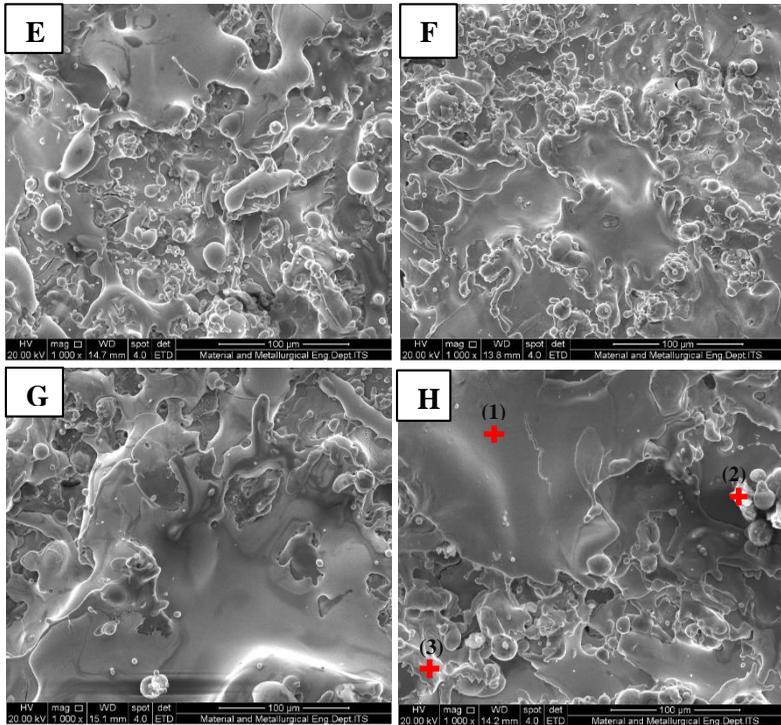
dan *as-received coating*. Data pengujian kekuatan adhesi atau *pull off bonding* ditampilkan pada Gambar 4.10.

4.1.3 Hasil Pengujian Mikroskop Elektron SEM

a. Morfologi Permukaan Hasil *Coating*

Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) dilakukan untuk mengetahui morfologi suatu material. Pada penelitian ini pengujian SEM digunakan untuk mendapatkan morfologi permukaan hasil proses *coating* pada Gambar 4.4.





Keterangan	Fe (%)	Cr (%)	Mn (%)	Si (%)	O (%)	C (%)
(1) Melt	67,66	31,18	0,40	0,76	-	-
(2) Unmelt	60,02	22,96	1,33	1,95	5,21	8,53
(3) Sebagian melt	67,33	31,22	1,44	-	-	-

Gambar 4.4 Permukaan Spesimen *Coating* Perbesaran 1000x dengan Variasi (a) 100;3 (b) 100;4 (c) 200;3 (d) 200;4 (e) 300;3 (f) 300;4 (g) 400;3 (h) 400;4

Berdasarkan hasil uji *Scanning Electron Microscope* (SEM) pada Gambar 4.4 terlihat morfologi permukaan hasil sampel *coating* dengan perbesaran 1000x dengan variasi 100 mm; 3 bar,

100 mm; 4 bar, 200 mm; 3 bar, 200 mm; 4 bar, 300 mm; 3 bar, 300mm ; 4 bar, 400 mm; 3 bar dan 400 mm; 4 bar.

Pada Gambar 4.4 (a) dan (b) merupakan sampel dengan variasi 100 mm; 3 bar dan 100 mm 4 bar. Kedua sampel jarak *spraying* sama dan sangat dekat antara *nozzle* dan permukaan substrat. Gambar 4.4 (a) permukaan *coating* terdapat partikel-partikel kasar (*coarse grain*) dan bergerombol akibat dari proses solidifikasi yang tidak sempurna (*unmelt*). Selain itu juga terlihat morfologi tinggi rendahnya bagian yang terbentuk dari rongga-rongga partikel. Sedangkan pada Gambar 4.4 (b) dengan kondisi meningkatnya tekanan gas menunjukkan beberapa partikel mengalami peleburan dengan baik. Ikatan antar partikel juga terbentuk dengan baik di beberapa bagian permukaan, sehingga menghasilkan butiran-butiran partikel yang halus (*fine grain*).

Pada Gambar 4.4 (c) dan (d) merupakan sampel dengan variasi 200 mm; 3 bar dan 200 mm; 4 bar. Keduanya memperlihatkan kondisi yang lebih baik dari Gambar (a) dan (b). Meskipun masih ada beberapa partikel *unmelt* di beberapa lokasi. Tetapi pada permukaan tersebut sudah tidak terdapat bagian yang mempunyai perbedaan ketinggian akibat adanya rongga antar partikel. Partikel yang sudah mulai melebur dengan baik telah tersebar cukup merata di beberapa bagian permukaan. Sedangkan Gambar 4.4 (d) terlihat ikatan antar partikel yang melebur jauh lebih baik dan homogen di beberapa lokasi.

Gambar 4.4 (e) dan (f) merupakan sampel dengan variasi 300 mm; 3 bar dan 300 mm; 4 bar. Keduanya memperlihatkan hasil permukaan *coating* yang lebih baik dari kondisi sebelumnya. Terlihat distribusi partikel yang sudah melebur mulai merata di seluruh permukaan. Tetapi dengan kondisi meningkatnya tekanan gas pada Gambar 4.4 (f) menghasilkan partikel-partikel yang lebih halus (*fine grain*) dan rata, sehingga tingkat kekasaran permukaan hasil *coating* pun menurun.

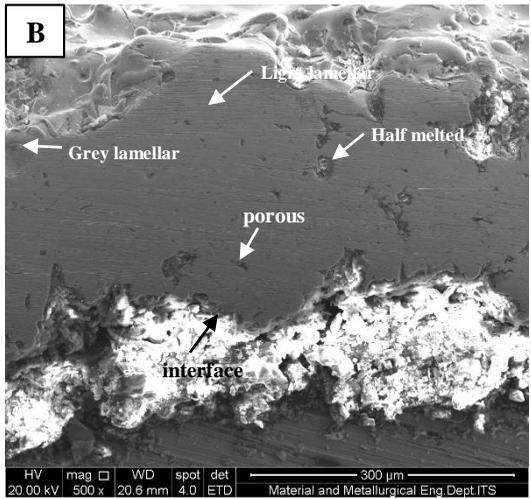
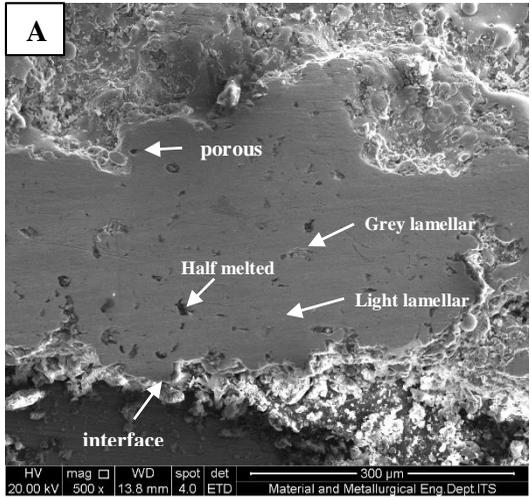
Gambar 4.4 (g) dan (h) merupakan sampel dengan variasi 400 mm; 3 bar dan 400 mm; 4 bar. Keduanya memperlihatkan hasil *coating* yang paling maksimal dari kondisi sebelumnya. Partikel-

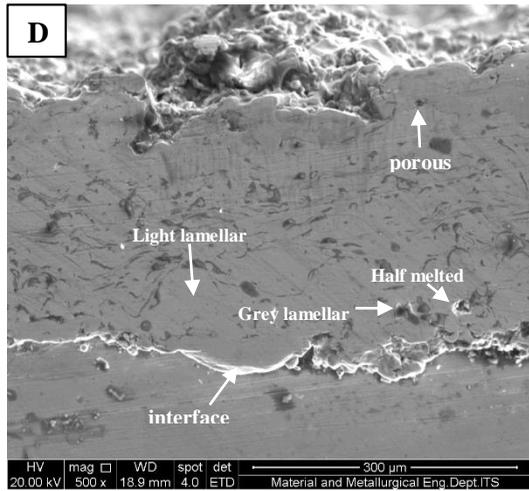
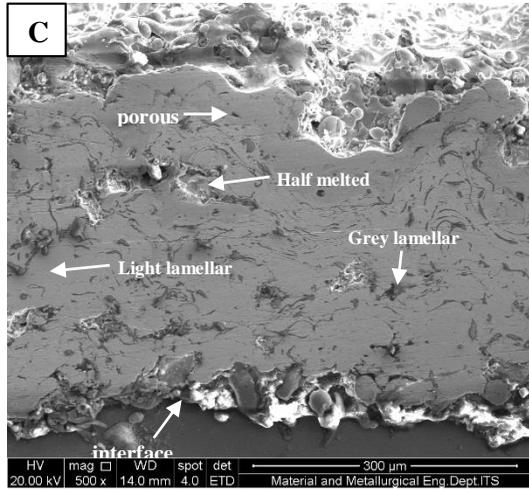
partikel yang sudah melebur dengan baik dan homogen telah tersebar secara merata hampir di seluruh bagian permukaan. Ikatan antar partikel pun terlihat lebih kuat dan tercampur dengan baik. Sedangkan pada Gambar (h) terlihat ada satu gerombolan partikel *unmelt*. Hal ini disebabkan karena ada beberapa partikel yang telah tersolidifikasi sebelum mencapai permukaan substrat akibat jarak spraying yang digunakan terlalu jauh.

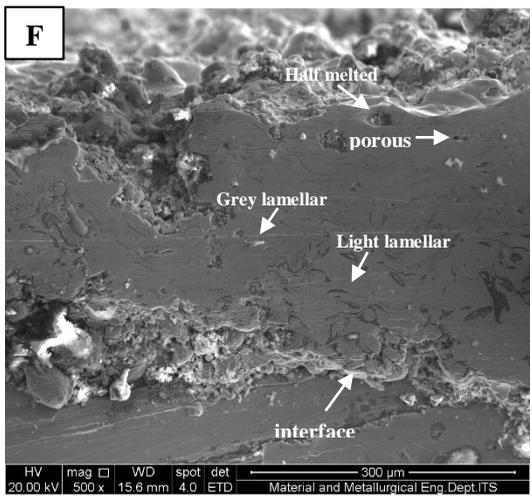
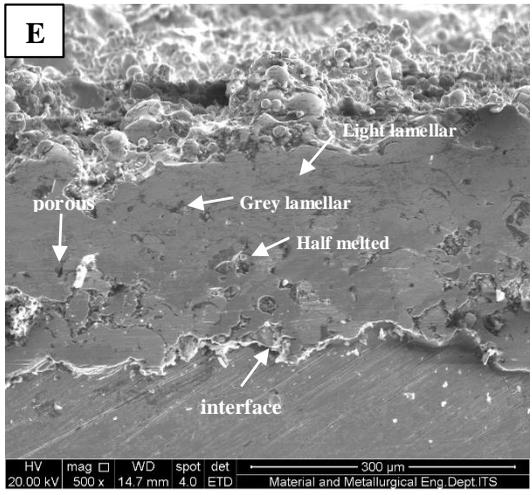
Dengan demikian, semakin dekat jarak *nozzle* yang digunakan menghasilkan permukaan yang kurang rata dan halus. Hal ini disebabkan karena partikel-partikel belum meleleh secara sempurna, sehingga ketika mencapai permukaan substrat bentuk partikel tersebut masih bulat. Bulatnya bentuk partikel bisa menghasilkan rongga pada permukaan hasil *coating* sehingga nilai kekasaran dan porositasnya akan semakin besar (Sarikaya, 2005). Sedangkan dengan meningkatnya tekanan gas yang digunakan maka partikel-partikel yang terdapat di permukaan substrat mampu meleleh secara sempurna menghasilkan *coating* yang lebih baik. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya kecepatan *impact* dari lelehan partikel yang lebih kecil ke permukaan substrat seiring dengan meningkatnya tekanan gas yang digunakan. Sehingga mampu meminimalisir rongga yang terbentuk antara partikel-partikel tersebut (Wang, 1999).

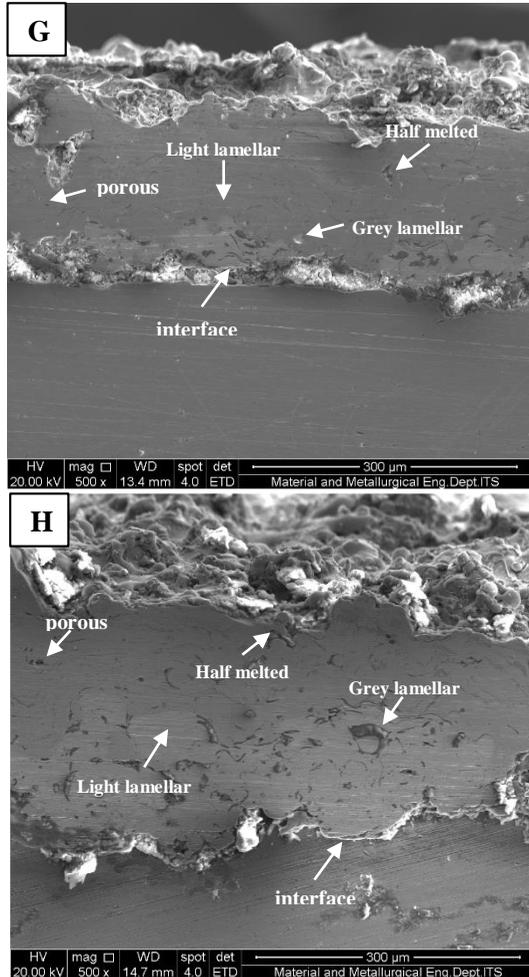
b. Morfologi Penampang Lintang antara Lapisan *Coating* dan Substrat

Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) dilakukan untuk mengetahui morfologi penampang lintang (*cross section*) yang terbentuk antara lapisan *coating* dan substrat. Selain itu juga untuk mengamati dan menganalisis porositas yang terbentuk pada bagian hasil *coating*. Kedua hasil tersebut terlihat pada Gambar 4.5









Gambar 4.5 Bagian *Cross Section* Spesimen *Coating* Perbesaran 500x dengan Variasi (a) 100;3 (b) 100;4 (c) 200;3 (d) 200;4 (e) 300;3 (f) 300;4 (g) 400;3 (h) 400;4

Berdasarkan hasil pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) pada Gambar 4.5 terlihat morfologi hasil coating pada bagian *cross section* dengan perbesaran 500x variasi 100 mm; 3

bar, 100 mm; 4 bar, 200 mm; 3 bar, 200 mm; 4 bar, 300 mm; 3 bar, 300mm ; 4 bar, 400 mm; 3 bar dan 400 mm; 4 bar. Dapat dilihat beberapa porositas dan *interface* yang terbentuk antara hasil *coating* dan substrat. Pada proses *thermal spray* terdapat beberapa penyebab terbentuknya porositas. (1) Terdapat oksigen yang terjebak pada lapisan *coating* dikarenakan jarak *spraying* yang terlalu jauh, menyebabkan oksida terbentuk secara prematur sebelum mencapai permukaan substrat, menyebabkan terbentuknya material *unmelt* dan cenderung diikuti dengan adanya porositas. (2) Tumpukkan *lamellar* tipis yang menyusun *coating* pada setiap ujung dari *droplet* yang tipis membuat terbentuknya porositas (Pawlowski, 2008).

Sedangkan bagian *interface* yang terbentuk terlihat tidak rata. Hal ini disebabkan adanya material *coating* yang meleleh sampai ke bagian samping substrat pada saat proses pelapisan. Fasa *light lamellar* pada hasil *coating* FeCrBMnSi merupakan lapisan yang kaya unsur Fe dan memiliki sebaran unsur B, Mn, dan Si sebagai *precipitate*, *self fluxing* dan *deoxidator*. Fasa *grey lamellar* merupakan oksida yang terbentuk selama proses *spraying*. Dan *half melting* terbentuk karena temperatur *droplet* yang lebih tinggi daripada temperatur panas yang masuk ke *droplet* tersebut, dan tidak sepenuhnya mencair dengan sempurna sehingga menjadi *half melted* (Fu Bin, 2009).

Pada Gambar 4.5 (a) dan (b) merupakan sampel bagian cross section dengan variasi 100 mm; 3 bar dan 100 mm 4 bar. Kedua sampel jarak *spraying* sama dan sangat dekat antara *nozzle* dan permukaan substrat. Gambar 4.5 (a) terlihat terdapat porositas berupa lubang-lubang kecil yang terbentuk antara partikel-partikel yang tersolidifikasi. Selain itu lapisan *coating* yang terbentuk cukup tebal sekitar 526,53 μm berdasarkan hasil pengukuran dalam pengujian SEM. Sedangkan pada Gambar 4.5 (b) mempunyai ketebalan lapisan *coating* yang terbentuk sebesar 536,23 μm lebih tinggi daripada Gambar 4.5 (a).

Pada Gambar 4.5 (c) dan (d) merupakan sampel dengan variasi 200 mm; 3 bar dan 200 mm; 4 bar. Keduanya terdapat fasa

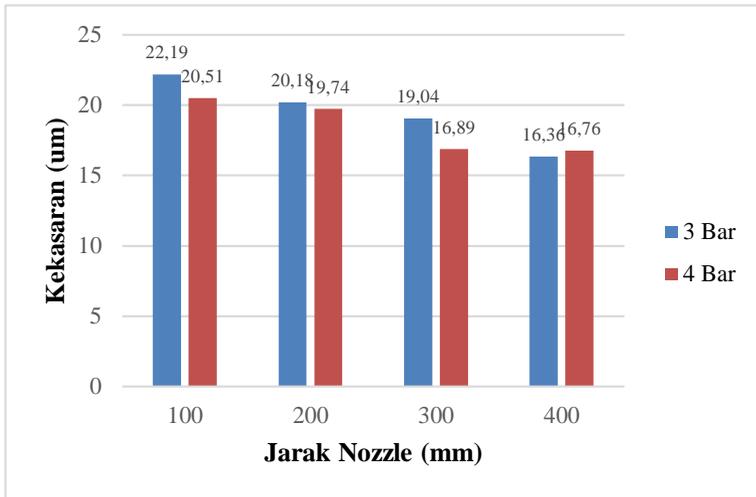
grey lamellar yang cukup banyak daripada kondisi sebelumnya. Berdasarkan pengukuran ketinggian lapisan *coating* yang terbentuk Gambar 4.5 (c) sebesar 365,23 μm sedangkan Gambar 4.5 (d) sebesar 384,67 μm .

Pada Gambar 4.5 (e) dan (f) merupakan sampel dengan variasi 300 mm; 3 bar dan 300 mm; 4 bar. Keduanya terdapat fasa *half melted* yang terbentuk dari partikel-partikel *coating*, terutama pada Gambar 4.5 (e). Hasil pengukuran ketinggian lapisan *coating* yang terbentuk Gambar 4.5 (e) sebesar 328,5 μm sedangkan Gambar 4.5 (f) sebesar 332,23 μm .

Gambar 4.5 (g) dan (h) merupakan sampel dengan variasi 400 mm; 3 bar dan 400 mm; 4 bar. Keduanya memperlihatkan hasil *coating* yang lebih baik dari kondisi sebelumnya. Gambar 4.5 (g) terlihat porositas yang terbentuk sangat sedikit serta ketinggian lapisan *coating* sebesar 240,9 μm . Sedangkan pada Gambar 4.5 (h) terdapat fasa *grey lamellar* yang lebih banyak daripada Gambar 4.5 (g) serta ketinggian lapisan *coating* sebesar 318,67 μm . Berdasarkan data tersebut semakin besar jarak *nozzle* dan tekanan gas yang digunakan memperkecil ukuran *splat* serta meningkatkan kecepatan *impact* ke permukaan substrat. Sehingga rongga yang terbentuk antar partikel semakin kecil (Daengmool, 2006).

4.2 PENGUJIAN KEKASARAN PERMUKAAN COATING

Pengujian kekasaran permukaan ditujukan untuk mengetahui nilai kekasaran permukaan hasil coating. Pengujian ini menggunakan alat uji *surface roughness tester* SJ-301 user's manual Mitutoyu dengan standard JIS20 (dalam satuan mikro meter).



Gambar 4.6 Grafik Kekasaran Permukaan

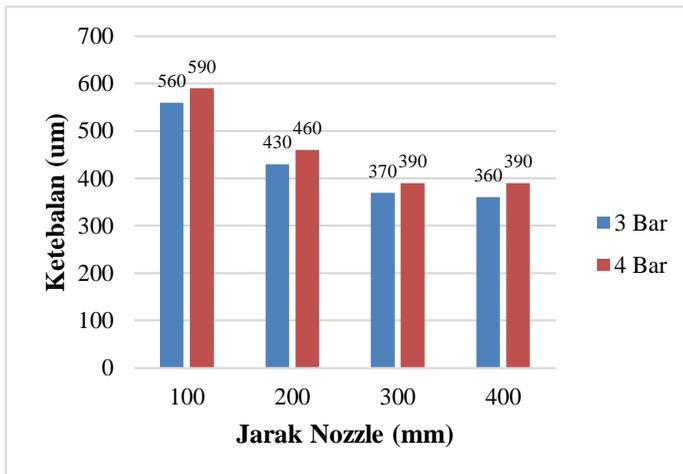
Gambar 4.6 menunjukkan kekasaran permukaan pada hasil *coating* dengan jarak *nozzle* 400 mm; 3 bar memiliki nilai kekasaran permukaan paling kecil yaitu 16,36 μm . Sedangkan nilai kekasaran permukaan paling besar dimiliki permukaan hasil *coating* dengan jarak *nozzle* 100 mm dan tekanan gas 3 bar yaitu sebesar 22,19 μm . Dari hasil yang ada dengan meningkatnya tekanan gas pada proses *wire arc spray* menurunkan kekasaran permukaan hasil *coating*. Dengan meningkatnya tekanan gas pada proses *wire arc spray* mempercepat kecepatan *impact* dari lelehan partikelnya yang lebih kecil ke substrat. Sehingga menyebabkan partikel-partikel tersebut melebur secara sempurna dan rongga yang terbentuk antar partikel menjadi sedikit (Wang, 1999).

Selain itu meningkatnya kekasaran permukaan pada lapisan *coating* juga disebabkan oleh adanya beberapa partikel yang belum meleleh secara sempurna sehingga pada saat mencapai permukaan substrat bentuk partikelnya bulat. Bentuk partikel seperti inilah yang meningkatkan kekasaran permukaan hasil *coating* (Sarikaya, 2005). Bentuk partikel yang bulat atau partikel *unmelt* juga terlihat

pada Gambar 4.4 dimana terdapat oksida yang muncul. Hal ini disebabkan pada saat proses *spraying* dilakukan di ruang terbuka, sehingga sangat memungkinkan oksida masuk ke dalam partikel-partikel *coating* tersebut. Dengan adanya oksida tersebut menyebabkan partikel *coating* tidak dapat melebur secara sempurna. Sehingga membentuk partikel-partikel bulat setelah mengalami solidifikasi.

4.3 PENGUJIAN KETEBALAN LAPISAN

Data hasil ketebalan *coating* FeCrBMnSi didapatkan dengan melakukan pengukuran ketebalan lapisan dengan menggunakan alat sketmat digital atau jangka sorong digital. Pengukuran dilakukan di tiga titik lapisan FeCrBMnSi, yaitu dibagian atas, tengah dan bawah. Hasil pengukuran ketebalan ditunjukkan oleh Gambar 4.7.

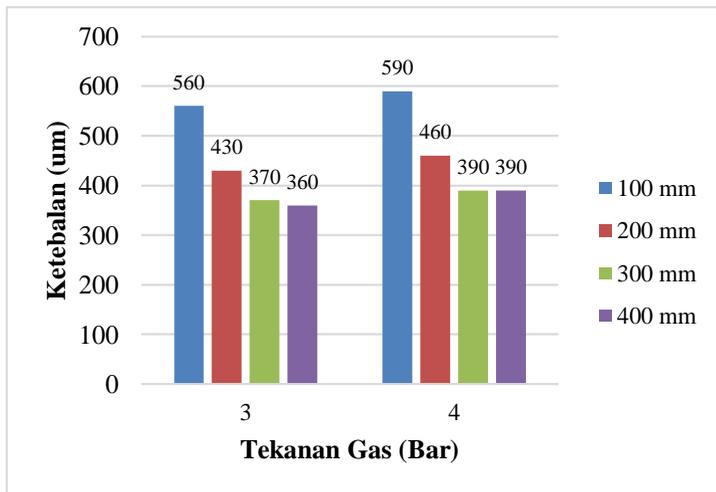


Gambar 4.7 Grafik Pengaruh Jarak *Nozzle* terhadap Ketebalan

Pada Gambar 4.7 merupakan grafik pengaruh jarak *nozzle* terhadap ketebalan *coating* yang dihasilkan. Selisih peningkatan ketebalan hasil *coating* terhadap jarak *nozzle* dengan tekanan gas 3 bar yaitu antara 100 mm dan 200 mm sebesar 130 μm , antara 200

mm dan 300 mm sebesar 60 μm , antara 300 mm dan 400 mm sebesar 10 μm . Sedangkan pada tekanan 4 bar yaitu antara 100 mm dan 200 mm sebesar 130 μm , antara 200 mm dan 300 mm sebesar 70 μm , antara 300 mm dan 400 mm tidak mengalami perubahan. Dari data pengukuran ketebalan tersebut terlihat dengan meningkatnya jarak *nozzle* yang digunakan, maka ketebalan *coating* yang dihasilkan menurun. Hal ini disebabkan semakin jauh jarak *nozzle*, maka banyaknya *droplet* yang mencapai permukaan substrat semakin sedikit karena tidak sampainya *droplet* ke permukaan substrat.

Sedangkan pada Gambar 4.8 memperlihatkan pengaruh tekanan gas terhadap ketebalan *coating* yang dihasilkan.



Gambar 4.8 Grafik Pengaruh Tekanan Gas terhadap Ketebalan

Tabel 4.1 Data Distribusi Ketebalan Lapisan *Coating* Berdasarkan Uji SEM

No	Variasi Sampel	1 (μm)	2 (μm)	3 (μm)	Rata-rata (μm)
1.	100 mm ; 3 bar	489,7	489,6	600,3	526,53

2.	100 mm ; 4 bar	565,4	507,1	536,2	536,23
3.	200 mm ; 3 bar	308,9	373,0	413,8	365,23
4.	200 mm ; 4 bar	256,4	443,0	454,6	384,67
5.	300 mm ; 3 bar	367,6	291,5	326,4	328,5
6.	300 mm ; 4 bar	262,3	425,6	308,9	332,23
7.	400 mm ; 3 bar	204,0	221,5	297,2	240,9
8.	400 mm ; 4 bar	239,0	378,9	338,1	318,67

Setelah kenaikan tekanan gas dari 3 bar menjadi 4 bar terjadi peningkatan ketebalan hasil coating. Pada jarak 100 mm sebesar 30 μm , jarak 200 mm sebesar 30 μm , jarak 300 mm sebesar 20 μm , dan jarak 400 mm sebesar 30 μm . Dari data ketebalan *coating* tersebut, terlihat bahwa seiring bertambahnya tekanan gas yang digunakan meningkatkan ketebalan hasil *coating*.

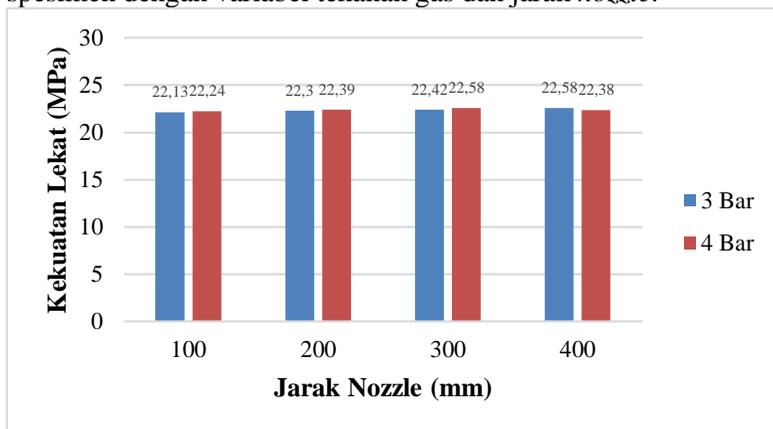
Data pengujian ketebalan lapisan *coating* berkesesuaian dengan Tabel 4.1. Tetapi ada perbedaan nilai ketebalan yang dihasilkan antara pengujian menggunakan sketmat digital dengan pengujian SEM. Data pengujian SEM menunjukkan nilai ketebalan yang lebih kecil daripada pengujian yang menggunakan sketmat digital. Hal ini disebabkan pengukuran ketebalan lapisan menggunakan sketmat digital mengenai bagian permukaan atas partikel yang kasar dan bergelombang. Sedangkan pada pengujian SEM sistem pengukurannya ditujukan langsung ke bagian *coating* yang dihasilkan, sehingga tidak mengenai bagian permukaan atas partikel yang bergelombang.

Dengan demikian semakin tingginya tekanan gas yang digunakan, mampu meningkatkan kecepatan *droplet* sehingga memperbanyak jumlah *droplet* yang mencapai permukaan substrat.

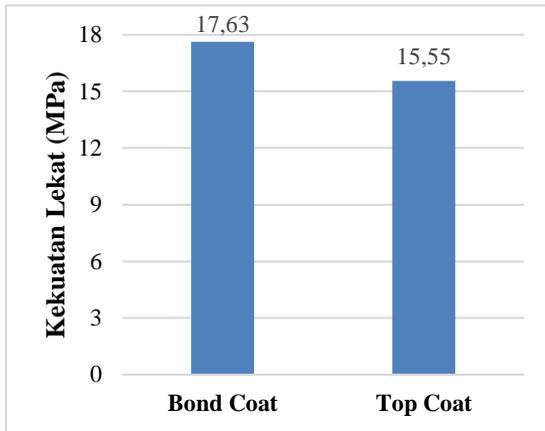
Semakin banyak dan cepatnya *droplet* yang mencapai permukaan substrat maka ketebalan *coating* bertambah (Daengmool, 2006).

4.4 HASIL ANALISIS KEKUATAN LEKAT

Pengujian *pull off bonding* ini bertujuan untuk mengetahui kekuatan lekat antara permukaan *coating* dengan substrat. Pengujian dilakukan dengan menempelkan pin (*dolly*) pada permukaan *coating* yang direkatkan dengan lem *araldite*, kemudian dilakukan penarikan dengan alat uji (pompa hidrolik) hingga pin terlepas dari permukaan *coating* dan menarik sebagian lapisan *coating*. Angka yang terukur (MPa) pada alat uji itulah yang menunjukkan kekuatan lekat lapisan *coating*. Pada Gambar 4.9 menunjukkan hasil kekuatan lekat pada masing-masing spesimen dengan variabel tekanan gas dan jarak *nozzle*.



Gambar 4.9 Grafik *Pull Off Bonding*



Gambar 4.10 Grafik Perbandingan Kekuatan Lekat Spesimen *Bond Coat* dan Tanpa *Bond Coat*

Gambar 4.9 menunjukkan bahwa spesimen yang memiliki kekuatan lekat tertinggi adalah spesimen dengan variasi 300 mm; 4 bar dan 400 mm; 3 bar yaitu 22,58 MPa dan spesimen yang memiliki kekuatan terendah yaitu spesimen dengan jarak 100 mm dan tekanan gas 3 sebesar 22,13 MPa.

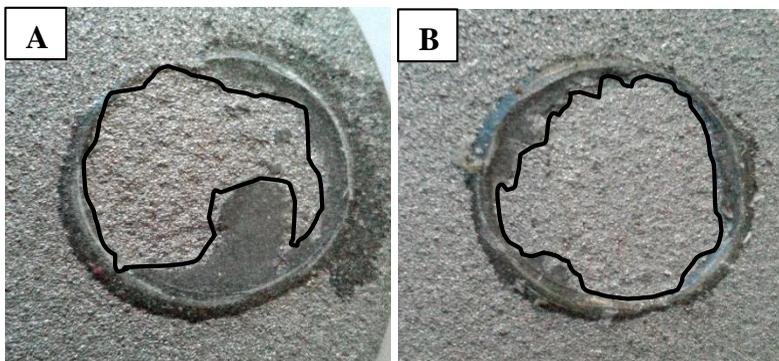
Berdasarkan data (ASM Thermal Spray Society, 2006) menunjukkan bahwa material *coating* 95MXC menggunakan metode *wire arc spray* mempunyai kekuatan lekat sebesar 34,5 – 41,4 MPa dengan kondisi jarak *spraying* sejauh 63,5 – 130 mm dan tekanan atomisasi gas sebesar 4,14 – 5,17 bar. Selain itu data (TAFSA Safety Data Sheet, 2015) menunjukkan spesifikasi material *coating* 95MXC mempunyai kekuatan lekat sebesar 39,82 MPa dengan jarak *spraying* 76 mm dimana ketebalan lapisan *coating* yang dihasilkan sebesar 508 μm . Sedangkan data (ASM Handbook Volume 5, 1994) menunjukkan bahwa metode *wire arc spray* menghasilkan kekuatan lekat sebesar 10 – 30 MPa dengan jarak *spraying* 50 – 250 mm.

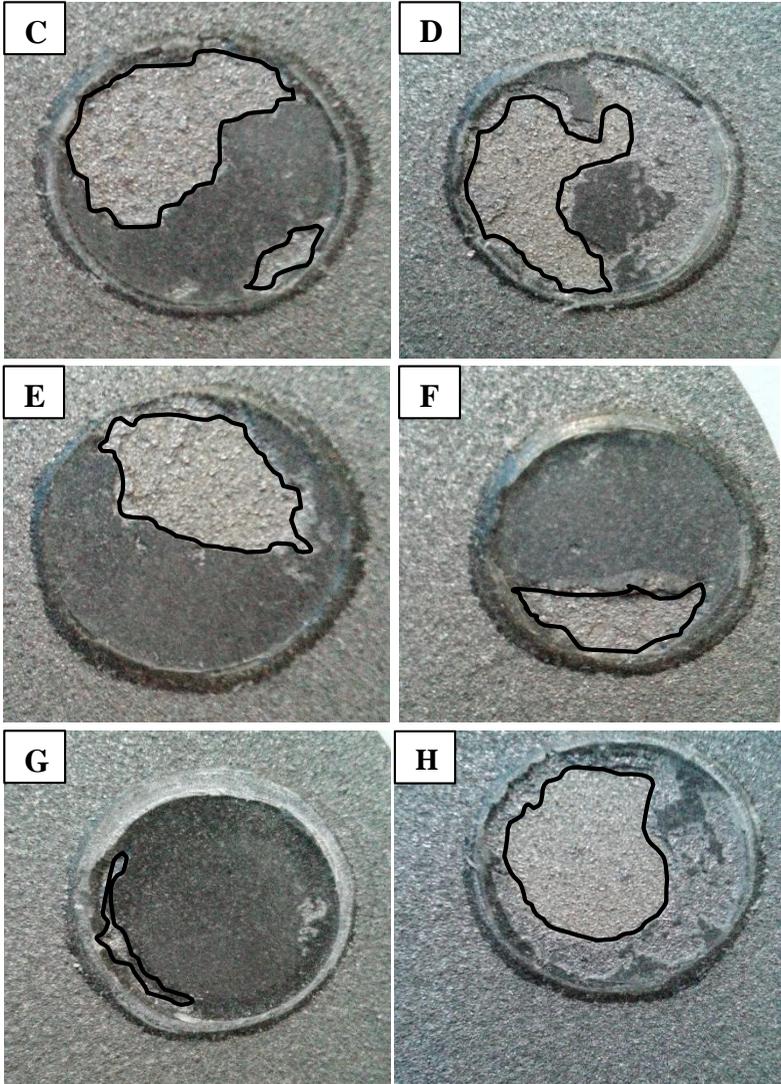
Berdasarkan data pada Gambar 4.9 menunjukkan bahwa spesimen dengan variasi 300 mm; bar dan 400 mm; 3 bar

mempunyai kekuatan lekat paling tinggi sebesar 22,58 MPa. Untuk parameter tekanan gas 3 bar menunjukkan bahwa semakin besar jarak *nozzle* menunjukkan peningkatan nilai kekuatan lekat dan mencapai titik maksimumnya pada variasi 400 mm; 3 bar. Sedangkan parameter tekanan gas 4 bar menunjukkan *trend* yang sama dengan tekanan gas 3 bar. Tetapi terdapat perbedaan yaitu terjadi penurunan kekuatan lekat pada jarak 400 mm, sehingga titik maksimum terdapat pada variasi 300 mm; 4 bar.

Sedangkan pada Gambar 4.10 merupakan perbandingan kekuatan lekat spesimen dengan perlakuan *bond coat* dan tanpa *bond coat*, menunjukkan bahwa terjadi perbedaan kekuatan lekat yang cukup signifikan antara spesimen dengan perlakuan *full system* (*bond coat* dan *top coat*) dan perlakuan tanpa *bond coat*. Spesimen dengan perlakuan *full system* mempunyai kekuatan lekat sekitar 22 MPa, sedangkan spesimen dengan perlakuan tanpa *bond coat* kekuatan lekatnya hanya 15,55 MPa. Sehingga sangat direkomendasikan penggunaan material *bond coat* untuk aplikasi proses pelapisan logam.

Dengan demikian parameter metode *wire arc spray* yang diizinkan dan mampu mencapai titik maksimum yaitu dengan jarak *spraying* 300 mm dan tekanan gas 4 bar. Apabila jarak *spraying* melebihi 300 mm menunjukkan penurunan kekuatan lekat pada lapisan *coating* yang dihasilkan.





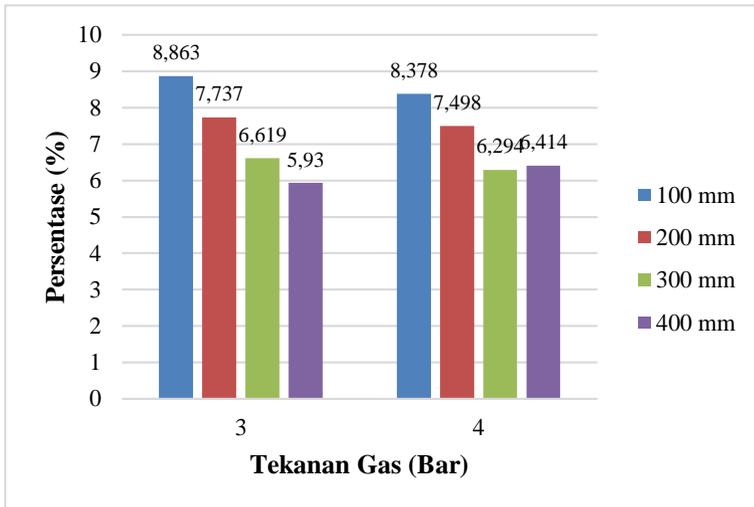
Gambar 4.11 Gambar Hasil Pengujian *Pull Off Bonding* (a) 100;3 (b) 100;4 (c) 200;3 (d) 200;4 (e) 300;3 (f) 300;4 (g) 400;3 (h) 400;4

Gambar 4.11 memperlihatkan hasil pengujian *pull off bonding* pada hasil *coating* FeCrBMnSi. Terlihat bahwa spesimen yang memiliki luas penampang yang tertarik pin lebih sedikit menunjukkan kekuatan lekat tertinggi yaitu spesimen dengan variasi 300 mm; 4 bar dan 400 mm; 3 bar dengan nilai 22,58 MPa. Kekuatan adhesi tersebut diperoleh dari mekanika *interlocking* antara substrat dan hasil *coating*. Ketebalan hasil *coating* berpengaruh terhadap tegangan sisa permukaan dari hasil *coating*. Semakin besarnya tingkat ketebalan hasil *coating* maka tegangan sisa permukaannya juga semakin besar sehingga menurunkan kekuatan adhesinya (Anthunes, 2013).

Dari data tersebut diketahui bahwa pada jarak 100 mm memiliki ukuran ketebalan terbesar pada hasil *coating*, sehingga daya lekatnya pun menurun dibandingkan dengan jarak 200 mm, 300 mm dan 400 mm. Hal ini dikarenakan dengan meningkatnya ketebalan maka menimbulkan tegangan permukaan yang besar antara permukaan substrat dengan hasil *coating*. Selain itu, pada penelitian yang lain dijelaskan bahwa porositas dalam jumlah yang rendah dapat memperbaiki sifat kerapatan *coating* dan menghasilkan ikatan yang baik antara substrat dengan lapisan *coating*. Besarnya tingkat porositas meningkatkan rongga permukaan antara *coating* dengan substrat sehingga menurunkan tingkat kelekatan antara permukaan substrat dengan lapisan *coating* (Fernando, 2013).

4.5 HASIL ANALISIS POROSITAS PADA BAGIAN CROSS SECTION

Analisis mikrostruktur pada bagian *cross section* menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dengan perbesaran 500x. Hal ini bertujuan untuk mengetahui porositas yang terbentuk sebelum mendapatkan perlakuan *thermal cycle*. Nilai persentase porositas dapat diketahui dengan menggunakan *software image J*. Hasil persentase porositas dapat dilihat pada Gambar 4.12.



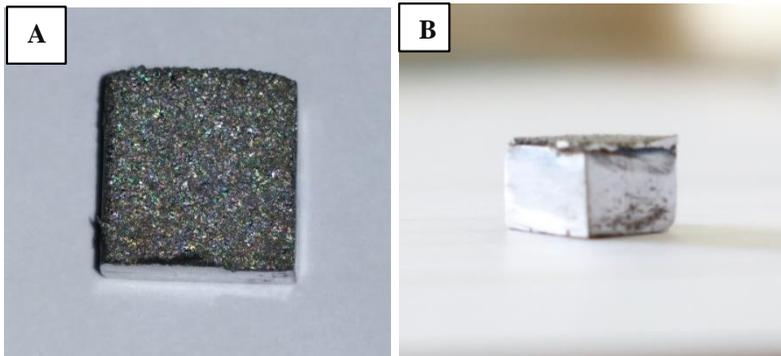
Gambar 4.12 Grafik Persentase Porositas

Pada hasil *coating* dengan perbedaan tekanan gas dan jarak *nozzle* dengan variasi 100 mm; 3 bar terdapat persentase porositas sebesar 8,863%. Persentase porositas pada *cross section* hasil *coating* 100 mm ; 4 bar yaitu sebesar 8,378%. Sedangkan pada 200 mm ; 3 bar porositas sebesar 7,737%, 200 mm ; 4 bar porositas sebesar 7,498%, 300 mm ; 3 porositas sebesar 6,619%, pada 300 mm ; 4 bar porositas sebesar 6,294%, 400 mm ; 3 bar porositas sebesar 5,93% dan pada 400 mm ; 4 bar porositas sebesar 6,414%. Penurunan persentase porositas disini dikarenakan adanya pengaruh dari jarak *nozzle* dan tekanan gas. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Daengmool, 2006) diketahui jarak *nozzle* dan tekanan gas memberikan pengaruh terhadap ukuran *splat*. Semakin besar jarak *nozzle* dan tingginya tekanan gas memperkecil ukuran *splat*. Selain itu dengan 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).

4.6 PERBANDINGAN SEBELUM DAN SETELAH *THERMAL CYCLE*

4.6.1 Hasil Pengamatan Makro Spesimen Sebelum *Thermal Cycle*

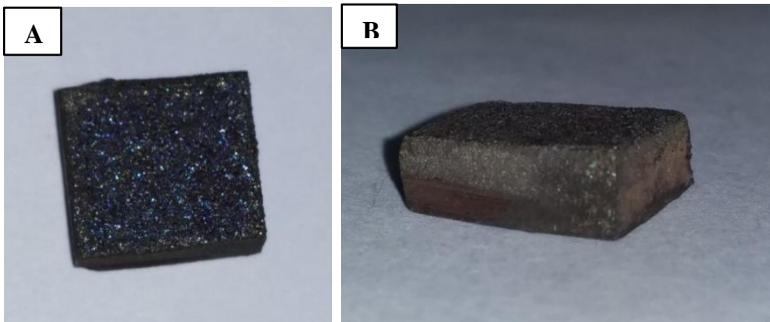


Gambar 4.13 Hasil Pengamatan Makro Spesimen Sebelum *Thermal Cycle* (a) Tampak Permukaan Hasil *Coating* (b) Tampak *Cross Section*

Hasil pengamatan secara visual pada Gambar 4.13 (a) menunjukkan bahwa bentuk permukaan hasil *coating* sedikit bergelombang dan tidak halus. Selain itu warna spesimen berwarna putih keabu-abuan dengan sedikit bintik-bintik putih di permukaannya. Kondisi ini diakibatkan sebelum dilakukan proses pelapisan *wire arc spray*, dilakukan proses *abrasive grit blasting* pada permukaan substrat guna membentuk profil kekasaran yang memungkinkan terjadinya *mechanical bonding* antara substrat dengan lapisan *coating*. Setelah itu dilakukan proses pelapisan *wire arc spray* menggunakan material *coating* berupa *wire*. Proses pelapisan tersebut dengan kecepatan dan temperatur yang tinggi, sehingga pada saat material *coating* mencapai permukaan substrat

mengalami solidifikasi dan membentuk partikel-partikel bulat. Partikel tersebut yang menyebabkan permukaan hasil *coating* tidak rata. Sedangkan pada Gambar 4.13 (b) terlihat batas atau *interface* antara substrat dan hasil *coating*. Namun *interface* yang terbentuk tidak bisa rata, sebab partikel-partikel *coating* mengalami peleburan sampai bagian samping substrat. Selain itu bagian *bond coat* (NiAl) juga tidak terlihat secara visual akibat tertutup oleh partikel-partikel material *top coating* (FeCrBMnSi).

4.6.2 Hasil Pengamatan Makro Spesimen Setelah *Thermal Cycle*



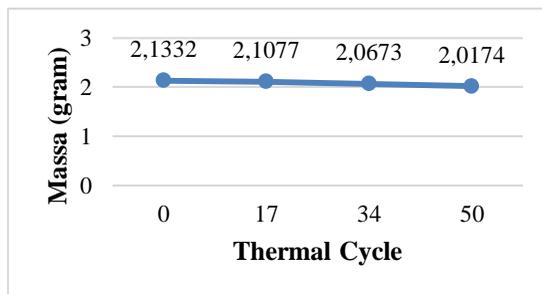
Gambar 4.14 Hasil Pengamatan Makro Spesimen Setelah 50 *Cycle* (a) Tampak Permukaan Hasil *Coating* (b) Tampak *Cross Section*

Hasil pengamatan secara visual pada Gambar 4.14 (a) merupakan spesimen yang mengalami perlakuan 50 *cycle* menunjukkan bahwa permukaan hasil *coating* mulai berwarna kehitaman, sedikit terkorosi serta penurunan kekasaran. Hal ini disebabkan adanya proses perlakuan *thermal cycle* pada temperatur 600°C serta waktu pendinginan di udara bebas selama 30 menit. Unsur Fe yang merupakan unsur mayoritas yang terkandung dalam *top coat* bersifat reaktif terhadap oksigen di udara bebas pada saat perlakuan *thermal cycle*. Kedua unsur tersebut membentuk senyawa besi oksida yang sering disebut sebagai senyawa korosi

pada material. Sedangkan penurunan kekasaran permukaan hasil *coating* disebabkan oleh adanya pemanasan yang sifatnya kontinu selama perlakuan *thermal cycle*, sehingga menyebabkan partikel-partikel hasil *coating* tersebut mengalami proses pelelehan tahap lanjut sehingga menghasilkan permukaan yang lebih halus. Pada Gambar 4.14 (b) merupakan bagian *cross section* spesimen terutama bagian substrat menunjukkan bahwa bagian tersebut tidak mengalami pelelehan material maupun keretakan (*crack*) setelah perlakuan *thermal cycle*. Hal ini disebabkan adanya unsur Cr dan Mo yang memberikan pengaruh sifat ketahanan terhadap temperatur tinggi (Suherman, 1999).

4.6.3 Hasil Perbandingan Massa Spesimen Sebelum dan Setelah *Thermal Cycle*

Pengukuran massa spesimen ini bertujuan untuk mengetahui dan membandingkan massa spesimen sebelum dan setelah perlakuan *thermal cycle*. Pengukuran ini dilakukan dengan menimbang massa spesimen dari sebelum perlakuan, 17 *cycle*, 34 *cycle* dan 50 *cycle* menggunakan timbangan digital. Dari hasil tersebut kemudian dilakukan perbandingan dan analisis massa spesimen tersebut.



Gambar 4.15 Grafik Perbandingan Massa Spesimen Sebelum dan Setelah *Thermal Cycle*

Gambar 4.15 menunjukkan grafik perbandingan massa spesimen sebelum dan setelah *thermal cycle*. Pada spesimen dengan kondisi belum mendapatkan perlakuan *thermal cycle*

mempunyai massa sebesar 2,1332 gram. Kemudian setelah mendapatkan perlakuan *thermal cycle* pada 17 *cycle*, 34 *cycle* dan 50 *cycle* mengalami penurunan massa menjadi 2,1077 gram, 2,0673 gram dan 2,0174 gram. Dari data tersebut menunjukkan bahwa semakin besar jumlah *cycle* menyebabkan penurunan massa spesimen, tetapi dengan kondisi yang tidak signifikan. Hal ini disebabkan adanya reduksi ukuran partikel *coating* selama proses perlakuan *thermal cycle*. Tetapi untuk material substrat kemungkinan besar tidak mengalami perubahan massa. Sebab dengan adanya unsur Mo dan Cr mampu memberikan sifat ketahanan terhadap temperatur tinggi (Suherman, 1999).

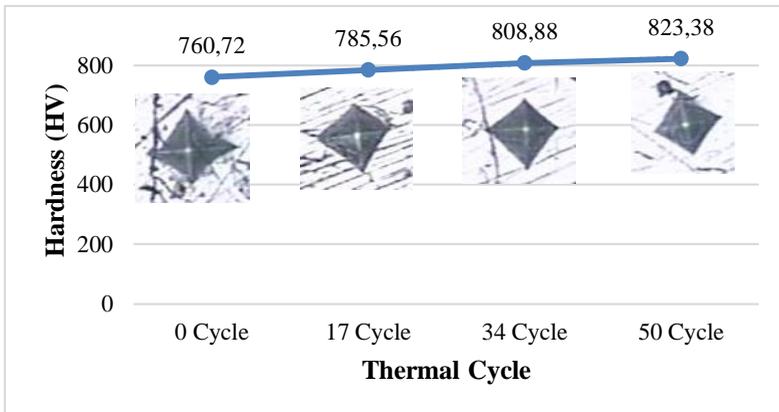
4.6.4 Hasil Perbandingan *Microhardness* Spesimen Sebelum dan Setelah *Thermal Cycle*

Pengujian kekerasan lapisan *coating* dengan menggunakan *microhardness vicker tester* (Model 402MVD S/N “V2D531”) di lima lokasi bagian permukaan hasil *coating*. Beban yang digunakan sebesar 500 gf dengan waktu indentasi selama 30 detik. Hasil pengujian *microhardness vicker* hasil *coating* sebelum dan setelah perlakuan *thermal cycle* dirangkum pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian *Microhardness Vicker* Spesimen Sebelum dan Setelah Perlakuan *Thermal Cycle*

Spesimen	Surface (Hv 0,5)			Rata-Rata
	d1 (µm)	d2 (µm)	Hv	
Spesimen (0 <i>cycle</i>)	35,82	36,28	713,4	760,72
	33,71	34,48	797,6	
	32,74	32,40	844,2	
	36,07	36,07	712,7	
	36,10	34,90	735,7	
Spesimen (17 <i>cycle</i>)	33,57	34,53	799,7	785,56
	33,52	33,63	822,5	
	33,24	32,02	870,8	
	34,43	34,40	782,8	

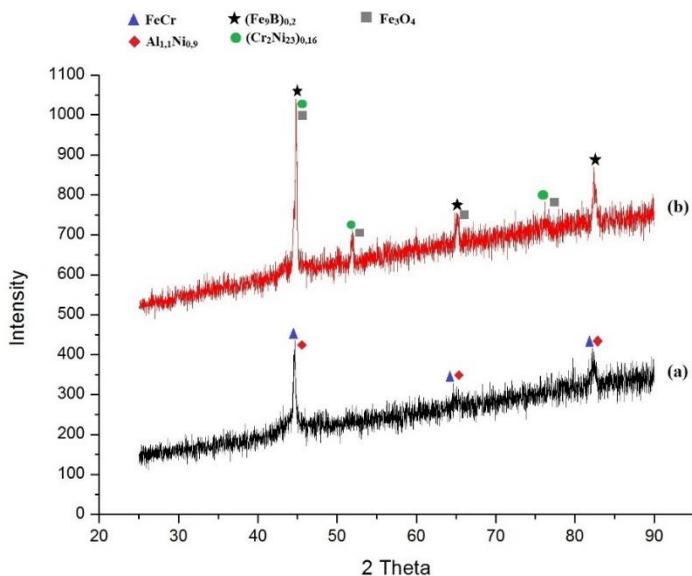
	37,71	37,71	652,0	
Spesimen (34 cycle)	35,22	35,22	747,5	808,88
	35,22	34,54	762,1	
	33,27	32,17	866,1	
	31,91	31,86	912,0	
	35,57	34,33	756,7	
Spesimen (50 cycle)	34,46	32,80	819,8	823,8
	34,01	31,69	859,2	
	34,3	33,8	799,7	
	35,26	32,52	807,3	
	34,24	32,57	830,9	



Gambar 4.16 Grafik *Microhardness Vicker* Spesimen Sebelum dan Setelah *Thermal Cycle*

Dari Gambar 4.16 terlihat bahwa dengan peningkatan perlakuan *thermal cycle* membuat hasil *coating* meningkat nilai kekerasannya. Hal ini dikarenakan dua hal : (1) Penurunan *tensile residual stress* pada hasil *coating*, dengan *residual stress* menurun maka hasil *coating* tersebut mampu menahan beban sebesar *tensile residual stress* yang turun ditambah dengan beban yang mampu diterima hasil *coating* tersebut, (2) Proses kristalisasi dari fasa amorfus sehingga terbentuk fasa *fine crystalline* yang seragam (*uniformity of grain size*) (Lin, 2014).

4.6.5 Hasil Analisis XRD Spesimen Setelah *Thermal Cycle*



Gambar 4.17 Hasil XRD Spesimen (a) *As-Received Coating* dan (b) *50 Cycle*

Tabel 4.3 Data Posisi *2 Theta* Spesimen *As-Received Coating* dan Perlakuan *50 Cycle*

Keterangan	As-Received Coating	Perlakuan 50 Cycle
Posisi 2 Theta	44,6492	44,8200
	64,921	51,8565
	82,3322	65,1849
	-	76,3376
	-	82,3604

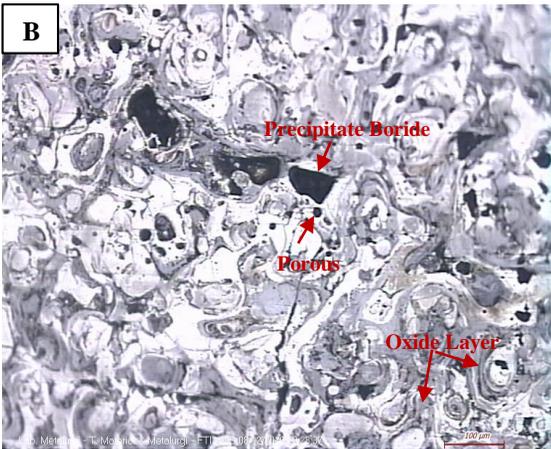
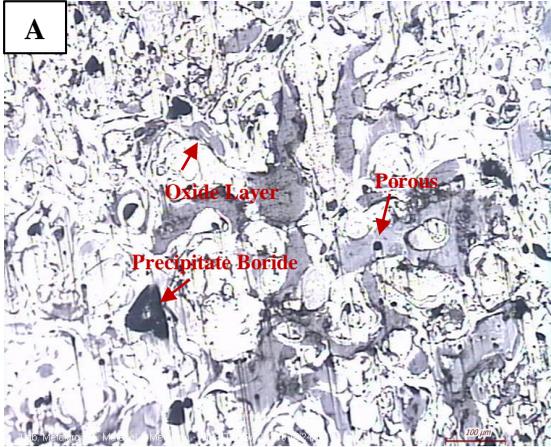
Gambar 4.17 merupakan perbandingan hasil pengujian XRD terhadap spesimen (a) *as-received coating* dan (b) perlakuan *thermal cycle* dengan jumlah 50 cycle. Pada profil *single peak* yang paling tajam terhadap kedua spesimeen tersebut mengalami pergeseran posisi 2θ , sehingga menyebabkan terbentuknya senyawa baru akibat adanya perlakuan *thermal cycle*. Perubahan posisi 2θ menjadi $44,8200^\circ$; $51,8565^\circ$; $65,1849^\circ$; $76,3376^\circ$ dan $82,3604^\circ$. Beberapa senyawa yang teridentifikasi yaitu senyawa paduan $(\text{Fe}_9\text{B})_{0,2}$; $(\text{Cr}_2\text{Ni}_{23})_{0,16}$ dan senyawa oksida Fe_3O_4 . Senyawa paduan $(\text{Fe}_9\text{B})_{0,2}$ atau *precipitate boride* ini memberikan pengaruh terhadap peningkatan kekerasan lapisan *coating* seiring dengan meningkatnya jumlah *cycle* yang diujikan (Hengki, 2015).

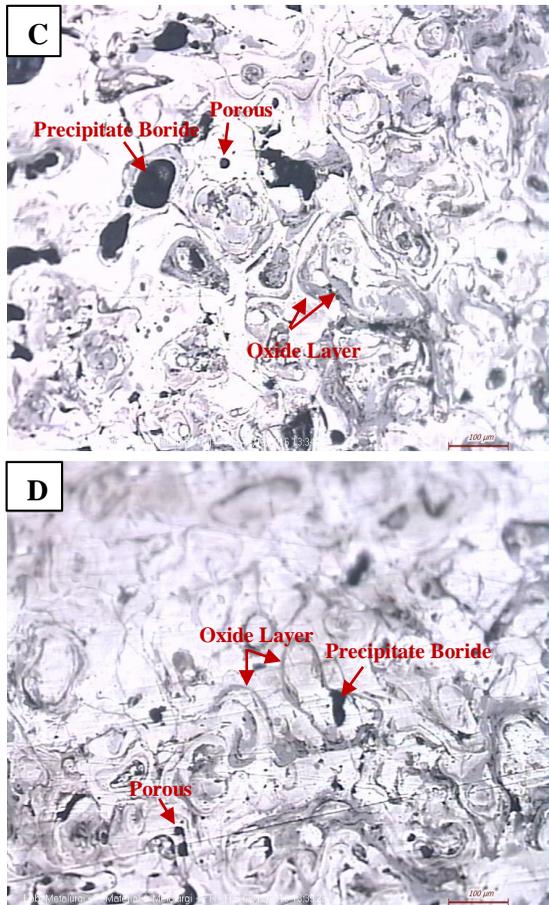
Sedangkan senyawa paduan $(\text{Cr}_2\text{Ni}_{23})_{0,16}$ atau *chromium nickel* terbentuk akibat adanya perlakuan *thermal cycle* terhadap spesimen. Dimungkinkan terjadinya pengelupasan lapisan *coating* di beberapa area, sehingga senyawa paduan dalam material *bond coat* dan *top coat* berdifusi membentuk senyawa paduan baru yang salah satunya $(\text{Cr}_2\text{Ni}_{23})_{0,16}$ atau *chromium nickel*.

Senyawa oksida Fe_3O_4 terbentuk akibat adanya fenomena *Pilling-Bedworth Ratio* (PBR) yang tinggi, dimana disebabkan oleh perlakuan *thermal cycle* (Li, 2013). Senyawa oksida Fe_3O_4 membentuk lapisan tipis atau *thin film* dimana terdapat oksida yang terperangkap di dalam partikel *thin film* tersebut. Morfologi lapisan *thin film* dapat diamati pada Gambar 4.20.

4.6.6 Hasil Pengamatan Metalografi Sebelum dan Setelah *Thermal Cycle*

Pada pengujian ini dilakukan pengamatan metalografi terhadap permukaan spesimen sebelum dan setelah perlakuan *thermal cycle* dengan menggunakan Mikroskop Optik. Tujuan pengujian ini untuk mengetahui perubahan fasa dan mikrostruktur yang terbentuk terhadap spesimen sebelum dan setelah perlakuan *thermal cycle*.





Gambar 4.18 Hasil Pengamatan Metalografi Spesimen (a) *As-Received Coating*, (b) *17 Cycle*, (c) *34 Cycle* dan (d) *50 Cycle*

Berdasarkan pengujian metalografi pada Gambar 4.18 terlihat mikrostruktur spesimen (a) *as-received coating*, (b) *17 thermal cycle*, (c) *34 thermal cycle* dan (d) *50 thermal cycle*. Pada Gambar 4.18 memperlihatkan adanya porous, *oxide layer* dan *precipitate boride*. *Oxide layer* dan *precipitate boride* terbentuk akibat adanya perlakuan *thermal cycle*. *Precipitate boride* merupakan senyawa

yang memberikan pengaruh terhadap peningkatan kekerasan lapisan *coating*. Pengerasan lapisan ini diakibatkan oleh mekanisme pengerasan penuaan (*age hardening*) yang terjadi selama proses perlakuan *thermal cycle*. Pengerasan ini terdiri dari dua tahapan yaitu perlakuan pelarutan (*solution treatment*) dan penuaan (*aging*).

Pada tahap perlakuan pelarutan larutan padat Fe dan paduannya mengalami kejenuhan dan tidak stabil, sehingga terjadi kelebihan atom terlarut yang cenderung keluar dan mengalami proses presipitasi dari larutan padat. Pada temperatur kamar presipitasi ini berlangsung sangat lambat dan semakin cepat pada temperatur yang lebih tinggi. Proses presipitasi ini memerlukan waktu yang disebut dengan tahap penuaan (*aging*).

Selama tahap penuaan secara bertahap terjadi presipitasi, atom terlarut yang keluar dari larutan padat membentuk presipitat yang sangat halus. Presipitat ini tidak mengumpul di batas butir tetapi tersebar secara merata (terdispersi) di dalam butiran kristal fasa pelarut. Presipitat ini biasanya tidak langsung berupa fasa β , tetapi berupa fasa transisi β'' , dengan struktur *lattice* yang *semi-coherent* terhadap fasa α . Pada kondisi ini paduan menjadi lebih keras dan kuat (Suherman, 1999).

Pada Gambar 4.18 (a) mikrostruktur yang terlihat diantaranya terdapat *porous* yang tersebar di beberapa titik, selain itu juga terdapat lapisan oksida (*oxide layer*) yang terbentuk akibat proses *spraying* di udara terbuka, sehingga oksigen terjebak di dalam lapisan *coating* tersebut. Sedangkan persebaran senyawa *precipitate boride* masih sedikit dan tidak merata.

Pada Gambar 4.18 (b) mikrostrukturnya terlihat masih ada *porous*, tetapi jumlahnya sudah mulai berkurang. Hal ini disebabkan terjadinya proses peleburan partikel tahap lanjut sehingga *porous* yang terbentuk antar partikel mulai tertutup. Sedangkan lapisan oksida (*oxide layer*) persebarannya lebih banyak dan merata. Hal ini dikarenakan spesimen mendapatkan perlakuan *thermal cycle*. Sehingga banyak oksida yang terperangkap di dalam lapisan *coating* tersebut. Senyawa

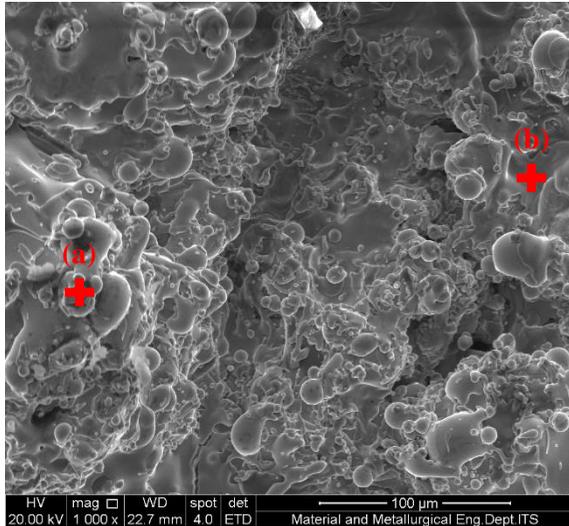
precipitate boride persebarannya juga mulai merata. Senyawa ini menyebabkan kekerasan lapisan *coating* semakin meningkat (Hengki, 2015).

Pada Gambar 4.18 (c) persebaran *porous* semakin berkurang. Partikel *coating* berikatan dengan baik akibat adanya proses peleburan tahap lanjut. Tetapi lapisan oksida yang terbentuk semakin banyak dan persebarannya semakin merata. Sedangkan persebaran senyawa *precipitate boride* terlihat lebih banyak dan semakin merata di permukaan lapisan *coating*. Area senyawa yang terbentuk juga semakin membesar.

Pada Gambar 4.18 (d) terlihat persebaran *porous* semakin berkurang. Hampir di beberapa area permukaan tidak terdapat *porous*. Apabila terdapat *porous*, area yang terbentuk juga semakin mengecil. Hal ini disebabkan karena spesimen menerima panas lebih banyak. Tetapi lapisan oksida persebarannya semakin merata dan membentuk alur oksida (*oxide passage way*). Sedangkan area senyawa *precipitate boride* semakin mengecil, tetapi persebarannya di permukaan masih tetap merata.

4.6.7 Hasil Pengamatan Mikroskop Elektron SEM/EDS Sebelum *Thermal Cycle*

Pada pengujian ini dilakukan pengamatan terhadap morfologi permukaan hasil *coating* dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan *Energy Dispersion Spectrometry* (EDS), untuk mengetahui fasa dan mikrostruktur yang terbentuk pada spesimen sebelum dan setelah perlakuan *thermal cycle*.



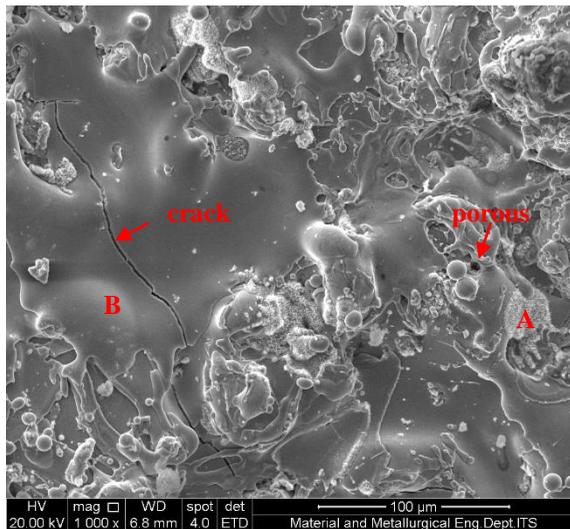
Keterangan	Fe (%)	Cr (%)	Mn (%)	Si (%)	O (%)	C (%)
(a) Unmelt	60,02	22,96	1,33	1,95	5,21	8,53
(b) Melt	67,66	31,18	0,40	0,76	-	-

Gambar 4.19 Hasil Pengujian SEM/EDS Sebelum *Thermal Cycle* dengan Kondisi (a) Partikel *Unmelt* dan (b) Partikel *Melt*

Gambar 4.19 merupakan hasil pengujian SEM/EDS dengan perbesaran 1000x terhadap morfologi permukaan hasil coating sebelum perlakuan *thermal cycle*. Sampel yang digunakan yaitu variasi jarak *nozzle* 100 mm dan tekanan gas sebesar 3 bar. Dari hasil tersebut menunjukkan adanya partikel-partikel yang meleleh dan tidak meleleh secara sempurna. Tetapi partikel yang tidak meleleh tersebut jumlahnya lebih banyak daripada yang meleleh secara sempurna. Dari hasil EDS menunjukkan bahwa pada bagian partikel yang meleleh secara sempurna mempunyai kandungan unsur yang sama dengan spesifikasi material *coating* yang digunakan diantaranya unsur Fe (67,66%), Cr (31,18%), Mn (0,4%) dan Si (0,76%). Sedangkan pada bagian partikel yang tidak

meleleh secara sempurna terdapat beberapa unsur baru yang muncul yaitu C (8,53%) dan O (5,21%). Senyawa oksida muncul dikarenakan pada proses *spraying* dilakukan di tempat yang terbuka, sehingga terdapat udara yang terjebak di dalam partikel *coating* tersebut

4.6.8 Hasil Pengamatan Mikroskop Elektron SEM/EDS Setelah *Thermal Cycle*



(A dan B, Titik Pengamatan EDS)

Keterangan	Fe (%)	Cr (%)	Mn (%)	Si (%)	O (%)
(A)	68,9	26,77	0,43	1,38	2,53
(B)	37,17	41,34	2,03	-	19,46

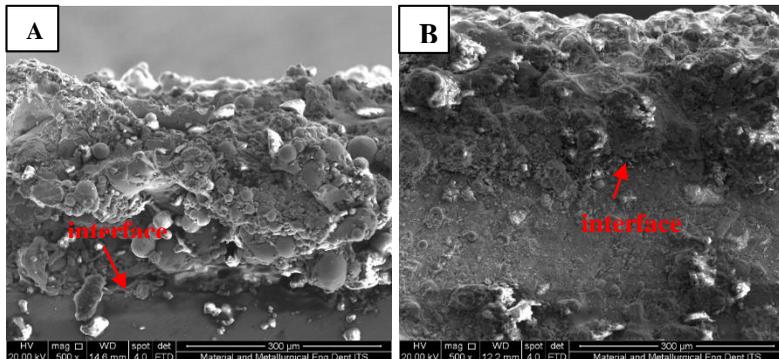
Gambar 4.20 Hasil Pengujian SEM/EDS Setelah 50 *Cycle* dengan Kondisi (a) Daerah *Melt* dan (b) Daerah *Oxide*

Gambar 4.20 merupakan hasil pengujian SEM/EDS dengan perbesaran 1000x terhadap morfologi permukaan hasil *coating*

setelah perlakuan *thermal cycle* pada 50 *cycle*. Sampel yang digunakan yaitu variasi jarak *nozzle* 100 mm dan tekanan gas sebesar 3 bar. Dari hasil tersebut menunjukkan jumlah partikel-partikel yang meleleh lebih banyak bila dibandingkan dengan sebelum perlakuan. Sedangkan partikel-partikel yang tidak meleleh jauh berkurang. Tetapi pada morfologi permukaan muncul retak halus (*soft crack*) membentuk jalur yang cukup panjang. Dari hasil EDS menunjukkan bahwa pada daerah yang meleleh (*melt*) secara sempurna mempunyai komposisi yang sama dengan sampel sebelum perlakuan. Tetapi komposisi masing-masing unsur tersebut mengalami perubahan. Sedangkan pada daerah yang teroksidasi (*oxide*) mempunyai kandungan oksida yang cukup tinggi sekitar 19%. Terbukti dengan hasil pengujian XRD teridentifikasi senyawa oksida yaitu Fe_3O_4 . Senyawa oksida tersebut terbentuk akibat adanya fenomena *Pilling Bedworth Ratio* (PBR) yang tinggi (Li, 2013). Secara morfologi dimungkinkan senyawa oksida Fe_3O_4 membentuk lapisan tipis atau *thin film* dimana terdapat oksida yang terjebak di dalam partikel *thin film* tersebut. Dengan adanya oksida yang terperangkap, mampu menghasilkan tegangan dalam atau *internal stress* dan diikuti dengan adanya pertumbuhan *crack* serta *delamination*. *Crack* dan *delamination* memberikan ruang terhadap oksigen untuk berpenetrasi ke dalam lapisan *coating* (Li, 2013).

4.6.9 Hasil Perbandingan *Cross Section* Spesimen Sebelum dan Setelah *Thermal Cycle*

Pengamatan spesimen sebelum dan setelah mendapatkan perlakuan *thermal cycle* dari bagian penampang lintang (*cross section*) bertujuan untuk mengetahui distribusi partikel-partikel *coating* yang mengalami proses peleburan tahap lanjut sehingga mampu membentuk ikatan antar partikel yang lebih baik. Pengamatan tersebut menggunakan hasil pengujian SEM dengan perbesaran 500x.



Gambar 4.21 Hasil Pengamatan Spesimen *Cross Section* (a) Sebelum *Thermal Cycle* (b) 50 *Cycle*

Gambar 4.21 merupakan hasil pengujian SEM terhadap spesimen pada bagian penampang lintang (*cross section*) dengan kondisi (a) Sebelum mengalami perlakuan *thermal cycle* dan (b) Setelah mengalami perlakuan *thermal cycle* sebanyak 50 *cycle*. Pada Gambar 4.20 (a) menunjukkan hasil bahwa partikel-partikel *coating* yang telah tersolidifikasi terlihat bentuknya bulat dan bergerombol di banyak lokasi permukaan lapisan *coating*. Ikatan antar partikelnya juga kurang baik, sehingga terlihat bahwa permukaan lapisan *coating* mempunyai tingkat kekasaran yang cukup tinggi. Pada bagian batas (*interface*) antara lapisan *coating* dan substrat kurang tampak jelas dan tertutup oleh partikel-partikel *coating*. Hal ini disebabkan pada saat partikel-partikel material *coating* mencapai permukaan substrat mengalami peleburan sampai menutupi bagian substrat. Sehingga batas antara lapisan *coating* dengan substrat kurang tampak jelas dan tidak rata.

Sedangkan pada Gambar 4.20 (b) menunjukkan hasil yang berbeda dengan Gambar 4.20 (a). Perbedaannya yaitu partikel-partikel *coating* terlihat lebih halus dan membentuk ikatan antar partikel yang baik, sehingga kekasaran permukaan lapisan *coating* menurun. Hal ini dikarenakan partikel-partikel *coating* tersebut mengalami proses peleburan tahap lanjut akibat mengalami perlakuan *thermal cycle*. Pada bagian *interface* antara lapisan

coating dan substrat terlihat kurang tampak jelas, sebab masih tertutupi oleh partikel-partikel *coating*. Meskipun telah mengalami perlakuan *thermal cycle*, ternyata tidak memberikan pengaruh yang signifikan untuk memperjelas batas antara lapisan *coating* dan substrat.

4.7 Pengaruh Jarak *Nozzle* dan Tekanan Gas pada Proses Pelapisan FeCrBMnSi Terhadap Ketahanan *Thermal*

Proses pelapisan dengan *wire arc spray* terlebih dahulu dilakukan proses preparasi permukaan substrat dengan metode *abrasive grit blasting* menggunakan *aluminium oxide 24 mesh*. Fungsi metode ini yaitu untuk membersihkan permukaan substrat dari pengotor serta meningkatkan kekasaran permukaan substrat. Dari hasil uji kekasaran permukaan, nilai kekasaran permukaan sebelum dan setelah proses *abrasive grit blasting* yaitu 2,34 μm dan 5,96 μm . Kenaikan nilai kekasaran tersebut merupakan nilai yang ideal karena dapat meningkatkan sifat adhesi lapisan *coating* dengan bidang kontak yang besar dan terjadinya *mechanical interlock* (Chaitanya, 2007). Setelah itu dilanjutkan dengan dengan proses pelapisan NiAl sebagai *bond coat* menggunakan parameter tekanan gas sebesar 4 bar dan jarak *nozzle* sejauh 200 mm. Kemudian dilakukan proses pelapisan FeCrBMnSi sebagai *top coat* menggunakan variasi tekanan gas dan jarak *nozzle*. Jarak *nozzle* dan tekanan gas yang digunakan adalah 100 mm ; 3 bar (100;3), 100 mm ; 4 bar (100;4), 200 mm ; 3 bar (200;3), 200 mm ; 4 bar (200;4), 300 mm ; 3 bar (300;3), 300 mm; 4 bar (300;4), 400 mm ; 3 bar (400;3), dan 400 mm ; 4 bar (400;4).

Adanya variasi jarak *nozzle* dan tekanan gas memberikan pengaruh terhadap kualitas permukaan hasil *coating* yang dihasilkan. Yang pertama dari segi karakterisasi morfologi permukaan *coating* yang terdapat pada Gambar 4.2. dan 4.4. Pada kedua gambar tersebut memberikan informasi bahwa dengan adanya peningkatan tekanan gas yang digunakan memberikan pengaruh terhadap persebaran partikel-partikel *coating* yang mengalami pelelehan secara sempurna. Permukaan menunjukkan

hasil yang lebih rata dan tingkat kekasaran pun menurun. Selain itu juga berpengaruh terhadap penurunan persentase porositas yang dihasilkan yang terdapat pada Gambar 4.5 dan 4.12. Tetapi selisih persentase porositas tidak terlalu signifikan. Dari kedua pengaruh yang disebutkan yaitu tingkat kekasaran dan persentase porositas, faktor utamanya yaitu dikarenakan meningkatnya kecepatan *impact droplet* pada saat mencapai permukaan substrat, sehingga tidak menimbulkan percikan droplet yang tinggi.

Sedangkan dengan adanya peningkatan jarak *nozzle* yang digunakan memberikan pengaruh terhadap penurunan ketebalan lapisan *coating* yang dihasilkan, seperti halnya yang terdapat pada Gambar 4.5 dan 4.7. Dari hasil yang didapat, pada jarak *nozzle* 100 mm, 200 mm dan 300 mm, masing-masing mempunyai selisih ketebalan sekitar 100 μm . Tetapi pada jarak *nozzle* 300 mm dan 400 mm tidak mengalami perubahan. Sehingga besar kemungkinan pada jarak *nozzle* tersebut merupakan jarak maksimum yang direkomendasikan untuk proses *spraying*. Penurunan ketebalan lapisan ini disebabkan oleh semakin sedikit partikel-partikel *coating* yang mencapai permukaan substrat, karena tidak sampainya partikel tersebut di permukaan substrat. Selain faktor jarak *nozzle*, peningkatan ketebalan lapisan *coating* juga disebabkan oleh peningkatan tekanan gas yang digunakan. Pada Gambar 4.8 menyebutkan bahwa dengan variasi tekanan gas sebesar 3 dan 4 bar, menghasilkan selisih ketebalan lapisan sekitar 30 μm . Dengan demikian penggunaan tekanan gas dengan kisaran tersebut direkomendasikan untuk proses *spraying*. Sebab keduanya tidak menghasilkan selisih ketebalan yang signifikan.

Sedangkan variasi jarak *nozzle* dan tekanan gas yang digunakan ternyata tidak memberikan pengaruh perubahan yang signifikan terhadap kekuatan adhesi atau kekuatan lekat yang dihasilkan. Pada Gambar 4.9 menginformasikan bahwa nilai kekuatan lekat yang dihasilkan berada di kisaran 22 MPa. Selisih antar variasi yang digunakan pun juga rendah. Tetapi semakin besarnya jarak *nozzle* dan tekanan gas yang digunakan mampu meningkatkan nilai kekuatan lekat. Nilai tertinggi terdapat pada

variasi 300 mm; 4 bar dan 400 mm; 3 bar sebesar 22,58 MPa. Pada variasi 400 mm; 4 bar mengalami penurunan kekuatan lekat. Dengan demikian, variasi yang direkomendasikan untuk mendapatkan kekuatan lekat permukaan *coating* yang dihasilkan yaitu 300 mm; 4 bar atau 400 mm; 3 bar.

Selain itu, variasi jarak *nozzle* dan tekanan gas yang digunakan juga tidak memberikan pengaruh perubahan terhadap senyawa paduan yang dihasilkan oleh material *coating*. Terlihat pada Gambar 4.3 menyebutkan bahwa senyawa paduan yang dihasilkan antara lain Fe-Cr dan $Al_{1,1}Ni_{0,9}$. Kedua senyawa tersebut memberikan pengaruh positif terhadap kualitas *coating* yang dihasilkan, diantaranya nilai kekuatan lekat yang dihasilkan permukaan *coating* cukup tinggi dan masing-masing variasi tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Sebab senyawa paduan yang terdapat pada material *bond coat* dan *top coat* mampu berdifusi serta berikatan dengan baik, yang salah satunya menghasilkan senyawa paduan $Al_{1,1}Ni_{0,9}$.

Pada pengujian atau perlakuan *thermal cycle* yang berfungsi sebagai simulasi spesimen yang beroperasi pada temperatur tinggi. Variasi *cycle* yang diujikan antara lain sebelum atau 0 *cycle*, 17 *cycle*, 34 *cycle* dan 50 *cycle*. Dari variasi tersebut ternyata tidak berpengaruh signifikan terhadap penurunan massa spesimen. Penurunan massanya diindikasikan terhadap partikel-partikel *coating* yang mengalami proses pelelehan tahap lanjut, sehingga permukaannya pun lebih rata dan kekasarannya juga menurun seperti yang terlihat pada Gambar 4.14. Akan tetapi dengan meningkatnya *cycle* yang diujikan berpengaruh terhadap peningkatan kekerasan permukaan. Masing-masing variasi mengalami peningkatan yang hampir sama sekitar 15 – 20 HV. Peningkatan kekerasan permukaan ini disebabkan oleh munculnya senyawa paduan yang baru akibat proses perlakuan *thermal cycle* yaitu senyawa $(Fe_9B)_{0,2}$ atau *precipitate boride*. Pada Gambar 4.18 menginformasikan bahwa semakin meningkatnya jumlah *cycle* maka persebaran senyawa *precipitate boride* lebih merata namun

area yang terbentuk semakin kecil. Selain itu persebaran dan area porositas yang terbentuk juga menurun.

Selain itu dengan adanya proses perlakuan *thermal cycle* ini menyebabkan terbentuknya senyawa oksida Fe_3O_4 . Senyawa oksida Fe_3O_4 merupakan senyawa keramik yang mempunyai nilai koefisien ekspansi termal yang berbeda dengan senyawa logam. Sehingga ketika kedua senyawa tersebut terdapat pada satu material dan mendapatkan temperatur yang cukup tinggi mampu menyebabkan timbulnya perambatan retak seperti yang terlihat pada Gambar 4.19. Pada Gambar 4.19 menunjukkan adanya perambatan retak dan kemudian diikuti dengan terjadinya pengelupasan lapisan *coating* atau delaminasi. Dengan demikian, semakin besar jumlah *cycle* yang diujikan maka semakin banyak pula senyawa oksida yang terbentuk, sehingga mampu menimbulkan perambatan retak serta delaminasi yang lebih besar.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

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

1. Pada variasi jarak *nozzle* sebesar 400 mm dan tekanan gas sebesar 3 bar menghasilkan nilai kekuatan lekat terbesar 22,58 MPa dengan persentase porositas 5,93% dan tingkat kekasaran permukaan 16,36 μm .
2. Kondisi spesimen setelah perlakuan *thermal cycle* ke-50 tidak mengalami penurunan massa yang signifikan. Penurunan massa disebabkan oleh penurunan kekasaran partikel *coating* tetapi material substrat tidak mengalami pelelehan.
3. Perlakuan *thermal cycle* hingga *cycle* ke-50 berpengaruh terhadap peningkatan kekasaran permukaan hasil *coating*. Hal ini dikarenakan terdapat senyawa baru yang terbentuk yaitu $(\text{Fe}_9\text{B})_{0,2}$ atau *precipitate boride*.
4. Kondisi permukaan hasil *coating* setelah perlakuan *thermal cycle* ke-50 terdapat perambatan retak dan delaminasi akibat senyawa oksida Fe_3O_4 .

5.2 Saran

Berdasarkan dari hasil penelitian maka hal-hal yang dapat disarankan adalah sebagai berikut :

1. Untuk memperoleh hasil *coating* maksimal dilakukan dengan variasi jarak *nozzle* dan tekanan gas yaitu 300 mm; 4 bar dan 400 mm; 3 bar. Selanjutnya akan mengalami penurunan kualitas.
2. Pengujian *thermal cycle* lebih baik dilakukan lebih dari 50 *cycle* untuk mendapatkan hasil yang maksimal. Sehingga kita bisa mengetahui titik ekstrim dari pengujian tersebut.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- ASM Handbook 5 Surface Engineering. 1994
- ASM Handbook Thermal Spray. 2004
- Azo Materials. 2012. *Standart Specification for Steel*. United States.
- Antunes, Jose Fernando, Brito, Vinisius Ribeiro dos Santos de Sa, Bastos, Ivan Napoleao, Costa, Hector Reynaldo Meneses. 2013. *Characterization of FeCr and FeCoCr alloy Coatings of Carbon Steels for Marine Environment Applications*. Applied Adhesion Science 2013 1:3.
- Chaitanya. 2007. *Processing and Characterization of Nickel-Aluminide Coating On Metal Substrates*. Master of Technology In Mechanical Engineering Thesis. National Institute of Technology, Roukela.
- Cotton, K.C. 1998. *Evaluating and Improving Steam Turbine Performance*.
- Daengmool, Reungruthai, Sitichai Wirijanupathum, Sukanda J., Apicat Sopadang. *Effect of Spray Parameter on Stainless Steel Arc Sprayed Coating*. MP03 (2006).
- Deckers, M., Doerwald, D. 1997. *Steam Turbine Flow Path Optimizations for Improved Efficiency*. Proceedings of PowerGen Asia : Singapore.
- Deckers, M., Hadden S.G.C., Pfitzinger, E.W., Simon, V. 2000. *A Novel Bladepath Design System for Advanced Steam Turbines, Proceedings of the 4th European Conference on Turbomachinery – Fluid Dynamics and Thermodynamics 2000*. Firenze : Italy.
- DIN EN 657, June 2005, Beuth Verlag GmbH, Berlin, pp. 1-23
- Dowson, Phillip. 2008. *Selection of Materials and Material Related Process for Centrifugal Compressors and Steam Turbines in the Oil and Petrochemical Industry*. Pennsylvania : Elliot Company
- Dybkov. 2016. *Basic of Formation of Iron Boride Coatings*. Department of Physical Chemistry of Inorganic Materials,

- Institute of Problems of Materials Science, National Academy of Sciences of Ukraine : Ukraine
- Fauchais.P and A. Vardelle. 2012. *Thermal Sprayed Coatings Used Against Corrosion and Corrosive Wear*, Advanced Plasma Spray Applications UMR 7315, 5
- Fernando , Jose Antunes. 2013. *Characterization of FeCr and FeCoCr alloy coatings of carbon steels for marine environment applications*. Adhesion Science, 1:3
- Fu Bin You. 2009. *Effect of Heat Treatment On the Microstructure and Mechanical Properties of Fe-Based Amorphous Coatings*. China : Beijing University of Technology.
- 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.
- Jinran, Lin 2014. *Effects of Post Annealing On the Microstructure, Mechanical Properties and Cavitation Erosion Behavior of Arc-Aprayed FeNiCrBSiNbW Coatings*. China : Southeast University Nanjing
- Heberlein, J.V.R., N. Ohtake : *Plasma Torch Diamond Deposition*. Diamond Films Handbook, Chapter 6, eds.: J. Asmussen, D.K. reinhard, Marcel Dekker, New York, 2002, pp. 141-210
- Heinz P. Bloch dan Murari P. Singh. 2009. *Steam Turbines Design, Applications and Re-Rating Second Edition*. United States of America : McGra-Hill
- JEOL. 2012. *Basic Knowledge for Using SEM*. Japan
- JiXiu. 2005. *Arc Spray Forming of Stainless Steel Mould. Advances in Abrasive Technology*. Key Engineering Materials Vol 291-292. 603-608
- Kaufmann, E.N. 2003. *Characterization Of Materials: Volumes 1 and 2*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Khanlari, Khasayar. 2015. *Design of Experiment of A Novel Cermet Coating Sprayed With The HVOF Technology*.

- Kutz, Myer. *Handbook of Environmental Degradation of Materials*. Oxford: William Andrew/Elsevier, 2012. Print.
- Larasati, Fitrianova. 2014. *Pengaruh Jarak Nozzle dan Tekanan Gas pada Proses Pelapisan Ni-20Cr dengan Metode Wire Arc Spray terhadap Ketahanan Thermal*. Surabaya : ITS
- Lieberman, P. and Lieberman, Elizabeth T. 2003. *Working Guide to Process Equipment* (2nd ed.). McGraw-Hill
- 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. Boccacini, 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.
- McKechnie, T., Y.K. Liaw, P. Krotz, R. Poorman, F. Zimmerman, R. Holmes : *VPS Forming of Refractory Metals and Ceramics for Space Furnace Containment Cartridges. Therma Spray Coatings : Research, Design and Applications*, ASM International, Materials Park, Ohio, 1993, pp. 297-302
- Najamudin. 2014. *Evaluasi Kinerja Mesin pada Turbin Uap*. Bandar Lampung : Universitas Negeri Lampung
- Otto Knotek. 2001. *Hard Coating with Thermal Spraying Processes*.
- Parker, Spada, Berkowitz. 2000. *Thick Amorphous Ferromagnetic Coatings Via Thermal Spraying of Spark-Eroded Powder*. University of California. USA
- Pawlowski, L. 2008. *The Science And Engineering Of Thermal Spray Coatings*. France : Willey.
- Ran, Li. 2013. *Microstructure and High-Temperature Oxidation Behavior of Wire-Arc Sprayed Fe Based Coating*. Beijing University of Technology. Beijing. China

- 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.
- Sarikaya, Ozkan. 2005. *Effect of the Substrate Temperature SS304L On Properties of Plasma Sprayed Al₂O₃ Coatings*. Materials and Design 26, 53-57
- Schwenk, A., H. Gruner, G. Nutsch : *Modified Nozzle for the Atmospheric Plasma Spraying*. Proceedings of the International Thermal Spray Conference 2003, Orlando, FL, USA, ASM International, Materials Park, Ohio, 2003, pp. 573-579
- Setiawan, Sugiono. 2014. *Pengaruh Variasi Sudut Nozzle dan Jarak Nozzle pada Arc Spray Coating terhadap Ketahanan Abrasif Lapisan 13% Chrome Steel*. Surabaya : ITS
- Singh Murari P., dan Lucas George M. 2011. *Blade Design & Analysis for Steam Turbine*. United States of America.: McGraw-Hill.
- Shlyakhin, P. 1990. *Turbin Uap Teori dan Rancangan*. Penerbit Erlangga : Jakarta
- 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
- Supriyani. 2012. *Pengaruh Sudut Dan Jarak Nozzle Pada Proses Arc Sprayed Aluminium Sebagai Anoda Tumbal*. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Thermo ARL. 1999. *Basics of X-Ray Diffraction*. Switzerland TQC. 2012. *Adhesion Testing Datasheet*. Netherlands.
- 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)
- Wagiran. 2013. *Penggunaan Alat-Alat Ukur Metrologi Industri*. Yogyakarta : Deepublish
- Williams, P : ACT™ Power Coatings™, Platinum Metals Review, Vol. 46, No. 4, 1 October 2002, pp. 181-187
- Yuping Wu, Pinghua, Lin. Guozhie Xie. 2006. *Formation of Amorphous and Nanocrystalline Phase in High Velocity Oxy-Fuel Thermally Sprayed a Fe-Cr-B-Mn-Si Alloy*. Materials Science Engineering. A 430 34-39.
- Zheng, Z.B, Zheng, Y.G, Sun, W.H. 2015. *Effect of Heat Treatment On The Structure, Cavitation Erosion and Erosion Corrosion Behaviour of Fe-Based Amorphous Coating*. Tribology International Author's Manuscript.

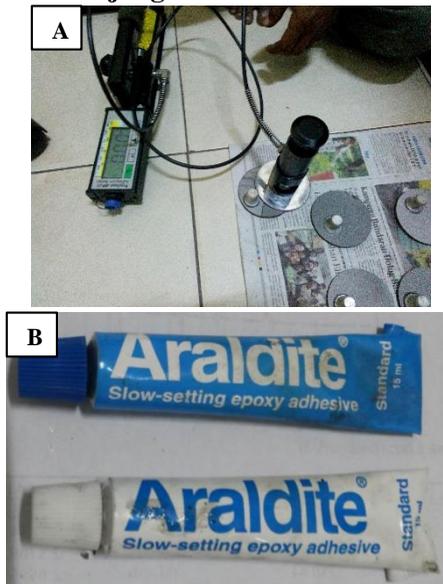
(halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

A.1 Peralatan Penunjang Sketmat Digital

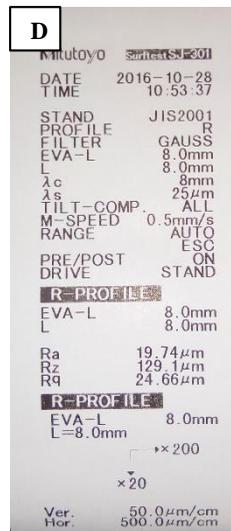
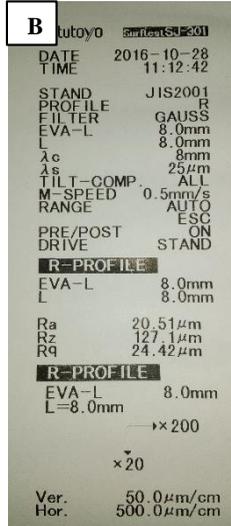
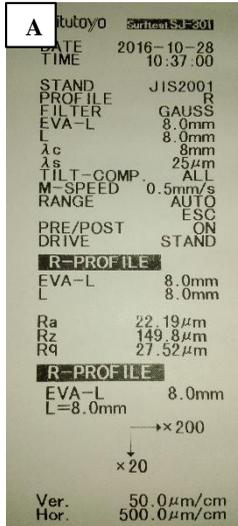


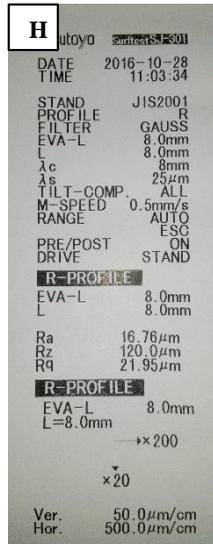
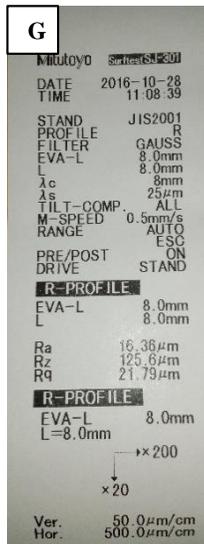
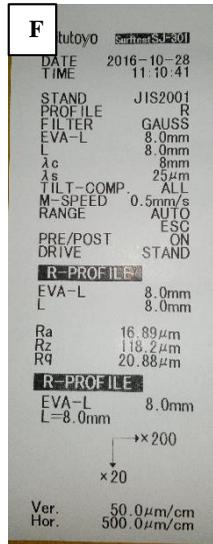
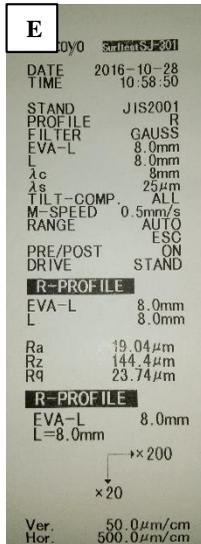
A.2 Peralatan Penunjang Pull Off Test



(a) Alat Uji Pull Off dan Pin yang Dilekatkan pada Spesimen (b) Perekat/Lem Epoxy Adhesive

A.3 Hasil Uji Kekasaran Permukaan





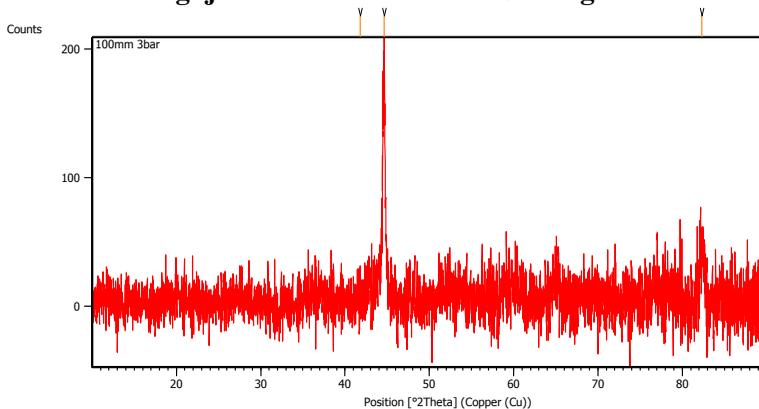
Hasil Uji Kekasaran Permukaan (a) 100;3 (b) 100;4 (c) 200;3 (d) 200;4 (e) 300;3 (f) 300;4 (g) 400;3 (h) 400;4

A.4 Data Temperatur Pengujian Thermal Cycle

No	Hari, Tanggal	Waktu	Start Up (°C)
1.	Kamis, 20 Oktober 2016	08.30 – 09.45	25
		09.45 – 10.45	370
		10.45 – 11.45	350
		11.45 – 12.45	360
		12.45 – 13.45	358
2.	Jum'at, 21 Oktober 2016	08.00 – 09.15	43
		09.15 – 10.15	345
		10.15 – 11.15	351
		11.15 – 12.15	376
3.	Senin, 24 Oktober 2016	07.30 – 08.45	49
		08.45 – 09.45	367
		09.45 – 10.45	362
		10.45 – 11.45	360
4.	Selasa, 25 Oktober 2016	07.45 – 09.00	37
		09.00 – 10.00	355
		10.00 – 11.00	351
5.	Rabu, 26 Oktober 2016	08.15 – 09.30	41
		09.30 – 10.30	349
		10.30 – 11.30	359
		11.30 – 12.30	358
6.	Kamis, 27 Oktober 2016	08.30 – 09.45	34
		09.45 – 10.45	356
		10.45 – 11.45	358
		11.45 – 12.45	348
		12.45 – 13.45	353
		13.45 – 14.45	361
7.	Sabtu, 29 Oktober 2016	07.00 – 08.15	32
		08.15 – 09.15	342

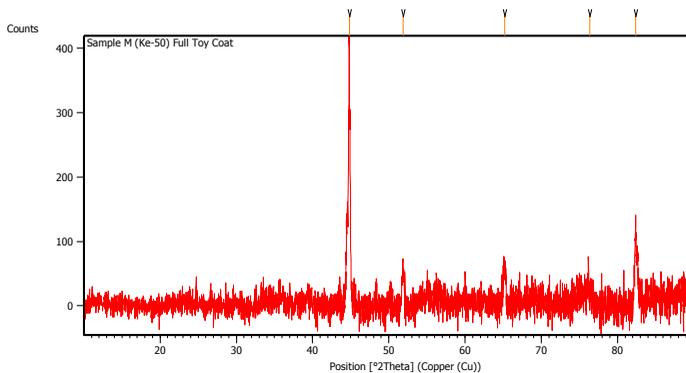
		09.15 – 10.15	372
		10.15 – 11.15	341
		11.15 – 12.15	375
		12.15 – 13.15	354
		13.15 – 14.15	381
		14.15 – 15.15	365
		15.15 – 16.15	372
		16.15 – 17.15	360
8.	Minggu, 30 Oktober 2016	06.00 – 07.15	42
		07.15 – 08.15	383
		08.15 – 09.15	352
		09.15 – 10.15	371
		10.15 – 11.15	367
		11.15 – 12.15	361
		12.15 – 13.15	338
		13.15 – 14.15	366
		14.15 – 15.15	371
		15.15 – 16.15	360
		16.15 – 17.15	361
		17.15 – 18.15	366
		18.15 – 19.15	363
19.15 – 20.15	369		

A.6 Hasil Pengujian XRD As-Received Coating



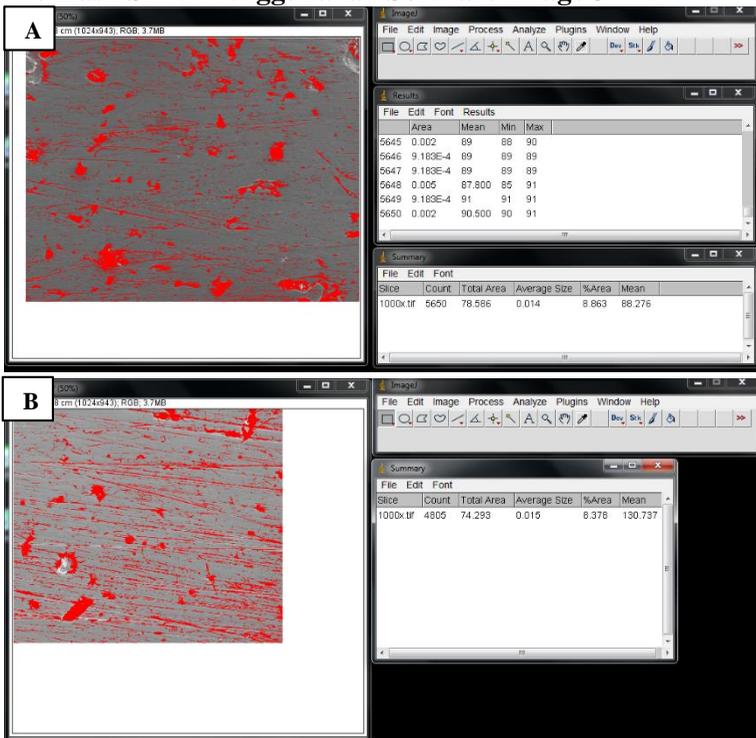
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
41.7993	20.84	0.1004	2.16111	10.96
44.6492	190.15	0.2342	2.02957	100.00
82.3322	42.08	0.6691	1.17120	22.13

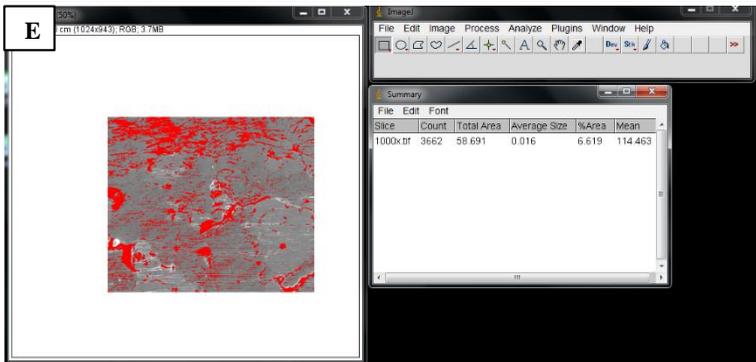
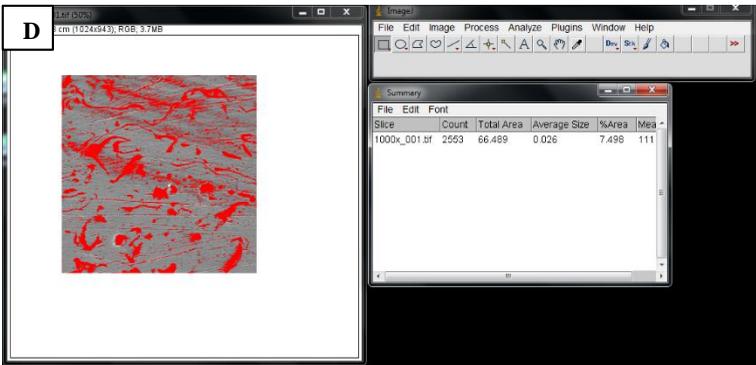
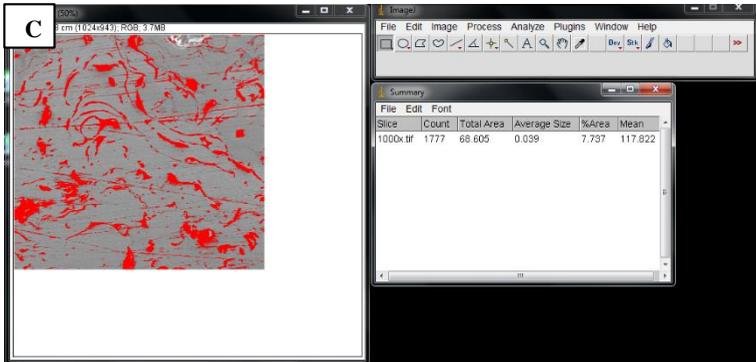
A.7 Hasil Pengujian XRD Thermal Cycle ke-50

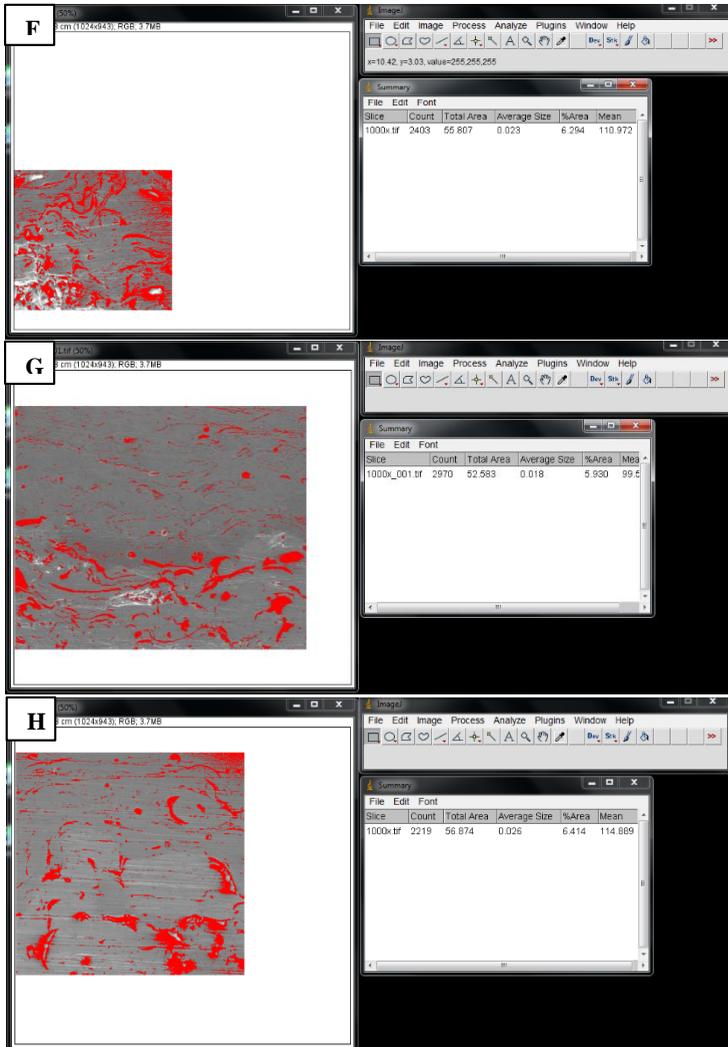


Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
44.8200	400.84	0.1004	2.02223	100.00
51.8565	70.63	0.2342	1.76317	17.62
65.1849	57.24	0.3346	1.43121	14.28
76.3376	23.25	0.8029	1.24751	5.80
82.3604	123.85	0.1224	1.16990	30.90

A.8 Hasil SEM Menggunakan Software Image J







Hasil SEM Perbesaran 500x Bagian Cross Section Menggunakan Image J (a) 100;3 (b) 100;4 (c) 200;3 (d) 200;4 (e) 300;3 (f) 300;4 (g) 400;3 (h) 400;4

(halaman ini sengaja dikosongkan)



BIODATA PENULIS

Penulis bernama lengkap Muhammad Suchaimi, lahir di Rembang 30 Agustus 1994. Merupakan anak pertama dari pasangan Supangat dan Ratna Dumilah. Penulis telah menempuh pendidikan formal, yaitu TK Negeri Rembang, SDN 4 Kutoharjo Rembang, SMP N 2 Rembang dan SMA N 1 Rembang. Setelah lulus dari SMA tahun 2013, penulis diterima menjadi mahasiswa di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.

Semasa menjadi mahasiswa ITS penulis aktif dalam kegiatan organisasi LDJ (Lembaga Dakwah Jurusan) Ash-haabul Kahfi Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS. Dalam bidang organisasi tahun kedua penulis menjadi Wakil Sekretaris Jenderal. Pada tahun ketiga penulis menjadi Ketua Umum LDJ Ash-haabul Kahfi.

Pada tahun ketiga penulis mengambil mata kuliah kerja praktek di salah satu perusahaan migas terbesar di Indonesia yaitu PT. Pertamina (Persero) RU IV Cilacap dengan topik “Perencanaan *Thick Lining Reinforced* pada *Bottom Plate Storage Tank 33 T-6*” dan penulis menutup kuliah di Tugas Akhir dengan judul **“PENGARUH JARAK NOZZLE DAN TEKANAN GAS PADA PROSES PELAPISAN FeCrBMnSi DENGAN METODE WIRE ARC SPRAY TERHADAP KETAHANAN THERMAL”**.

Email : m.suchaimi@gmail.com

(halaman ini sengaja dikosongkan)