



TUGAS AKHIR - TM141585

**ANALISIS STRUKTUR MIKRO, NILAI KEKERASAN
DAN KETAHANAN OKSIDASI CAMPURAN
NiCrBSi-40SiC, NiCrBSi-40WC-Co DAN Cr_3C_2 -
20NiCr PADA PROSES PELAPISAN HVOF**

MUSTOFA HILMI
NRP 02111545000002
Dosen Pembimbing
Suwarno, S.T., M.Sc., Ph.D
Dr. Eng. Budi Prawara

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018



FINAL PROJECT - TM141585

**ANALYSIS OF MICROSTRUCTURAL
CHARACTERISTICS, HARDNESS AND HIGH
TEMPERATURE OXIDATION OF HIGH
VELOCITY OXYGEN FUEL (HVOF) SPRAYED
NiCrBSi-40SiC, NiCrBSi-40WC-Co AND Cr₃C₂-
20NiCr COMPOSITE COATING**

MUSTOFA HILMI
NRP 02111545000002

Advisor Lecturer
Suwarno, S.T., M.Sc., Ph.D.
Dr. Eng. Budi Prawara

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2018

**ANALISIS STRUKTUR MIKRO, NILAI KEKERASAN
DAN KETAHANAN OKSIDASI CAMPURAN NiCrBSi-
40SiC, NiCrBSi-40WC-Co DAN Cr₃C₂-20NiCr PADA
PROSES PELAPISAN HVOF**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

MUSTOFA HILMI
NRP. 02111545000002

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Suwarno, ST., M.Sc., PhD (Pembimbing I)
(NIP. 198005202005011003)
2. Dr. Eng. Budi Prawara (Pembimbing II)
(NIP. 197205301997031001)
3. Dr. Eng. Sutikno, ST., MT. (Penguji I)
(NIP. 197407032000031001)
4. Ir. Hari Subiyanto, M.Sc (Penguji II)
(NIP. 196006231988081002)
5. Indra Sidharta, ST, M.Sc (Penguji III)
(NIP. 198006192006041004)



SURABAYA

JANUARI, 2018

**ANALISIS STRUKTUR MIKRO, NILAI KEKERASAN
DAN KETAHANAN OKSIDASI CAMPURAN NiCrBSi-
40SiC, NiCrBSi-40WC-Co DAN Cr₃C₂-20NiCr PADA
PROSES PELAPISAN HVOF**

Nama : Mustofa Hilmi
NRP : 02111545000002
Dosen Pembimbing : Suwarno, ST., MSc., Ph.D
Dr. Eng. Budi Prawara

Abstrak

Komponen water wall tube yang terdapat pada boiler tipe circulating fluidized bed (CFB) bekerja pada temperatur sangat tinggi (800–900°C) dan beroperasi pada lingkungan yang abrasive. Kondisi kerja tersebut sering mengakibatkan terjadinya degradasi pada komponen water wall tube. Proses degradasi yang sering terjadi diantaranya adalah pengikisan dan oksidasi temperatur tinggi. Salah satu cara yang bisa dilakukan untuk mengatasi permasalahan ini adalah dengan mengaplikasikan pelapisan dengan jenis pelapisan tahan aus dan oksidasi yang memiliki konduktifitas termal yang baik, seperti High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) coating dengan menggunakan bahan pelapis berupa carbide–metal (cermet) alloys.

Pada penelitian ini pelapisan dilakukan pada plat baja karbon rendah dengan variasi bahan pelapis berupa NiCrBSi-40SiC, NiCrBSi-40WC-Co dan Cr₃C₂-20NiCr. Proses pelapisan dilakukan menggunakan peralatan HVOF. Metode pengujian yang digunakan pada penelitian ini adalah pengujian kekerasan mikro, pengamatan struktur mikro dan pengujian siklus termal.

Dari penelitian ini didapatkan hasil bahwa struktur mikro lapisan NiCrBSi-40WC-Co dan NiCrBSi-40SiC memiliki struktur lapisan yang padat dengan sedikit porositas, tidak ada retakan dan mempunyai persebaran karbida yang merata. Sedangkan pada lapisan Cr₃C₂-20NiCr terdapat banyak porositas yang disebabkan oleh unmelted particle. Kualitas ikatan antara substrate dan lapisan pada interface dari ketiga spesimen terlihat bagus. Nilai

kekerasan mikro tertinggi sebesar 859 HV didapat pada lapisan NiCrBSi-40WC-Co, hal ini membuktikan bahwa penggunaan karbida tungsten (WC) memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai kekerasan lapisan. Proses pelapisan pada material mampu mengurangi laju oksidasi temperatur tinggi jika dibandingkan dengan material tanpa pelapisan.

Kata kunci : *HVOF coating, cermet, high temperature oxidation, NiCrBSi-40SiC, NiCrBSi-40WC-Co, Cr₃C₂-20NiCr.*

**ANALYSIS OF MICROSTRUCTURAL CHARACTERISTICS,
HARDNESS AND HIGH TEMPERATURE OXIDATION OF
HIGH VELOCITY OXYGEN FUEL (HVOF) SPRAYED
NiCrBSi-40SiC, NiCrBSi-40WC-Co AND Cr₃C₂-20NiCr
COMPOSITE COATING**

Name : Mustofa Hilmi
NRP : 0211154500002
Department : Mechanical Engineering FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Suwarno, ST., MSc., Ph.D
Dr. Eng. Budi Prawara

Abstract

The water wall tube of a circulating fluidized bed (CFB) boiler works at very high temperatures (800-900°C) and operates in an abrasive environment. Such working conditions often result in degradation of the water wall tube. Degradation processes that often occur include the erosion and high temperature oxidation. One way to cope with this problem is by using thin wear and oxidation resistant coatings with good thermal conductivities, such as High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) coating using cermet (carbide-metal) alloys.

In this research, low carbon steel was used as substrate with a variety of feedstock materials such as NiCrBSi-40SiC, NiCrBSi-40WC-Co and Cr₃C₂-20NiCr. The coating process was carried out using HVOF equipment. Micro-hardness test, microstructure observation and thermocyclic oxidation tests are the testing method used in this research.

The result of this research has shown that the typical cross-sectional microstructures of the HVOF-sprayed NiCrBSi-40WC-Co and NiCrBSi-40SiC has dense structure with low porosity, crack-free and has uniform carbide. While in Cr₃C₂-20NiCr there are many porosity caused by unmelted particle. Adherence between substrate and coating in all specimen seems to be good with a low presence of either cracks or voids in the interface. Maximum value of about 859 HV was obtained from the coating

NiCrBSi-40WC-Co, it proves that the use of tungsten carbide (WC) had a significant effect on the coating hardness. The application of coating process on the material is capable of reducing the high temperature oxidation rate when compared to the material without coating.

Keyword: HVOF coating, cermet, high temperature oxidation, NiCrBSi-40SiC, NiCrBSi-40WC-Co, Cr₃C₂-20NiCr.

KATA PENGANTAR

Dengan mengucap rasa syukur kepada Allah SWT, maka Tugas Akhir dengan judul “**ANALISIS STRUKTUR MIKRO, NILAI KEKERASAN DAN KETAHANAN OKSIDASI CAMPURAN NiCrBSi-40SiC, NiCrBSi-40WC-Co DAN Cr₃C₂-20NiCr PADA PROSES PELAPISAN HVOF**” telah selesai disusun dalam rangka memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik Mesin – Departemen Teknik Mesin – Fakultas Teknologi Industri – Institut Teknologi Sepuluh Nopember – Surabaya.

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini, penulis menyadari bahwa penyusunan ini tidak akan berhasil apabila tanpa ada bimbingan, bantuan, dukungan dan kerjasama dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua tercinta (**Bp. Heri Susanto dan Ibu. Siti Chobsah**) yang selalu memberi restu, nasihat, do'a dan dukungan.
2. Kakak dan adik (**Mas Rofiq, Mas Achyar, Dek Irma, Mbak Tutik, Mbak Wulan, Dek Zakki**) yang teramat penulis cintai yang selalu memberi restu, nasihat, do'a dan dukungan.
3. Bapak **Suwarno, S.T., M.Sc., Ph.D.**, selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang telah banyak memberi pengarahan serta bimbingan kepada penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Bapak **Dr. Eng. Budi Prawara.**, selaku Kepala Pusat Penelitian Tenaga Listrik & Mekatronik LIPI yang sekaligus sebagai pembimbing Tugas Akhir yang telah banyak memberi pengarahan serta bimbingan kepada penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Bapak **Ir. Hari Subiyanto, M.Sc., Indra Sidharta, S.T., M.Sc.**, dan **Dr. Eng. Sutikno, S.T., MT.**, selaku dosen penguji yang banyak memberikan masukan dan saran demi kesempurnaan Tugas Akhir ini.

6. **Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronik LIPI**, atas kesempatan dan fasilitas yang telah diberikan sehingga penulis dapat melaksanakan Penelitian Tugas Akhir ini.
7. Bapak **Fahmi Mubarak, S.T., M.Sc., Ph.D.**, yang telah banyak memberi pengarahan, saran serta bimbingan kepada penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
8. Bapak **Ir. Bambang Pramujati, M.Sc.Eng, Ph.D.** selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.
9. Bapak **Dr. Bambang Sudarmanta, S.T., MT.**, selaku dosen wali.
10. Seluruh Bapak dan Ibu dosen S-1 Teknik Mesin FTI-ITS yang telah membimbing penulis selama duduk di bangku perkuliahan.
11. **Pak Mantri, Pak Gatot, Pak Budi** dan **Mas Agus** atas bantuan yang telah diberikan.
12. **Pak Hendro, Pak Tito, Tante Ika** dan **Chandra Dwi Prasetyo** atas bantuan yang telah diberikan selama penulis melakukan penelitian di LIPI Bandung.
13. **Teman-teman laboratorium metalurgi dan lintas jalur angkatan 2015**, atas do'a dan dukungannya, semoga kesuksesan menyertai kita semua.
14. **Dhio Dharu Nugroho** sebagai *partner* tugas akhir atas bantuan dan kerjasamanya.

Penulis menyadari bahwa tidak ada yang sempurna di dunia ini, demikian juga dalam Tugas Akhir ini. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati penulis mengharapkan kritik dan saran dari pembaca untuk perbaikan di masa mendatang. Semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi kita semua, Amin.

Surabaya, Januari 2018

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman Judul.....	i
Lembar Pengesahan.....	iii
Abstrak	iv
<i>Abstract</i>	vi
Kata Pengantar.....	viii
Daftar Isi.....	x
Daftar Gambar.....	xiv
Daftar Tabel.....	xvi

BAB I PENDAHULUAN

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

BAB II DASAR TEORI

2.1 Penelitian Terdahulu	5
2.2 Boiler	7
2.2.1 <i>Circulating Fluidized Bed Boiler</i> (CFB)	7
2.3 Baja	9
2.3.1 Baja Karbon (<i>Plain Carbon Steel</i>)	9
2.3.2 Baja Karbon Rendah (<i>Mild Steel</i>)	10
2.4 <i>Coating</i>	11
2.4.1 <i>Thermal Spray Coating</i>	11
2.4.2 <i>High Velocity Oxy-fuel</i> (HVOF) <i>Coating</i>	13
2.5 Bahan Pelapis	16
2.5.1 Material Fasa Tunggal (<i>Single Phase Materials</i>)	17
2.5.2 Komposit dan <i>Cermet</i>	17
2.6 Persiapan Permukaan <i>Substrat</i>	18
2.6.1 Pembersihan	18
2.6.2 Pengasaran Permukaan	19

2.7 Proses Terbentuknya Lapisan dan Fenomena Tumbukan	20
2.8 Perlakuan Pacapelapisan	21
2.9 Pengujian Kekerasan	22
2.9.1 Pengujian Kekerasan Makro dan Mikro	22
2.9.2 Metode Vickers	23

BAB III METODOLOGI

3.1 Alur Proses Penelitian	25
3.2 Spesimen Uji	27
3.3 Pemilihan Material Pelapis	27
3.3.1 Feedstock Material	27
3.4 Proses Persiapan Material Pelapis	31
3.5 Persiapan Material Substrat	32
3.6 Pelapisan HVOF	35
3.7 Pengujian	39
3.7.1 Metalografi dan SEM	39
3.7.2 Pengujian Kekerasan	42
3.7.3 Pengujian Siklus Termal	44

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Kekerasan	47
4.1.1 Data Hasil Pengujian Kekerasan	48
4.1.2 Analisis dan Pembahasan Pengujian Kekerasan	49
4.2 Analisis Data Pengujian Siklus Termal	51
4.3 Pengamatan Struktur Mikro	55
4.3.1 Analisis Data Pengamatan Struktur Mikro NiCrBSi-40SiC	55
4.3.2 Analisis Data Pengamatan Struktur Mikro NiCrBSi-40WC-Co	57
4.3.3 Analisis Data Pengamatan Struktur Mikro Cr3C2-20NiCr	59

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan	63
----------------	----

5.2 Saran 63

DAFTAR PUSTAKA
BIODATA PENULIS

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Skema boiler tipe CFB.....	7
Gambar 2.2	Ilustrasi proses <i>thermal spray coating</i>	12
Gambar 2.3	Ilustrasi peralatan HVOF <i>coating</i>	15
Gambar 2.4	Perbandingan kecepatan dan temperatur partikel pada proses pelapisan HVOF, <i>plasma spray</i> dan <i>arc spray</i>	16
Gambar 2.5	Skema struktur mikro lapisan	21
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	26
Gambar 3.2	Spesimen uji	27
Gambar 3.3	Peralatan uji metalografi.....	40
Gambar 3.4	Sketsa potongan spesimen uji metalografi.....	41
Gambar 3.5	<i>Microhardness tester</i>	43
Gambar 3.6	Posisi indentasi pengujian kekerasan mikro	44
Gambar 3.7	Peralatan pengujian siklus termal	45
Gambar 4.1	Spesimen dan lokasi indentasi	47
Gambar 4.2	Grafik hasil uji kekerasan mikro	49
Gambar 4.3	Grafik hasil uji siklus termal	51
Gambar 4.4	Permukaan spesimen tanpa pelapisan setelah mengalami siklus uji thermal	52
Gambar 4.5	Permukaan spesimen ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-20NiCr}$) (a) Sebelum mengalami siklus uji termal (b) Setelah mengalami siklus uji termal.....	53
Gambar 4.6	(a) Permukaan spesimen (NiCrBSi-40SiC) (c) Spesimen (NiCrBSi-40WC-Co) setelah mengalami siklus uji termal.....	54
Gambar 4.7	Struktur mikro lapisan (NiCrBSi-40SiC) dengan perbesaran (a)50x, (b) 200x, (c) 500x	55
Gambar 4.8	Struktur mikro lapisan (NiCrBSi-40WC-Co) dengan perbesaran (a) 50x, (b) 200x, (c) 500x, (d) 1000x.....	57

Gambar 4.9	Struktur mikro lapisan spesimen ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-20NiCr}$) dengan perbesaran (a) 50x, (b) 200x, (c) 500x, (d) 1000x.....	59
Gambar 4.10	Fenomena <i>shadowing unmelts particle</i>	61
Gambar 4.11	Photo SEM morfologi partikel pelapis (a) $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-20NiCr}$, (b) NiCrBSi	62

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Perbandingan karakteristik teknik <i>thermal spray coatings</i>	13
Tabel 3.1	Komposisi kimia Diamalloy 2001	28
Tabel 3.2	Komposisi kimia WOKA 3103	29
Tabel 3.3	Komposisi kimia WOKA 7102	30
Tabel 3.4	Proses persiapan material pelapis	31
Tabel 3.5	Proses persiapan material substrat	33
Tabel 3.6	Proses pelapisan HVOF.....	35
Tabel 4.1	Hasil pengujian kekerasan	48

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Boiler adalah salah satu komponen utama pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas-Uap (PLTGU) yang berfungsi menghasilkan uap panas yang digunakan untuk menggerakkan turbin uap. Salah satu jenis boiler yang sering digunakan pada pembangkit listrik di Indonesia adalah boiler tipe *circulating fluidized bed* (CFB). Sistem kerja boiler tipe CFB adalah dengan membakar bahan bakar fosil dalam tungku yang dioperasikan di bawah kondisi hidrodinamik khusus: dimana batu bara (diameter rata-rata 10 mm) yang dicampur dengan pasir kuarsa dibakar di atas papan (*bed*) dan diberi hembusan udara dari sisi bawah. Temperatur pembakaran pada tungku boiler tipe CFB berkisar antara 800–900°C serta beroperasi pada lingkungan yang *erosive*. Kondisi kerja tersebut sering mengakibatkan terjadinya proses degradasi pada komponen yang terdapat di dalam tungku boiler, salah satunya adalah komponen *water wall tube*. Proses degradasi yang sering terjadi diantaranya adalah pengikisan atau erosi dan oksidasi temperatur tinggi. Permasalahan ini menjadi salah satu penyebab utama terjadinya kerusakan pada boiler. Selain itu biaya pemeliharaan untuk penggantian komponen yang rusak juga sangat tinggi dan apabila kerusakan ini tidak segera ditangani akan mengakibatkan keseluruhan sistem pada pembangkit listrik berhenti bekerja. Oleh karena itu, penelitian dan pengembangan sistem perlindungan erosi dan oksidasi temperatur tinggi pada *water wall tube* adalah topik yang sangat penting, baik ditinjau dari sudut pandang teknik maupun ekonomi.

Pengikisan dan oksidasi temperatur tinggi pada *water wall tube* disebabkan oleh terjadinya tumbukan antara partikel *erosive* berupa partikel batu bara yang tidak terbakar, pasir kuarsa, dan abu (*fly ashes*) yang disertai partikel karbon dengan permukaan *water wall tube*. Pada saat terjadi tumbukan partikel *erosive* akan bergesekan dengan permukaan *water wall tube* serta sebagian akan

menempel di permukaan dan lama-kelamaan akan mengendap. Jika kondisi tersebut berlangsung terus-menerus pada temperatur tinggi maka akan terjadi reaksi kimia pada endapan, hal ini bisa menyebabkan terbentuknya *oxide scales* pada permukaan *water wall tube* yang akan berakibat pada terjadinya degradasi atau penurunan kualitas material dan bisa mengakibatkan kebocoran. Salah satu cara yang bisa dilakukan untuk mengatasi permasalahan ini adalah dengan mengaplikasikan pelapisan dengan jenis pelapisan tahan aus dan oksidasi (*wear and oxidation resistant coatings*) yang memiliki konduktifitas termal yang baik, seperti *High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) coating* dengan menggunakan bahan pelapis berupa *ceramic carbide-metal (cermet) alloys*.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dituliskan, maka permasalahan dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh campuran NiCrBSi-40SiC, NiCrBSi-40WC-Co dan Cr₃C₂-20NiCr terhadap struktur mikro, nilai kekerasan dan ketahanan oksidasi temperatur tinggi pada proses pelapisan HVOF.

1.3 Batasan Masalah

Supaya penelitian dapat berjalan secara fokus dan terarah, serta dapat mencapai tujuan yang diinginkan, diberikan batasan masalah sebagai berikut:

1. Material substrat yang digunakan adalah plat baja karbon rendah, diasumsikan memiliki komposisi yang homogen.
2. Parameter proses pelapisan berupa jarak penyemprotan, laju aliran dan tekanan gas (*oxygen, fuel gas* dan *nitrogen carrier gas*) dianggap konstan.
3. Kondisi permukaan substrat sebelum dilakukan proses pelapisan dianggap bersih dan terbebas dari kontaminasi.
4. Kondisi lingkungan saat proses pelapisan dianggap stabil.

5. Temperatur permukaan substrat pada saat proses pelapisan dijaga di bawah 200°C.
6. Alat uji yang digunakan untuk pengujian dan pengambilan data dianggap berfungsi dengan baik.

1.4 Tujuan Penelitian

Sesuai dengan rumusan masalah yang tertera, maka tujuan penelitian ini adalah:

1. Mengetahui struktur mikro serta karakteristik lapisan berupa kepadatan, porositas, dan kualitas ikatan yang dihasilkan dari proses pelapisan HVOF dengan variasi bahan pelapis NiCrBSi-40SiC, NiCrBSi-40WC-Co dan Cr₃C₂-20NiCr
2. Mengetahui nilai kekerasan lapisan yang dihasilkan dari proses pelapisan HVOF dengan variasi bahan pelapis NiCrBSi-40SiC, NiCrBSi-40WC-Co dan Cr₃C₂-20NiCr
3. Mengetahui pengaruh proses pelapisan HVOF dengan variasi bahan pelapis NiCrBSi-40SiC, NiCrBSi-40WC-Co dan Cr₃C₂-20NiCr terhadap ketahanan oksidasi temperatur tinggi pada permukaan material jika dibandingkan dengan material asli tanpa pelapisan

1.5 Manfaat Penelitian

Dari hasil penelitian ini diharapkan mampu memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Menambah pengetahuan pembaca maupun penulis tentang proses pelapisan khususnya proses pelapisan menggunakan peralatan HVOF.
2. Dapat digunakan sebagai referensi dalam mengatasi permasalahan keausan dan oksidasi temperatur tinggi yang sering terjadi pada komponen *water wall tube* dalam suatu Pembangkit Listrik Tenaga Gas-Uap (PLTGU).

Dapat digunakan sebagai acuan dalam penelitian selanjutnya dalam bidang pelapisan tahan aus dan oksidasi

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu ini menjadi salah satu acuan penulis dalam melakukan penelitian sehingga penulis dapat memperkaya teori yang digunakan dalam mengkaji penelitian yang dilakukan. Berikut ini penelitian yang digunakan sebagai acuan:

-) **B. Prawara, dkk**, “*Wear and impact resistance of HVOF sprayed ceramic matrix composites coating*”. Dalam jurnal ini B. Prawata dkk meneliti tentang bagaimana pengaruh HVOF *sprayed coating* yang menggunakan bahan pelapis *ceramic matrix composites* (CMC) berupa campuran Cr_3C_2 dan $NiAl-Al_2O_3$ dengan variasi ukuran partikel $NiAl$ terhadap ketahanan impak dan keausan lapisan. Hasil yang diperoleh yaitu performa maksimal dalam hal ketahanan impak, keausan, dan kekerasan didapat pada pelapisan dengan menggunakan bahan pelapis Cr_3C_2 yang memiliki ukuran partikel $NiAl$ sebesar $-38\mu m$.

-) **Guan-Jun Yang, dkk**, “*High-Temperature Erosion of HVOF Sprayed Cr_3C_2-NiCr Coating and Mild Steel for Boiler Tubes*”. Dalam jurnal ini Guan-Jun Yang, dkk membahas tentang bagaimana karakteristik erosi temperatur tinggi (*high-temperature erosion*) dari komponen *boiler tubes* berbahan dasar *mild steel* yang telah mengalami proses pelapisan HVOF dengan bahan pelapis berupa Cr_3C_2-NiCr . Pada penelitian ini juga membandingkan hasil pengujian erosi temperatur tinggi pada material *mild steel* tanpa pelapisan dengan yang telah mengalami proses pelapisan HVOF. Hasil yang diperoleh yaitu bahwa dalam pengujian erosi temperatur tinggi pada material tanpa pelapisan, laju erosi meningkat secara signifikan seiring dengan peningkatan temperatur pengujian. Sedangkan dari hasil pengujian erosi pada material yang telah mengalami proses

pelapisan HVOF didapat hasil nilai laju erosi temperatur tinggi lebih yang rendah jika dibandingkan dengan material tanpa pelapisan, sehingga dapat disimpulkan bahwa ketahanan erosi temperatur tinggi pada material yang telah mengalami proses pelapisan HVOF dengan partikel penguat berupa $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ lebih baik.

) **V. Higuera Hidalgo, dkk**, “*A comparative study of high-temperature erosion wear of plasma-sprayed NiCrBSiFe and WC-NiCrBSiFe coatings under simulated coal-fired boiler conditions*”. Dalam jurnal ini V. Higuera Hidalgo, dkk meneliti dan membandingkan nilai ketahanan korosi, ketahanan oksidasi temperatur tinggi dan ketahanan aus dari lapisan yang menggunakan dua macam bahan pelapis yang berbeda yaitu NiCrBSiFe dan NiCrBSiFe-WC. Pengujian yang dilakukan diantaranya adalah pengujian kekerasan dan pengujian siklus termal dengan menggunakan peralatan yang disimulasikan sesuai dengan kondisi kerja boiler. Hasil yang diperoleh yaitu nilai kekerasan lapisan yang menggunakan bahan pelapis berupa WC-NiCrBSiFe lebih tinggi jika dibandingkan dengan yang menggunakan bahan pelapis berupa NiCrBSiFe. Akan tetapi, dari hasil pengujian siklus termal didapatkan hasil lapisan yang menggunakan bahan pelapis berupa NiCrBSiFe mempunyai ketahanan oksidasi yang lebih baik. Hal tersebut dapat terlihat dari grafik hasil pengujian yang menunjukkan bahwa penambahan berat karena oksidasi (munculnya *oxide scale*) seiring dengan peningkatan temperatur dan waktu pengujian pada lapisan yang menggunakan bahan pelapis berupa NiCrBSiFe tidak sebesar pada lapisan yang menggunakan bahan pelapis berupa NiCrBSiFe-WC.

2.2 Boiler

Boiler adalah salah satu komponen utama pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas-Uap (PLTGU) yang berfungsi menghasilkan uap panas yang digunakan untuk menggerakkan turbin uap. Menurut metode pembakaran yang digunakan, *boiler* dibagi menjadi tiga klasifikasi jenis, yaitu: *fixed bed combustion boiler*, *pulverized coal combustion boiler* (PCC), dan *circulating fluidized bed boiler* (CFB).

2.2.1 *Circulating Fluidized Bed Boiler* (CFB)

Circulating fluidized bed boiler (CFB) adalah alat untuk menghasilkan uap dengan membakar bahan bakar fosil dalam tungku yang dioperasikan di bawah kondisi hidrodinamik khusus: dimana batu bara (diameter rata-rata 10 mm) dibakar diatas papan (*bed*) dan diberi hembusan udara dari sisi bawah. Kondisi ini akan menghasilkan pembakaran bahan bakar yang lebih sempurna karena posisi batu bara selalu berubah dan terjadi sirkulasi batu bara yang belum habis terbakar dari tungku ke *cyclone* kemudian masuk ke *seal pot* dan kembali ke tungku. Skema kerja boiler tipe CFB dapat dilihat pada **Gambar 2.1**.



Gambar 2.1. Skema kerja boiler tipe CFB [1]

Terdapat tiga bagian utama pada boiler tipe CFB, diantaranya adalah:

1. Tungku, berfungsi sebagai tempat terjadinya pembakaran bahan bakar berupa batu bara. Komponen yang terdapat pada tungku diantaranya adalah: *water wall tube*, panel *evaporator*, dan panel *superheater*.
2. *Cyclone*, berfungsi sebagai separator *flue gas* untuk di teruskan ke *electrostatic presipitator* (ESP) dan partikel yang tidak terbakar (*ash*) untuk dikembalikan ke tungku (proses sirkulasi). Komponen yang terdapat pada *cyclone* diantaranya adalah: *cyclone*, *seal pot*, dan *seal pot dutch*.
3. *Back pass*, berfungsi sebagai ruang pemanfaatan kalor yang terdapat dalam *flue gas*. Komponen yang terdapat pada *back pass* diantaranya adalah: *finishing superheater*, *low temperature superheater*, *economizer*, dan *tubular air heater*.

Temperatur pembakaran pada boiler tipe CFB berkisar antara 800-900 . Pada saat proses pembakaran yang disertai dengan penghembusan udara sering terjadi turbulensi yang mengakibatkan terjadinya tumbukan antara partikel *abrasive* berupa partikel batu bara yang tidak terbakar sempurna (*fly ashes*) yang disertai partikel karbon dengan permukaan *water wall tube*. Tumbukan tersebut akan menyebabkan terjadinya abrasi dan oksidasi temperatur tinggi pada permukaan *water wall tube*. Pada saat terjadi tumbukan partikel *erosive* akan menempel pada permukaan *water wall tube* dan lama-kelamaan akan mengendap. Jika kondisi tersebut berlangsung terus-menerus pada temperatur tinggi maka akan terjadi reaksi kimia pada endapan, hal ini bisa menyebabkan terbentuknya *oxide scales* pada permukaan *water wall tube* yang akan berakibat pada terjadinya degradasi atau penurunan kualitas material dan bisa mengakibatkan kebocoran. Jika terjadi kebocoran pada *water wall tube*, sistem pada boiler akan berhenti bekerja serta akan membutuhkan biaya yang tinggi

jika dilakukan perbaikan, sehingga dibutuhkan penelitian dan pengembangan sistem perlindungan abrasi dan oksidasi temperatur tinggi pada *water wall tube*. Salah satu cara yang bisa dilakukan untuk mengatasi permasalahan ini adalah dengan mengaplikasikan pelapisan dengan jenis pelapisan tahan aus dan oksidasi (*wear and oxidation resistant coatings*) yang memiliki konduktifitas termal yang baik, seperti *High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) coating* dengan menggunakan bahan pelapis berupa *ceramic carbide-metal (cermet) alloys*.

2.3 Baja

Baja adalah suatu logam paduan dengan unsur utama besi (Fe) dan unsur paduan karbon (C) dimana kadar karbon dalam paduan tidak lebih dari 2% berat totalnya [1]. Baja merupakan material logam yang paling banyak digunakan, dikarenakan ketersediaan bahan baku yang melimpah di alam serta dapat diproduksi dalam jumlah besar dengan spesifikasi yang sangat tepat dan dengan harga yang relatif murah. Karena alasan tersebut baja sering digunakan sebagai material utama dalam suatu konstruksi.

Baja mempunyai rentang sifat mekanik yang sangat baik, mulai dari tingkat kekuatan luluh sedang (200-300 MPa atau 30-40 ksi) dengan keuletan sangat baik, sampai tingkat kekuatan luluh tinggi (lebih dari 1.400 MPa atau 200 ksi) [2]. Berdasarkan komposisi kimianya, baja diklasifikasikan menjadi 2 bagian utama, yaitu baja dengan unsur paduan karbon saja atau sering disebut dengan baja karbon (*plain carbon steel*) dan baja dengan unsur paduan lebih dari satu jenis disebut dengan baja paduan (*alloy steel*).

2.3.1 Baja Karbon (*Plain Carbon Steel*)

Baja karbon adalah baja dengan paduan utama karbon dan sedikit unsur yang lain. Berdasarkan jumlah kadar karbon yang menyusun, baja karbon dapat diklasifikasikan menjadi tiga, yaitu baja karbon rendah dengan jumlah kadar karbon maksimal 0.3 %,

baja karbon menengah dengan jumlah kadar karbon 0.3% - 0.6% dan baja karbon tinggi dengan jumlah kadar karbon 0.6% - 1% [2].

Baja karbon rendah memiliki sifat mekanik paling mampu pemesanan, dan pengelasan, aplikasi baja ini antara lain digunakan pada komponen mobil, konstruksi bangunan, material pipa dan *tube*. Baja karbon menengah memiliki sifat mekanik berupa kekuatan dan keuletan yang seimbang, serta ketahanan aus yang baik, aplikasi baja karbon menengah antara lain digunakan pada roda kereta, *crank shaft*, dan elemen mesin lainnya yang membutuhkan kombinasi kekuatan yang baik, ketahanan aus, dan ketangguhan. Baja karbon tinggi memiliki sifat mekanik kekuatan dan kekerasan yang paling baik, dan sedikit keuletan, baja karbon tinggi sebagian besar digunakan sebagai *tool steel*, alat-alat potong, *dies*, mata gergaji, dll [3].

Kekurangan dari baja karbon adalah terjadinya penurunan kekuatan seiring dengan naiknya temperatur kerja, mempunyai ketahanan impak yang buruk, serta mempunyai ketahanan korosi dan ketahanan oksidasi pada temperatur tinggi yang buruk. Akan tetapi kekurangan dari baja karbon tersebut dapat dihilangkan dengan beberapa cara, diantaranya dengan menambahkan unsur paduan, melakukan perlakuan panas, atau memberikan pelapisan (*coating*).

2.3.2 Baja Karbon Rendah (*Mild Steel*)

Baja jenis ini memiliki kadar karbon maksimal 0.25% C dengan kira-kira 0.4 sampai 0.7% Mn, 0.1 sampai 0.5% Si, dan beberapa persen sulfur dan phosphorus sebagai elemen tambahan. Karena mempunyai kadar karbon yang relatif rendah maka baja jenis ini mempunyai sifat mampu pemesis dan mampu bentuk yang baik, sehingga banyak digunakan pada komponen mobil, konstruksi bangunan, material pipa dan *tube*. ASTM A 283 grade D dan ASTM A 36 merupakan baja *mild steel* yang paling sering digunakan untuk konstruksi dan pemesanan.

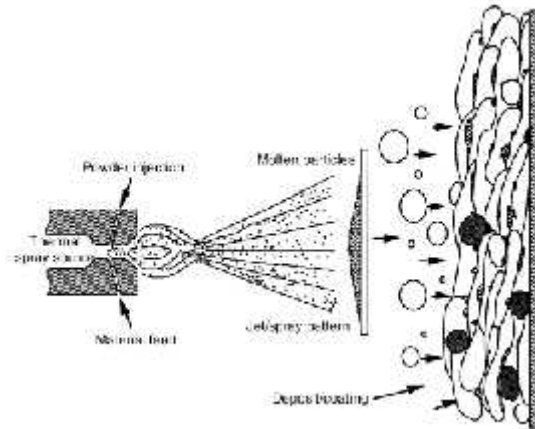
Sedangkan ASTM A 210 A merupakan baja *mild steel* yang biasa digunakan pada komponen *water wall tube boiler*.

2.4 Coating

Coating dapat diartikan sebagai tindakan teknis berupa pelapisan permukaan dengan tujuan meningkatkan kemampuan permukaan terhadap keausan, korosi, degradasi termal, dan fenomena permukaan lainnya [4]. Terdapat beberapa metode pelapisan diantaranya adalah *continuous hot dip coatings*, *continuous electrodeposition coating*, *batch hot dip galvanized coatings*, *babbiting*, *phosphate coatings*, *chromate conversion coatings*, *painting*, *ceramic coatings and linings*, dan *thermal spray coatings*. Kualitas lapisan yang baik dan dapat diterima biasanya ditandai dengan hasil lapisan yang mempunyai kekerasan yang tinggi, mempunyai pelekatan atau adesi yang baik, mempunyai struktur lapisan yang padat serta mempunyai porositas rendah [5].

2.4.1 Thermal Spray Coatings

Thermal spray coatings adalah istilah yang umum digunakan untuk menggambarkan suatu proses dimana *metallic*, *ceramic*, *cermet*, dan polimer dalam bentuk serbuk, batang, ataupun kawat yang dimasukkan kedalam *torch* atau alat penembak yang kemudian dipanaskan sampai mendekati titik lebur atau sedikit diatas titik leburnya kemudian dipercepat atau diakselerasi dengan menggunakan aliran gas dan diproyeksikan secara langsung ke permukaan yang akan dilapisi (*substrat*). Akibatnya akan terbentuk *droplets* yang berperan sebagai deposit yang akan menempel pada permukaan substrat, dan apabila dilakukan penyemprotan terus menerus secara berlapis akan terbentuk struktur lapisan lamela yang saling tumpang tindih dan arahnya mengikuti kontur permukaan [4]. Ilustrasi dari proses *thermal spray coatings* dapat dilihat pada **Gambar 2.2**.



Gambar 2.2. Ilustrasi proses *thermal spray coatings* [2].

Seperti teknik pelapisan pada umumnya, *thermal spray coatings* juga memiliki kelebihan dan kekurangan. Diantara kelebihanannya adalah jenis material atau partikel pelapis yang bisa digunakan sangat beragam, mulai dari metal, *alloys*, karbida, oksida dan non-oksida keramik, keramik, *refractory metals*, plastik, *cermets*, dan komposit. Hampir semua material yang mampu meleleh tanpa mengalami perubahan komposisi dapat digunakan sebagai bahan pelapis. Kelebihan selanjutnya adalah proses pelapisan dapat dilakukan pada temperatur yang relatif rendah (*low heat input*), sehingga proses pelapisan dapat diaplikasikan dengan baik tanpa mengubah sifat mekanik dan dimensi asli dari material yang dilapisi. Kelebihan lainnya adalah kemampuannya untuk dilakukan pelapisan ulang (*recoating*) jika terjadi kerusakan. Sedangkan kekurangan dari *thermal spray coatings* adalah hanya mampu diaplikasikan pada bagian permukaan yang terjangkau oleh *torch*, sehingga untuk material yang memiliki ukuran kecil dan bentuk yang rumit seperti rongga akan sulit untuk dilakukan.

Menurut sumber energi yang digunakan proses *thermal spray coatings* dapat dikategorikan menjadi *flame spray*, *electric*

arc spray, dan *plasma arc spray coating*. Sedangkan menurut karakteristik prosesnya *thermal spray coatings* dapat dikategorikan menjadi *powder flame spray*, *wire flame spray*, *ceramic rod spray*, *two-wire electric arc*, *nontransferred arc plasma*, *high-velocity oxyfuel*, *detonation gun*, dan *transferred arc plasma* [4]. Perbandingan karakteristik dari masing-masing teknik *thermal spray coatings* dapat dilihat pada **Tabel 2.1**.

Tabel 2.1. Perbandingan karakteristik teknik *thermal spray coatings* [4]

Process	Gas flow		Flame or exit plasma temperature		Particle impact velocity	
	m/h	ft/h	°C	°F	m/s	ft/s
Flame powder	11	400	2200	4000	30	100
Flame wire	71	2500	2800	5000	180	600
High-velocity oxyfuel	28-57	1000-2000	3100	5600	610-1060	2000-3500
Detonation gun	11	400	3900	7000	910	3000
Wire arc	71	2500	5500	10,000	240	800
Conventional plasma	4.2	150	5500	10,000	240	800
High-energy plasma	17-28	600-1000	8300	15,000	240-1220	800-4000
Vacuum plasma	8.4	300	8300	15,000	240-610	800-2000

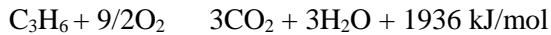
(a) 1 (low) to 10 (high). (b) ppm levels. Source: Ref 3

2.4.2 High Velocity Oxy-fuel (HVOF) Coating

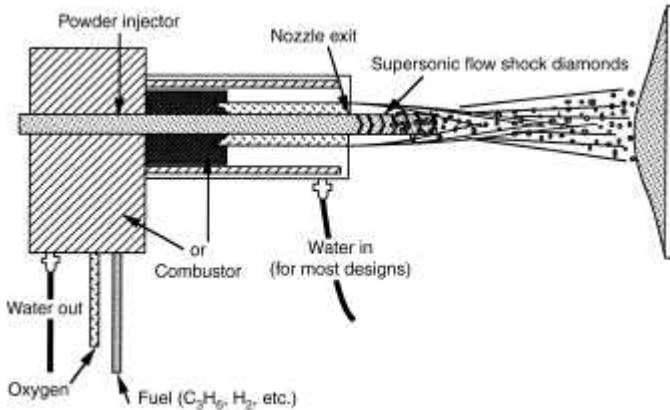
Proses HVOF *coating* diciptakan pada tahun 1958 oleh Union Carbida (sekarang menjadi Praxair Surface Technologies, Inc.) akan tetapi proses ini masih belum terlalu populer sampai pada awal tahun 1980an proses HVOF *coating* mulai diperkenalkan oleh James Browning (Deloro Stellite, Goshen, IN) [4].

Prinsip kerja proses HVOF *coating* adalah sebagai berikut: campuran oksigen dengan bahan bakar yang memiliki volume pembakaran tinggi (*hydrogen*, *prophylene* (C_3H_6), *propane* (C_3H_8), *ethylane* (C_3H_2), *acetylene*, *methyl acetylene-propadiene*

mixture (MAPP) dan *kerosene*) dimasukkan kedalam ruang bakar. Dari proses pembakaran antara bahan bakar dengan oksigen dihasilkan nyala api atau *flame* yang kemudian dialirkan melewati lengan *nozzle* sepanjang 8 sampai 30 cm. Secara bersamaan serbuk partikel sebagai bahan pelapis (*feedstock materials*) diinjeksikan secara aksial ataupun radial melewati ruang bakar dan *nozzle*. Saat keluar *nozzle* serbuk partikel akan bercampur dengan *flame* hasil pembakaran yang memiliki temperatur dan kecepatan tinggi (temperatur 1000 sampai 2000 °C dan kecepatan 610 sampai 1060 m/s) sehingga dihasilkan *flame* partikel deposit berkecepatan tinggi yang sering disebut dengan *high-pressure flame/jet*. Stoikiometri dari campuran bahan bakar dengan oksigen sangat berpengaruh terhadap reaksi pembakaran. Contoh stoikiometri reaksi propylene dengan oksigen ditunjukkan pada persamaan berikut:



Terdapat dua kelas yang berbeda pada peralatan HVOF *coating* yang dibedakan menurut tekanan pada ruang bakar. Kelas yang pertama adalah *high velocity*, dengan karakteristik tekanan pada ruang bakar lebih dari 241 kPa (35 psi) dan memiliki *heat input* sebesar 527 MJ (500,000 Btu). Sedangkan kelas yang kedua disebut sebagai *hypervelocity*, beroperasi pada tekanan 620 sampai 827 kPa (90 sampai 120 psi) dengan *heat input* sebesar ~1 GJ (~1 MBtu) [4].



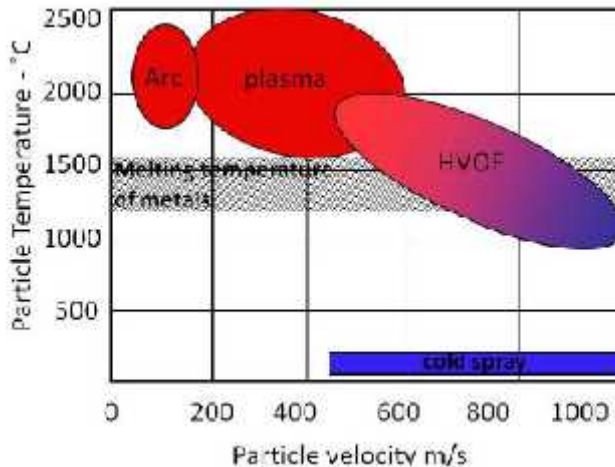
Gambar 2.3. Ilustrasi peralatan HVOF *coating* [4].

Ilustrasi peralatan HVOF *coating* dapat dilihat pada **Gambar 2.3**. Terdapat beberapa hal penting yang ada pada peralatan HVOF *coating*, diantaranya adalah:

-) HVOF *spray gun* yang terdiri dari *torch body*, ruang pembakaran (*combustion chamber*), *powder injector*, dan *nozzle*.
-) Oksigen, *fuel gas*, *carrier gas*, selang gas bertekanan tinggi, dan regulator untuk mengatur laju aliran dan tekanan oksigen dan gas pembakaran.
-) Lintasan untuk aliran udara atau cairan pendingin.
-) Bak penampung serbuk partikel pelapis.
-) *Safety interlocks* dan panel kontrol.

Kecepatan gas yang dihasilkan pada proses HVOF *coating* jauh lebih tinggi jika dibandingkan dengan proses *thermal spraying* lainnya, hal ini ditujukan untuk meningkatkan kepadatan hasil pelapisan (*coating density*) dan pelekatan (*coating adhesion*) yang lebih baik. Temperatur rata-rata partikel yang dihasilkan pada proses HVOF *coating* relatif lebih rendah jika dibandingkan dengan proses *thermal spraying* lainnya,

misalnya *plasma spray*, hal ini berakibat pada turunnya derajat pelelehan dan oksidasi partikel. Akan tetapi meskipun HVOF *coating* mempunyai rata-rata temperatur partikel rendah, namun akibat dari tingginya kecepatan partikel pada saat tumbukan struktur deposit lapisan yang padat masih mungkin untuk didapatkan, bahkan karena mempunyai rata-rata temperatur partikel rendah perubahan komposisi partikel menjadi lebih sedikit [4]. Perbandingan kecepatan dan rata-rata temperatur partikel yang digunakan pada proses pelapisan HVOF, *plasma spray* dan *arc spray* dapat dilihat pada **Gambar 2.4**.



Gambar 2.4. Perbandingan kecepatan dan temperatur partikel pada proses pelapisan HVOF, *plasma spray* dan *arc spray* [3].

2.5 Bahan Pelapis

Terdapat dua jenis bahan pelapis yang bisa digunakan pada proses HVOF *coating*, yaitu:

1. *Single-phase materials*, seperti metal, alloy, *intermetallic*, keramik, dan polimer.

2. Bahan komposit, seperti *ceramic-metallic* atau sering disebut *cermet* berupa (WC/Co, Cr₃C₂/NiCr, NiCrAlY/Al₂O₃ dll), *reinforced material*, dan *reinforced polimer*.

2.5.1 Material Fasa Tunggal (*Single Phase Materials*)

Metal dan Alloy, berupa metal murni ataupun campuran. Beberapa jenis bahan metal dan alloy yang sering digunakan pada proses HVOF *coating* diantaranya adalah *tungsten, molybdenum, rhenium, niobium, superalloys, zinc, aluminum, bronze, mild steel* ataupun *stainless steels, NiCr alloys, cobalt-base Stellites, cobalt/nickel-base Triballoys, dan NiCrBSi alloys*. Bahan pelapis jenis ini mempunyai kelebihan yaitu mempunyai kesamaan karakter dengan kebanyakan material *substrat*, selain itu juga memiliki kekuatan yang tinggi serta mempunyai ketahanan korosi, ketahanan aus, dan ketahanan oksidasi yang cukup baik. Kebanyakan aplikasi bahan pelapis ini adalah pada bidang otomotif (*diesel engine cylinder coatings, piston rings* atau *valve stems*), pada *turbine engine (blades, vanes, dan combustors)*, pada petrokimia (pompa dan valve), serta pada industri pertambangan.

Keramik, sebagian besar material keramik bisa diaplikasikan sebagai bahan pelapis pada proses HVOF *coating*, diantaranya adalah oksida metalik (Al₂O₃, ZrO₂, TiO₂, Cr₂O₃, dan MgO), karbida (Cr₃C₂, TiC, Mo₂C, dan SiC), dan nitrida (TiN dan Si₃N₄). Sedangkan jika dikategorikan sesuai fungsi dan kegunaannya bahan pelapis keramik dapat dikategorikan menjadi; fungsi ketahanan aus (Al₂O₃, Cr₂O₃, TiO₂, Cr₃C₂, TiC, Mo₂C, dan TiN), fungsi perlindungan panas (Al₂O₃, ZrO₂, dan MgO), fungsi isolasi listrik (Al₂O₃, TiO₂, dan MgO), dan fungsi tahan korosi [4].

2.5.2 Komposit dan *Cermet*

Cermet atau *ceramic-metallic* (biasanya berupa karbida atau metal oksida) adalah bahan pelapis berupa komposit yang

terdiri dari karbida yang memiliki fasa keras dan atau partikel oksida metal yang tersebar dalam matrix metalik. Karbida memberikan pengaruh pada nilai kekerasan yang tinggi sedangkan binder metalik berkontribusi meningkatkan ketangguhan dan mampu guna cermet untuk digunakan pada temperatur yang sangat tinggi. Bahan pelapis berupa WC/Co, WC/CoCr, Cr₃C₂/NiCr, NiCrBSi/SiC, dan TiC/NiCr merupakan beberapa jenis bahan pelapis *cermet* yang banyak digunakan pada proses pelapisan HVOF khususnya untuk aplikasi temperatur tinggi.

2.6 Persiapan Permukaan *Substrat*

Persiapan permukaan *substrat* berupa pembersihan dan pengasaran permukaan merupakan salah satu tahapan yang paling penting dalam proses HVOF *coating*, karena mempunyai hubungan secara langsung dengan pelekatan lapisan (*coating adhesion*). Jenis material pelapis dan jenis *substrat* yang digunakan akan mempengaruhi teknik pembersihan dan pengasaran yang digunakan.

2.6.1 Pembersihan

Tahapan pertama yang dilakukan pada persiapan permukaan adalah membersihkan permukaan dari kontaminan seperti kerak, oli, karat, *grease*, dan cat. Setelah semua kontaminan dibersihkan maka kebersihan permukaan harus terus dijaga sampai proses penyemprotan selesai dilakukan. Permukaan harus terhindar dari debu dan sidik jari. Terdapat beberapa teknik pembersihan yang biasa digunakan, diantaranya adalah:

1. ***Vapor Degreasing***, dengan cara merendam material didalam larutan *solvent degreaser* berupa *perchlorethylene*, *trichlorethylene* atau *trichorethane* selama 15 sampai 30 menit. Teknik ini banyak digunakan karena lebih ekonomis dan efisien.

2. **Vapor Blasting**, dengan cara menyemprotkan larutan *abrasive* berupa *aluminum oxide*, *novaculite*, atau *garnet flour* yang dicampur dengan air ke permukaan material yang akan dibersihkan. *Vapor blasting* biasanya digunakan untuk menghilangkan serbuk gerinda yang menempel pada permukaan, membersihkan karat yang menempel, dan menghilangkan lapisan yang sebelumnya pernah dilakukan.
3. **Acid Pickling**, dengan cara merendam material kedalam larutan asam berupa 1% *hydrochloric* atau 10% *acetic acid* selama beberapa saat.

2.6.2 Pengasaran Permukaan

Pengasaran sangat penting untuk dilakukan, karena pada tahap ini akan menentukan kekuatan dari ikatan lapisan yang dihasilkan. Beberapa teknik pengasaran yang umum dilakukan diantaranya adalah:

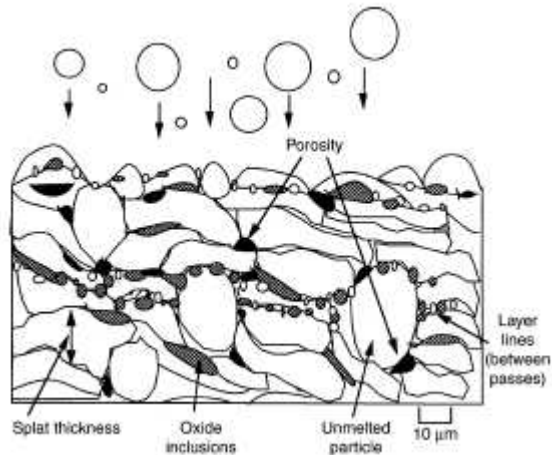
1. **Abrasive Grit Blasting**, dengan cara menyemprotkan partikel *abrasive* berupa serbuk alumina, *chilled iron*, *angular steel*, *silicon carbide*, ataupun garnet dengan tekanan dan kecepatan tertentu ke permukaan material. Ukuran grit partikel *abrasive* yang digunakan disesuaikan dengan luas permukaan dan ketebalan dari material yang akan dilapisi. Semakin luas dan semakin tebal maka ukuran grit yang digunakan akan semakin besar. Pada penelitian ini pengasaran dengan teknik *abrasive grit blasting* dilakukan menggunakan partikel *abrasive* berupa serbuk alumina dengan grit 24. Selain untuk tujuan pengasaran, *abrasive grit blasting* juga bisa digunakan sebagai sarana pembersihan, karena partikel *abrasive* yang disemprotkan akan mengikis sisa kontaminan yang masih menempel pada permukaan material.
2. **Macroroughening**, dengan cara menggunakan mesin gerinda untuk mengkasarkan permukaan. Teknik ini relatif

mudah untuk dilakukan, akan tetapi perlu kehati-hatian agar permukaan material tidak tergores terlalu dalam.

2.7 Proses Terbentuknya Lapisan dan Fenomena Tumbukan

Jika dilihat dari interaksi yang terjadi antara partikel dengan permukaan substrat, tahap pembentukan lapisan dapat diurutkan sebagai berikut:

- 1) **Tumbukan partikel dengan substrat**, pembentukan lapisan dimulai dari *in-flight particles* atau sering disebut *droplets* (yang berperan sebagai deposit) yang menumbuk permukaan *substrat*. Pada saat tumbukan, *droplets* dapat berbentuk cair dan atau cair sebagian, sedangkan partikel yang masih berbentuk padat akan terpantul ataupun menempel lemah didalam lapisan, hal ini akan menyebabkan terjadinya porositas dan menyebabkan turunnya ketangguhan dari lapisan.
- 2) **Perataan, solidifikasi, dan ikatan partikel dengan permukaan substrat**, setelah terjadi tumbukan, pada permukaan substrat akan terbentuk *splat* (pembentukan lapisan pertama), kemudian *splat* akan merata dan terjadi proses solidifikasi, setelah itu akan terbentuk ikatan antara *splat* dengan permukaan substrat.
- 3) **Pembentukan lapisan**, apabila dilakukan pelapisan secara terus menerus maka akan terbentuk struktur lapisan lamela yang saling tumpang tindih. Skema struktur mikro lapisan dapat dilihat pada **Gambar 2.5**.



Gambar 2.5. Skema struktur mikro lapisan [2].

2.8 Perlakuan Pascapelapisan

Perlakuan pascapelapisan penting dilakukan guna mendapatkan hasil akhir lapisan yang optimal (mempunyai struktur lapisan yang padat, mempunyai porositas rendah, dan memiliki kohesi antar partikel yang baik) serta memastikan dimensi akhir dari material. Untuk memastikan dimensi akhir material biasanya dilakukan proses pembubutan, penggerindaan, dan juga proses pemolesan. Sedangkan salah satu metode yang sering digunakan untuk mendapatkan hasil akhir lapisan yang optimal adalah dengan metode fusi. Prosedur fusi yang digunakan pada penelitian ini adalah dengan melakukan penyemprotan *flame* ke permukaan lapisan setelah proses pelapisan selesai dilakukan, penyemprotan *flame* dilakukan sebanyak satu kali siklus. Lapisan yang telah dilakukan proses fusi akan mempunyai karakteristik sebagai berikut:

-) Mempunyai tingkat kepadatan yang tinggi, *impermeable*, dan mempunyai ikatan mekanik dengan *substrat* (*mechanical bonding*)

-)] Biasanya mempunyai nilai kekerasan yang lebih tinggi, karena lapisan semakin padat.
-)] Mempunyai ketahanan korosi yang lebih baik serta mempunyai nilai kekerasan panas yang tinggi (*high hot hardness*).
-)] Selama proses fusi lapisan akan mengalami penyusutan sekitar 10 sampai 20% yang berakibat pada menutupnya porositas yang ada di lapisan, sehingga lapisan akan semakin padat.

2.9 Pengujian Kekerasan

Kekerasan didefinisikan dalam arti konvensional sebagai ketahanan material terhadap deformasi, goresan, dan pengikisan atau erosi ketika terjadi indentasi. Sifat ini berkaitan dengan sifat tahan aus (*wear resistance*). Prinsip uji kekerasan pada dasarnya adalah dengan melakukan indentasi atau pembebanan pada sampel dengan indenter yang keras berupa bola, kerucut atau piramida. Pengujian kekerasan dapat diklasifikasikan dengan menggunakan beberapa kriteria, diantaranya dengan melihat jenis pengukuran yang digunakan (pengukuran bidang kontak atau pengukuran kedalaman kontak), besarnya nilai pembebanan, dan sifat pengujian (statis, dinamis, atau dengan penggoresan). Jika dilihat dari jenis pengukuran yang digunakan, pengujian kekerasan dapat diklasifikasikan menjadi pengujian Brinell, Knoop, Vickers (pengukuran bidang kontak) serta pengujian Rockwell (pengukuran kedalaman kontak). Sedangkan jika dilihat dari besarnya nilai pembebanan yang digunakan, pengujian kekerasan dapat diklasifikasikan menjadi pengujian kekerasan mikro (*microhardness test*) dan pengujian kekerasan makro (*macrohardness test*) [6].

2.9.1 Pengujian kekerasan makro dan mikro

Pada pengujian kekerasan makro nilai pembebanan yang digunakan adalah lebih besar dari 1 kgf. Nilai pembebanan yang digunakan pada pengujian kekerasan makro dengan

menggunakan metode Vickers adalah 1 sampai 120 kgf, pada pengujian Rockwell adalah 15 sampai 150 kgf, dan pada pengujian Brinell adalah 500 sampai 3000 kgf. Sedangkan pada pengujian kekerasan mikro pembebanan yang digunakan lebih kecil, yaitu sebesar 1 gf sampai 1 kgf [6].

2.9.2 Metode Vickers

Pengujian kekerasan dengan menggunakan metode Vickers bertujuan untuk menentukan kekerasan suatu material dalam bentuk daya tahan material terhadap indenter berupa intan atau *diamond* berbentuk piramida dengan sudut puncak 136° yang ditekankan pada permukaan material uji.

Pada pengujian kekerasan menggunakan metode Vickers dengan mengacu pada standar pengujian ASTM E 384, penekanan dengan menggunakan indenter dilakukan secara perlahan tanpa adanya impact atau benturan dan dilakukan penahanan selama 10 sampai 15 detik. Nilai pembebanan yang digunakan adalah sebesar 1 sampai 1000 gf (9.807×10^{-3} sampai 9.807 N) untuk pengujian kekerasan mikro dan 1 sampai 120 kgf (lebih besar dari 9.807 N) untuk pengujian kekerasan makro. Setelah gaya tekan dilepaskan kemudian dilakukan perhitungan nilai HV dengan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Microhardness test} \quad H &= \frac{1000 \times 10^3 \times P}{A_s} \\ &= \frac{2000 \times 10^3 \times P \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d^2} \end{aligned}$$

atau

$$H = \frac{1854.4 \times P}{d^2}$$

Dimana:

P = gaya tekan, *gf*.

A_s = luas area jejak penekanan, μm^2 .

d = panjang rata-rata diagonal jejak penekanan, μm .
= sudut kontak indenter, 136° .

Macrohardness test
$$H = \frac{1.8544 \times P_2}{d_2^2}$$

Dimana:

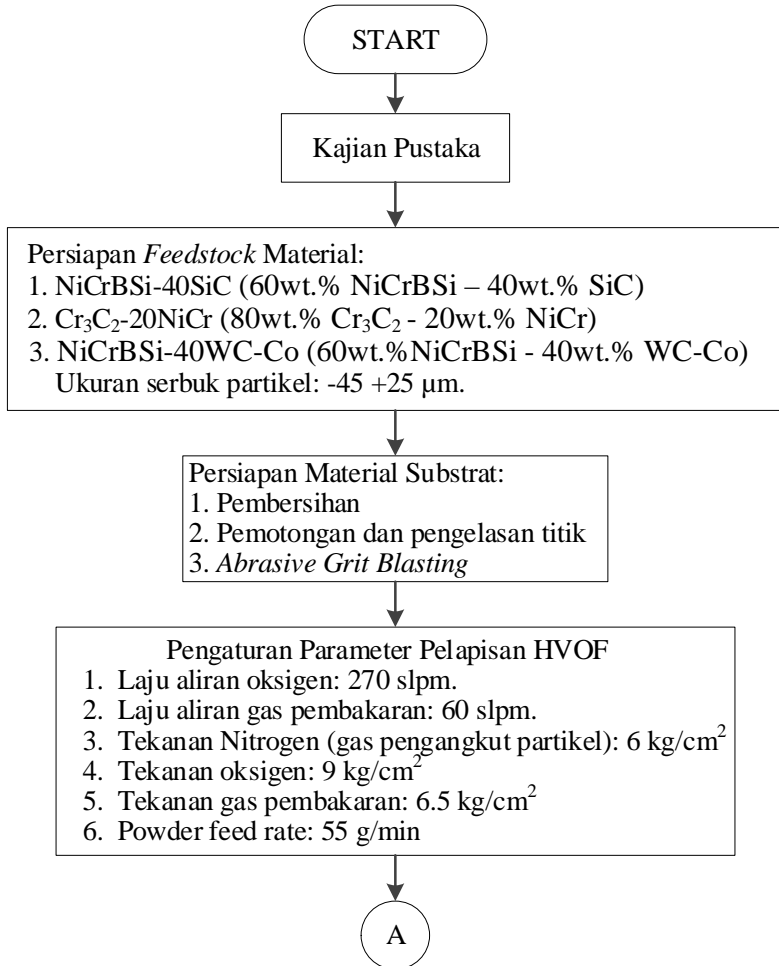
P_2 = gaya tekan, kgf .

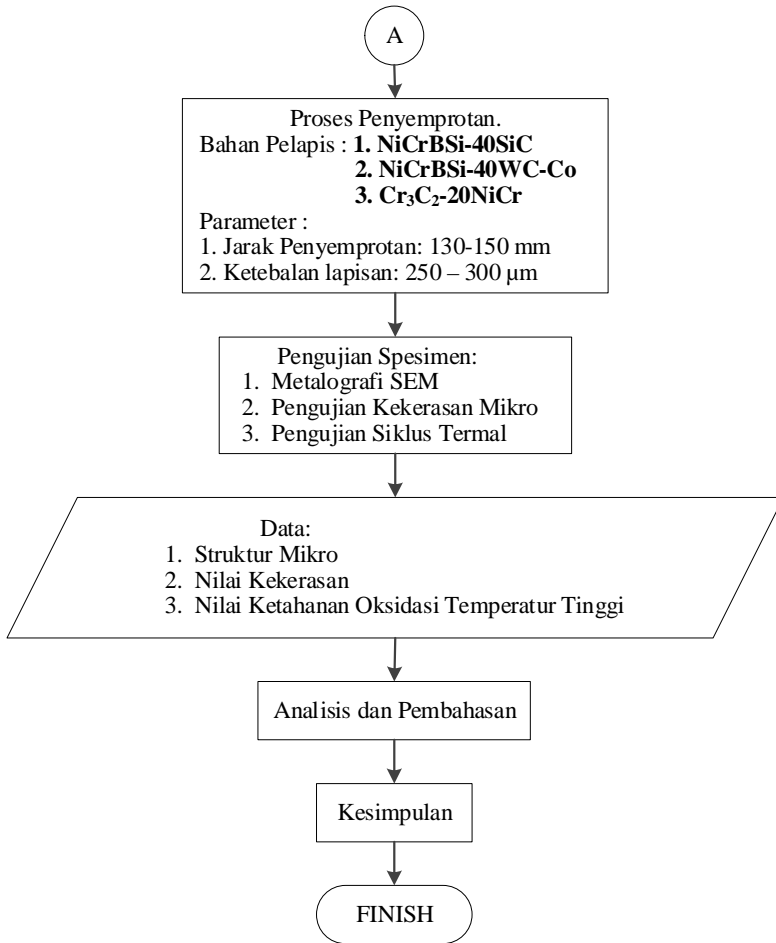
d_2 = panjang rata-rata diagonal jejak penekanan, μm .

BAB III METODOLOGI

3.1 Alur Proses Penelitian

Tahap observasi yang dilaksanakan pada penelitian ini ditunjukkan pada diagram alir proses berikut ini:





Gambar 3.1. Diagram alir penelitian.

Data yang didapat pada penelitian terdahulu digunakan sebagai acuan pada penelitian ini yaitu parameter proses pelapisan menggunakan peralatan HVOF *coating*.

3.2 Spesimen Uji

Pada penelitian ini spesimen uji yang digunakan sebagai substrat adalah plat baja karbon rendah berukuran 50x40x3 mm sebanyak 5 pcs untuk setiap aplikasi bahan pelapis. Spesimen uji pada penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 3.2**.



Gambar 3.2 Spesimen Uji

3.3 Pemilihan Material Pelapis

Pada penelitian ini digunakan 3 variasi bahan pelapis berupa *cermet* NiCrBSi-40SiC (60wt.% NiCrBSi – 40wt.% SiC), NiCrBSi-40WC-Co (60wt.% NiCrBSi - 40wt.% WC-Co) dan Cr₃C₂-20NiCr (80wt.% Cr₃C₂ - 20wt.% NiCr). Pemilihan bahan pelapis ini didasari pada kebutuhan akan kualitas pelapisan yang baik, mempunyai nilai kekerasan tinggi, mempunyai ketahanan erosi, ketahanan abrasi serta ketahanan oksidasi temperatur tinggi yang baik.

3.3.1 Feedstock Material

Terdapat tiga material pelapis (OEM) yang digunakan pada penelitian ini, diantaranya adalah:

1. **NiCrBSi** (Diamalloy 2001, Oerlikon Metco, Switzerland). Material ini mempunyai distribusi ukuran partikel sebesar -45+15 μm . Material ini akan digunakan sebagai *binder* dari material penguat (*reinforce particle*) berupa SiC yang memiliki ukuran karbida primer sebesar $\pm 50 \mu\text{m}$. Detail komposisi kimia dari material Diamalloy 2001 dapat dilihat pada tabel 3.1:

Tabel 3.1 Komposisi kimia Diamalloy 2001

Weight percent nominal						
Product	Ni	Cr	B	Si	C	Fe
Diamalloy 2001	Balance	17	3.5	4	1	4

Dari beberapa penelitian yang telah dilakukan, NiCrBSi *alloys* merupakan salah satu material pelapis yang banyak digunakan dalam menangani masalah oksidasi temperatur tinggi. Material pelapis ini masuk dalam golongan *self-fluxing alloy*. *Self-fluxing alloy* terdiri dari elemen-elemen yang bereaksi dengan oksigen dan kemudian akan membentuk *oxide* berdensitas rendah yang akan mengapung (*float*) pada permukaan dan mengakibatkan meningkatnya ketahanan lapisan dari oksidasi temperatur tinggi serta naiknya densitas atau kepadatan dari lapisan. Pada umumnya *self-fluxing alloy* berbahan dasar *nickel* atau *cobalt alloy* yang mengandung *boron* dan *silicon*, baik secara tunggal atau kombinasi dari keduanya, dengan persentase lebih dari 1.5 % wt [4]. *Boron* dan *silicon* mempunyai beberapa fungsi selain sebagai *fluxing agent*, *boron* mempunyai pengaruh pada pembentukan fasa yang keras (*hard phase*) dan jika dikombinasikan dengan *silicon* akan menurunkan titik lebur campuran beberapa ratus derajat yang disebabkan oleh pembentukan komposisi *eutectic alloy*. *Chromium* yang ada pada campuran berfungsi untuk meningkatkan ketahanan aus dan korosi. Sedangkan ketika *nickel* bercampur dengan *chromium* (NiCr), elemen campuran ini akan teroksidasi menjadi *chromium oxide* (Cr_2O_3) yang pada tingkatan tertentu sesuai untuk digunakan pada temperatur yang sangat tinggi, NiCr pada umumnya juga berfungsi sebagai *bond coat*.

NiCrBSi banyak diaplikasikan pada komponen mesin yang beroperasi pada kondisi kerja erosive, korosi temperatur tinggi, dan oksidasi. Dalam penggunaannya banyak diaplikasikan material penguat melalui pencampuran material karbida dan oxide yang mempunyai fase lebih keras seperti WC, Al₂O₃, Cr₂O₃, Cr₃C₂, dan SiC. Pada penelitian ini dilakukan penambahan SiC sebesar 40% pada binder NiCrBSi dengan tujuan untuk meningkatkan nilai kekerasan dari lapisan yang dihasilkan. SiC sendiri memiliki ketahanan oksidasi temperatur tinggi yang baik karena SiC mulai teroksidasi pada temperatur 1150°C [8].

2. **WC-12%Co** (WOKA 3103, Oerlikon Metco, Switzerland). Material ini mempunyai distribusi ukuran partikel sebesar $-45+11 \mu\text{m}$, *apparent density* 4.6-5.2 g/cm³ dan ukuran karbida primer medium. Material ini akan digunakan sebagai material pengeras (*reinforce particle*) dari material binder berupa NiCrBSi Diamalloy 2001. Detail komposisi kimia dari material ini dapat dilihat pada tabel 3.2:

Tabel 3.2 Komposisi kimia WOKA 3103

Weight percent nominal				
Product	Tungsten	Cobalt	Carbon (total)	Iron (max)
WOKA 3103	Balance	10.5-13.5	5.0-5.8	0.2

Dari beberapa penelitian yang sudah dilakukan, WC banyak diaplikasikan sebagai material penguat untuk meningkatkan ketahanan aus dari material *binder*

NiCrBSi, hal ini dikarenakan WC memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan jenis karbida *refractory* lainnya seperti CrC, SiC, TiC dan VC [12]. Akan tetapi pada temperatur tinggi WC mengalami penurunan kekerasan dan ketahanan oksidasi yang cukup signifikan, WC mulai teroksidasi pada temperatur 540 °C. Namun ketahanan oksidasi WC bisa bergantung pada *binder* matrix metal yang digunakan, apabila *binder* yang digunakan adalah NiCrBSi yang notabene memiliki ketahanan oksidasi yang baik, maka diharapkan secara keseluruhan matrix NiCrBSi-WC akan memiliki kekerasan dan ketahanan oksidasi yang baik.

3. **Cr₃C₂-20%NiCr** (WOKA 7102, Sulzer Metco, Germany). Material ini mempunyai distribusi ukuran partikel sebesar -45+15 μm, *apparent density* 2.3-2.9 g/cm³ dan ukuran karbida primer *coarse*. Detail komposisi kimia dari material ini dapat dilihat pada tabel 3.3:

Tabel 3.3 Komposisi kimia WOKA 7102

Weight percent nominal				
Product	Cr	Ni	Carbon (total)	Fe
WOKA 7102	Balance	13.5-18.5	9.6-10.8	< 0.5

NiCr *based coating* pada umumnya digunakan sebagai *bond coat*. NiCr *based coating* dikenal memiliki ketahanan *erosive wear*, oksidasi dan korosi temperatur tinggi yang baik. Hal ini dikarenakan ketika *nickel* bercampur dengan *chromium* (NiCr), elemen campuran ini akan teroksidasi menjadi *chromium oxide* (Cr₂O₃) pada

tingkatan tertentu yang membuatnya mampu untuk digunakan pada temperatur mencapai 800°C tanpa mengalami perubahan struktur dan sifat secara signifikan [12]. Penggunaan CrC pada matrix metal ditujukan untuk meningkatkan nilai kekerasan dan sekaligus meningkatkan sifat tahan korosi temperatur tinggi dari material.

3.4 Proses Persiapan Material Pelapis

Tahapan yang dilakukan pada proses persiapan bahan pelapis (*feedstock material*) dapat dilihat pada tabel 3.4:

Tabel 3.4. Proses persiapan material pelapis

No	Peralatan dan Tahapan Proses Persiapan Material Pelapis	Gambar Peralatan dan Proses
1	Menyiapkan material pelapis berupa 60NiCrBSi-40SiC , 60NiCrBSi-40WC-Co dan $80\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-20NiCr}$.	
3	Dilakukan proses penakaran dan penimbangan material pelapis sesuai dengan komposisi yang ditentukan dengan menggunakan timbangan presisi.	

4	Dilakukan proses pencampuran serbuk partikel dengan menggunakan mesin pencampur tipe-V selama 8 jam.	
5	Serbuk partikel yang sudah bercampur kemudian disimpan dalam wadah penyimpanan plastik kedap udara agar supaya serbuk partikel tidak terkontaminasi.	

3.5 Persiapan *Substrat*

Setelah persiapan material pelapis selesai dilakukan, tahapan selanjutnya adalah menyiapkan material *substrat* berupa pembersihan dan pengasaran permukaan. Tahap ini merupakan tahapan yang sangat penting, karena akan sangat menentukan kualitas lapisan. Tahapan yang dilakukan pada proses persiapan *substrat* dapat dilihat pada tabel 3.5:

Tabel 3.5. Proses persiapan material *substrat*

No	Peralatan dan Tahapan Proses Persiapan <i>Substrat</i>	Gambar Peralatan dan Proses
1	Menyiapkan material substrat berupa potongan komponen plat baja <i>mild steel</i> .	
2	Spesimen dipotong dengan ukuran 50x40x3 mm. Peralatan yang digunakan pada proses ini adalah alat potong gergaji mesin.	
3	Dilakukan pengelasan titik pada tiap bagian spesimen sejumlah 5 pcs.	

4	<p>Dilakukan proses pengasaran permukaan dengan cara <i>abrasive grit blasting</i> yaitu dengan menyemprotkan partikel mikro berupa serbuk alumina pada permukaan spesimen dengan tekanan tinggi. Proses ini bertujuan untuk mendapatkan permukaan yang mempunyai daya ikat kuat, selain juga untuk membersihkan permukaan dari kontaminan. Peralatan yang digunakan pada proses ini adalah <i>grit blaster machine</i>, dan serbuk alumina grit 24.</p>	 
---	--	--

3.6 Pelapisan HVOF

Setelah proses persiapan *substrat* selesai dilakukan, proses pelapisan bisa dimulai. Tahapan yang dilakukan pada proses pelapisan dengan menggunakan peralatan HVOF *coating* dapat dilihat pada tabel 3.6:



Tabel 3.6 Proses pelapisan HVOF

No	Peralatan dan Tahapan Proses Pelapisan HVOF	Gambar Peralatan dan Proses
1	Langkah yang pertama adalah melakukan pengukuran awal berupa pengukuran ketebalan pada material sebelum dilakukan proses pelapisan. Alat yang digunakan pada proses ini adalah alat ukur mikrometer.	
2	Melakukan poses pengecaman dengan cara meletakkan <i>substrat</i> pada dudukan yang memiliki daya cengkram yang kuat. Hal ini dilakukan agar pada saat dilakukan proses pelapisan <i>substrat</i> tidak terlepas dari dudukannya yang disebabkan oleh tingginya tekanan gas yang dihasilkan dari HVOF <i>gun</i> .	

3	<p>Serbuk partikel yang telah dipersiapkan kemudian dimasukkan kedalam <i>powder feeder</i> dengan jumlah serbuk yang disesuaikan dengan luasan substrat.</p>	 A person is shown pouring a white powder from a small container into a large, cylindrical metal feeder. The feeder has various pipes and valves attached to it.
4	<p>Setelah komponen terpasang dengan baik kemudian katup pengatur aliran gas <i>propane</i> (gas pembakaran), oksigen, dan nitrogen (gas pengangkut partikel) pada tabung dibuka.</p>	 A person wearing a blue shirt and a white face mask is adjusting a valve on a blue gas cylinder. The cylinder is part of a larger industrial setup with various pipes and gauges.
5	<p>Langkah selanjutnya adalah mengaktifkan konsol HVOF dengan cara memutar tombol RESET dan menekan tombol POWER ON yang terdapat pada panel kontrol.</p>	 A close-up view of a control panel for an HVOF system. The panel features several circular gauges, a red emergency stop button, and other control elements. A blue gas cylinder is visible in the background.

6	<p>Setelah sistem HVOF aktif kemudian dilakukan pengaturan laju aliran gas <i>propane</i> sebesar 60 slpm, laju aliran oksigen sebesar 270 slpm, serta mengatur tekanan gas <i>propane</i> sebesar 6 kg/cm², tekanan oksigen sebesar 8 kg/cm² dan tekanan nitrogen sebesar 5 kg/cm² dengan menggunakan <i>pressure gauge</i> dan <i>flow meter</i>.</p>	
7	<p>Kemudian dilakukan pengaturan laju aliran serbuk partikel dari <i>powder feeder</i> menuju HVOF <i>gun</i>, dan juga dilakukan pengaturan laju aliran udara bertekanan yang digunakan sebagai pendingin HVOF <i>gun</i> melalui panel kontrol.</p>	
8	<p>Selanjutnya dilakukan penyalaan <i>flame</i> pada HVOF <i>gun</i>.</p>	

9	<p>Setelah penyalaan <i>flame</i> dilakukan maka proses selanjutnya adalah mengalirkan serbuk partikel dengan cara membuka katup pengatur pada HVOF <i>gun</i>.</p>	
10	<p>Proses pelapisan pada komponen dapat dimulai. Proses pelapisan dilakukan dengan menjaga jarak penyemprotan antara HVOF <i>gun</i> dengan substrat sebesar 130-150 mm.</p>	
11	<p>Proses dihentikan sementara ketika temperatur pada permukaan substrat telah mencapai kisaran 150-200°C. Untuk mempercepat proses pendinginan bisa dilakukan penyemprotan udara bertekanan pada permukaan substrat. Proses pelapisan kemudian dilanjutkan hingga didapat ketebalan lapisan yang diinginkan. Pengukuran temperatur dilakukan dengan menggunakan <i>infrared thermometer</i>.</p>	

12	Setelah proses pelapisan selesai dilakukan pengukuran ketebalan akhir lapisan. Pengukuran dilakukan pada beberapa titik agar didapatkan nilai ketebalan rata-rata.	
13	Setelah didapatkan ketebalan lapisan yang sesuai selanjutnya dilakukan proses <i>fusing</i> , yaitu melakukan penyemprotan <i>flame</i> pada permukaan lapisan.	

3.7 Pengujian

Untuk mendapatkan data-data dari penelitian ini dilakukan tiga pengujian yaitu pengujian metalografi dan SEM, pengujian kekerasan, dan pengujian siklus termal.

3.7.1 Metalografi dan SEM

Pengamatan metalografi dengan menggunakan mikroskop optis dan *scanning electron microscope* (SEM) dilakukan untuk mendapatkan hasil visual dari struktur mikro lapisan. Proses persiapan spesimen dan prosedur metalografi mengikuti standar ASTM E1920-03 dan mengikuti prosedur metalografi spesimen *coating* pada buku ASM - *Handbook of thermal spray technology*. Peralatan yang digunakan pada pengujian ini diantaranya adalah:

1. Mesin *grinding* dan *polishing*.

2. Kertas amplas silicon carbide (SiC) grit 80, 180, 320, 800, 1000 dan 2000.
3. Kain beludru dan serbuk alumina.
4. *Resin epoxy*.
5. *Scanning electron microscope*.
6. Mikroskop optik

Beberapa peralatan yang digunakan pada pengamatan metalografi dapat dilihat pada **Gambar 3.3**.



(a)



(b)

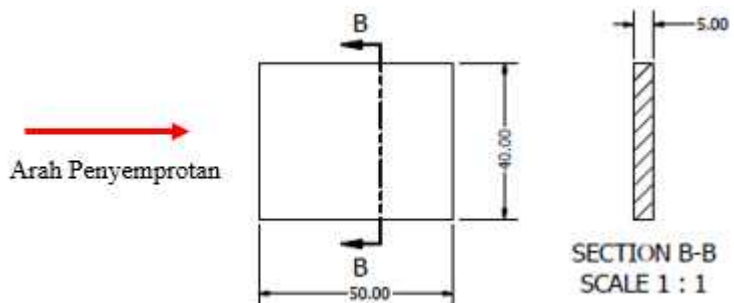


(c)

Gambar 3.3 Peralatan uji metalografi; (a) Mesin *grinding* dan *polishing*; (b) Mikroskop optik (c) *Scanning electron microscope* (SEM).

Prosedur pengamatan struktur mikro:

1. Menyiapkan spesimen uji yang telah mengalami proses pelapisan HVOF.
2. Spesimen dipotong menggunakan mesin potong gerinda, pada saat proses pemotongan digunakan cairan pendingin agar supaya tidak terjadi distorsi pada spesimen uji dikarenakan panas yang ditimbulkan dari proses pemotongan. Pemotongan dilakukan secara hati-hati agar supaya tidak terjadi kerusakan pada lapisan, serta dipilih bagian spesimen yang paling mewakili hasil pelapisan. Permukaan yang akan diamati adalah permukaan potongan atau *cross sectional surface* dengan dimensi sesuai **Gambar 3.4**.



Gambar 3.4. Sketsa potongan spesimen uji metalografi

3. Dilakukan proses *cold mounting* pada spesimen dengan menggunakan *resin epoxy*.
4. Spesimen dipoles pada mesin *grinding* yang dialiri air dengan menggunakan kertas amplas *silicon carbide* (SiC) grit 80 sampai dengan grit 2000.
5. Dilakukan *polishing* menggunakan kain beludru dan serbuk alumina hingga tidak terlihat ada goresan pada spesimen.

6. Mengamati struktur mikro spesimen dengan menggunakan mikroskop optik dan *scanning electron microscope* (SEM).

3.7.2 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui dan membandingkan nilai kekerasan material pada bagian *substrat* dengan permukaan hasil pelapisan. Peralatan yang digunakan pada pengujian ini adalah *microhardness tester*, peralatan *microhardness tester* dapat dilihat pada **Gambar 3.5**. Pengujian kekerasan pada penelitian ini mengikuti standar ASTM E384-11^{E1} dengan prosedur pengujian sebagai berikut:

1. Spesimen uji berupa baja karbon rendah dipotong menggunakan mesin potong dengan dimensi dan arah pemotongan sesuai **Gambar 3.4**.
2. Selanjutnya dilakukan proses persiapan awal spesimen berupa proses *polishing*, dengan cara menggosok permukaan spesimen menggunakan kertas gosok grit 80-500 menggunakan mesin polishing **Gambar 3.3 (a)**.
3. Spesimen diletakkan pada alat uji kekerasan mikro dan dilakukan pengujian.
4. Dilakukan indentasi sebanyak tujuh titik pada permukaan spesimen dan dilakukan pengulangan sebanyak tiga kali agar didapatkan nilai kekerasan rata-rata. Posisi indentasi pada pengujian kekerasan ini dapat dilihat pada **Gambar 3.6**. Pada pengujian ini penekanan indenter dilakukan secara perlahan tanpa adanya impak atau benturan dan dilakukan penahanan selama 10 detik. Nilai pembebanan yang digunakan adalah sebesar 0.5 kgf (4.903 N).
5. Setelah gaya tekan dilepaskan kemudian dilakukan pencatatan dan perhitungan nilai HV dengan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Microhardness test } H &= \frac{2000 \times 10^3 \times P \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d^2} \\ &= \frac{1854.4 \times P}{d^2} \end{aligned}$$

Dimana:

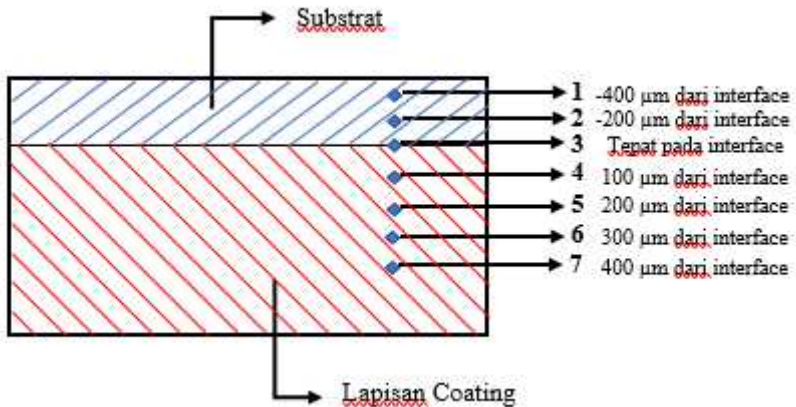
P = Beban tekan, *gf*.

d = Panjang rata-rata diagonal jejak penekanan, μm .

= Sudut kontak indenter, 136°



Gambar 3.5. *Microhardness tester*



Gambar 3.6. Posisi indentasi pada pengujian kekerasan mikro

3.7.3 Pengujian Siklus Termal

Pengujian siklus termal dilakukan untuk mengetahui ketahanan oksidasi dari masing-masing lapisan serta mengetahui perbandingan laju oksidasi temperatur tinggi dari material yang telah dilapisi dengan material tanpa pelapisan. Pengujian dilakukan dengan menghitung persentase penambahan berat yang terjadi pada spesimen setelah mengalami satu siklus pengujian. Terjadinya penambahan berat pada spesimen dikarenakan oleh munculnya *oxide scale* atau metal oxide pada permukaan spesimen dikarenakan terjadi reaksi antara permukaan spesimen dengan oksigen pada temperatur tinggi. Prosedur pengujian yang digunakan pada pengujian siklus termal ini adalah sebagai berikut [11]:

1. Spesimen dipoles terlebih dahulu agar didapatkan kondisi reaksi yang sama sebelum mengalami proses pengujian.
2. Meletakkan spesimen kedalam *alumina boats*, kemudian mengukur berat total awal dari *alumina boats* dan spesimen.

3. Memasukkan *alumina boats* kedalam tungku pemanas pada kondisi temperatur ruang.
4. Dilakukan pemanasan sampai temperatur 900°C dengan laju pemanasan sebesar 200°C/jam atau 4 jam pemanasan.
5. Dilakukan penahanan pada temperatur 900°C di dalam tungku pemanas selama 1 jam.
6. Dilakukan pendinginan sampai temperatur ruang di dalam tungku pemanas (pendinginan *furnace*).
7. Mengeluarkan *alumina boats* dari tungku pemanas setelah mencapai temperatur ruang.
8. Mengukur berat total dari *alumina boats* dan spesimen setelah megalami proses pengujian siklus termal. Sampai dengan tahap ini satu siklus pengujian telah selesai dilakukan.
9. Mengulangi prosedur pengujian 1 sampai 8 selama 6 kali.

Beberapa peralatan yang diperlukan pada pengujian siklus termal dapat dilihat pada **Gambar 3.7**.



(a)



(b)



(c)

Gambar 3.7 Peralatan pengujian siklus termal (a) Tungku pemanas (*furnace*); (b) *Alumina boats*; (c) Timbangan Presisi

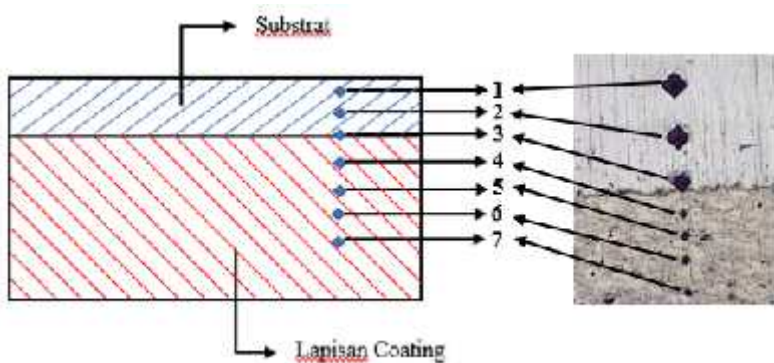
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Pengujian dan pengumpulan data dilakukan pada spesimen plat baja karbon rendah yang telah melalui proses pelapisan HVOF. Hasil yang didapatkan dari pengujian adalah data nilai kekerasan, data siklus termal dan struktur mikro semua spesimen.

4.1 Pengujian Kekerasan

Dilakukan pengujian kekerasan pada tiap spesimen menggunakan metode uji kekerasan mikro. Lokasi indentasi pada permukaan spesimen ditunjukkan pada **Gambar 4.1**.



Gambar 4.1 Spesimen dan lokasi titik indentasi (titik biru dan hitam di permukaan)

4.1.1 Data Hasil Pengujian Kekerasan

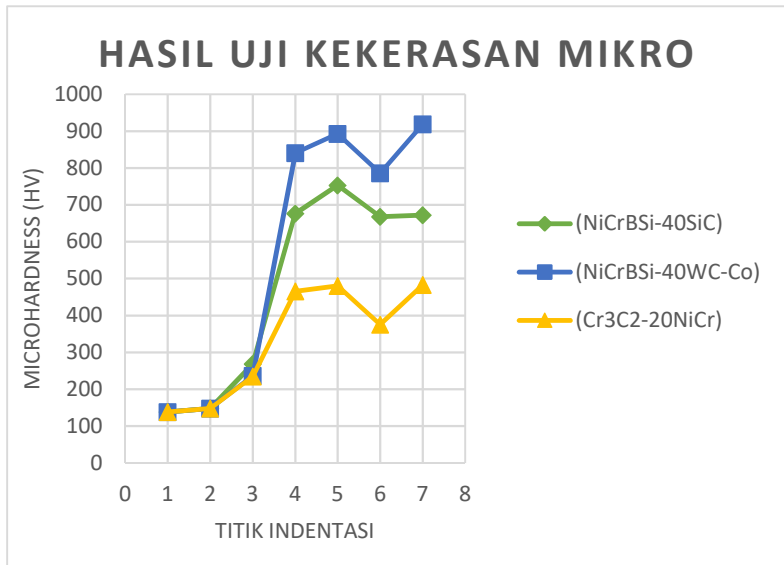
Data hasil pengujian kekerasan dituangkan pada **Tabel 4.1**

Tabel 4.1 Hasil pengujian kekerasan pada permukaan spesimen

Posisi Indentasi	Spesimen		
	(NiCrBSi-40SiC)	(NiCrBSi-40WC-Co)	(Cr3C2-20NiCr)
1	138.67	138.67	138.67
2	148.33	148.33	148.33
3	268.67	236.33	234.67
4	676.67	840.6667	466
5	753.33	893	480.67
6	668.33	786	375.33
7	672	918.6667	483

4.1.2 Analisis dan Pembahasan Pengujian Kekerasan

Dari data pengujian dibuat grafik kekerasan permukaan spesimen yang dapat dilihat pada **Gambar 4.2**.



Gambar 4.2 Grafik Hasil Uji Kekerasan Mikro

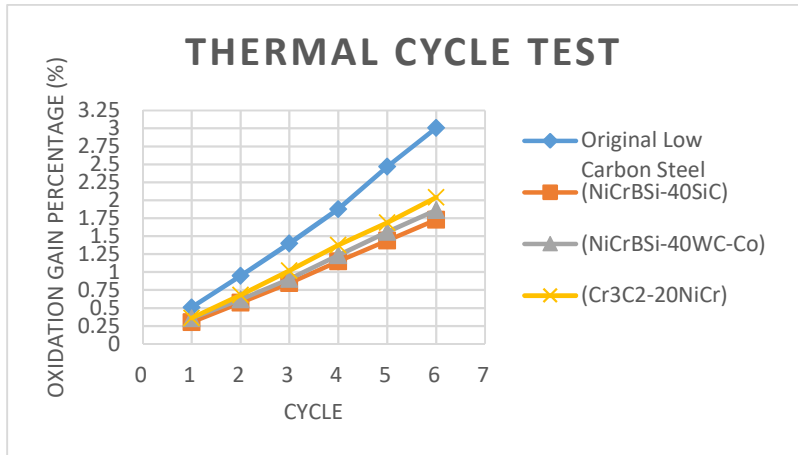
Dari gambar 4.2 dapat diketahui profil kekerasan mikro sepanjang penampang spesimen sebagai fungsi jarak dari *interface* lapisan-substrat. Nilai kekerasan pada material substrat berkisar antara 130-150 HV. Nilai kekerasan mulai meningkat pada daerah sambungan atau daerah antar muka substrat dan lapisan, nilai kekerasan yang didapat di daerah ini dari tiap spesimen berkisar antara 230-270 HV. Sedangkan nilai kekerasan pada lapisan terlihat bervariasi mulai dari daerah *interface* sampai daerah terluar lapisan, hal ini kemungkinan besar disebabkan oleh adanya persebaran karbida pada lapisan di tiap-tiap spesimen.

Nilai kekerasan rata-rata paling tinggi didapat pada spesimen (NiCrBSi-40WC-Co) yaitu berkisar antara 800-900 HV

dengan nilai kekerasan tertinggi sebesar 918 HV dan terendah sebesar 786 HV. Nilai kekerasan yang tinggi dari spesimen B disebabkan karena adanya karbida tungsten (WC) dimana jenis karbida ini memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan jenis *refractory* karbida lain [12]. Nilai kekerasan rata-rata yang didapat pada spesimen (NiCrBSi-40SiC) masih tergolong tinggi yaitu berkisar antara 600-700 HV dengan nilai kekerasan tertinggi sebesar 753 HV dan terendah sebesar 668 HV. Sedangkan nilai kekerasan rata-rata paling rendah diantara ketiga spesimen didapat pada spesimen (Cr_3C_2 -20NiCr) yaitu berkisar antara 400-500 HV dengan nilai kekerasan tertinggi sebesar 483 HV dan terendah sebesar 375 HV.

4.2 Analisis Data Pengujian Siklus Thermal

Dari data hasil pengujian siklus thermal sebanyak enam kali siklus dibuat grafik siklus thermal yang dapat dilihat pada **Gambar 4.3**.



Gambar 4.3 Grafik Hasil Uji Siklus Termal

Dari gambar 4.3 dapat diketahui bahwa persentase penambahan berat (terbentuknya *oxide scale*) yang disebabkan karena oksidasi temperatur tinggi pada material baja karbon rendah tanpa mengalami proses pelapisan merupakan yang paling tinggi yaitu mencapai 0.5% pada siklus pertama dan cenderung mengalami peningkatan sebesar 0.5-0.7% pada setiap siklus seiring dengan bertambahnya siklus pengujian yang dilakukan. Hal ini sesuai dengan sifat baja karbon rendah yaitu tidak tahan terhadap oksidasi temperatur tinggi. Sedangkan untuk spesimen baja karbon rendah yang salah satu sisinya telah mengalami proses pelapisan, persentase penambahan yang muncul relatif lebih rendah yaitu berkisar antara 0.25-0.35%. Hal ini dapat diartikan bahwa proses pelapisan pada salah satu sisi permukaan material telah mampu mengurangi laju oksidasi temperatur tinggi jika dibandingkan

dengan material asli tanpa mengalami pelapisan. Akan tetapi jika dilihat dari besarnya persentase penambahan berat pada tiga spesimen yang telah mengalami proses pelapisan dan dibandingkan dengan spesimen tanpa proses pelapisan, persentase yang didapat masih cukup besar, hal ini dikarenakan terjadi oksidasi pada sisi permukaan spesimen tanpa pelapisan hingga terbentuk *scale*, *scale* yang terbentuk dapat dilihat pada **Gambar 4.4**



Gambar 4.4 Permukaan spesimen tanpa pelapisan setelah mengalami siklus uji thermal

Dari grafik siklus termal pada gambar 4.3 juga dapat diketahui bahwa persentase penambahan berat paling besar dari tiga material yang telah mengalami proses pelapisan adalah spesimen ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-20NiCr}$) yaitu sekitar 0.35%, hal ini juga dapat terlihat dari perubahan warna yang terjadi pada permukaan spesimen dari yang awalnya berwarna silver menjadi hitam kehijauan seperti dapat dilihat pada **Gambar 4.5**. Dari perubahan warna yang terjadi (munculnya pigmen warna hitam dan hijau tua) dapat diprediksi bahwa Cr dan Ni mulai teroksidasi (Cr pigmen warna hitam, Ni pigmen warna hijau). Cr mulai teroksidasi pada temperatur 900°C sedangkan Ni mulai teroksidasi pada temperatur 700°C dan akan terbentuk *scale* pada temperatur 1000°C [13].



Gambar 4.5 Permukaan spesimen ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-20NiCr}$) (a) Sebelum mengalami siklus uji termal, (b) Setelah mengalami siklus uji termal

Pada spesimen (NiCrBSi-40SiC) dan (NiCrBSi-40WC-Co) dapat diketahui bahwa hanya terdapat sedikit perbedaan persentase penambahan berat yang terjadi yaitu sekitar 0.3%, hal ini dikarenakan WC dan SiC diaplikasikan pada material binder yang sama yaitu NiCrBSi dimana material ini memiliki sifat *self-fluxing* yaitu elemen-elemen yang pada temperatur tertentu bereaksi dengan oksigen atau *oxide* dan akan membentuk *oxide* berdensitas rendah yang mengapung (*float*) pada permukaan lapisan, hal inilah yang akan menyebabkan meningkatnya ketahanan lapisan dari oksidasi temperatur tinggi. Pada umumnya *self-fluxing alloy* berbahan dasar nickel atau cobalt alloy yang mengandung boron dan silicon, baik secara tunggal atau kombinasi dari keduanya, dengan persentase lebih dari 1.5 % wt. Sifat *self-fluxing* ini baru akan muncul setelah spesimen mengalami proses fusi [4]. Meskipun demikian dari pengamatan visual terhadap permukaan spesimen pada **Gambar 4.6** masih dapat dilihat terjadinya oksidasi pada lapisan, hal ini ditandai dengan munculnya pigmen warna hijau (pigmen warna oksida nickel) pada spesimen (NiCrBSi-40SiC) dan pigmen warna hijau tua pada spesimen (NiCrBSi-40WC-Co). Pigmen warna hijau tua pada spesimen (NiCrBSi-40WC-Co) dimungkinkan karena telah terjadi oksidasi nickel dan WC, WC mulai teroksidasi pada temperatur 540 °C.

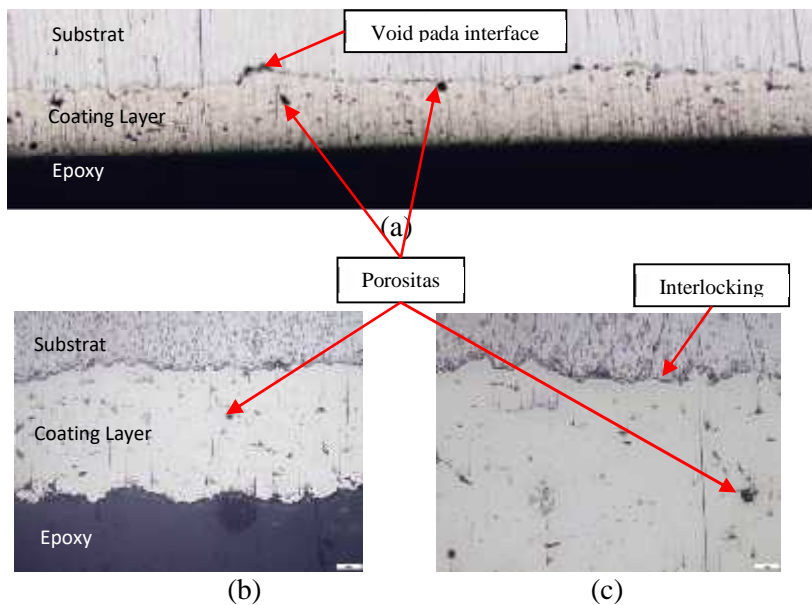


Gambar 4.6 (a) Permukaan spesimen (NiCrBSi-40SiC), (b) Spesimen (NiCrBSi-40WC-Co) setelah mengalami siklus uji termal

4.3 Pengamatan Struktur Mikro

Dari hasil pengamatan metalografi didapatkan foto struktur mikro lapisan pada daerah penampang. Foto struktur mikro spesimen (NiCrBSi-40SiC) dapat dilihat pada **Gambar 4.7**, spesimen (NiCrBSi-40WC-Co) pada **Gambar 4.8**, dan spesimen (Cr_3C_2 -20NiCr) pada **Gambar 4.9**.

4.3.1 Analisis Data Pengamatan Struktur Mikro NiCrBSi-40SiC



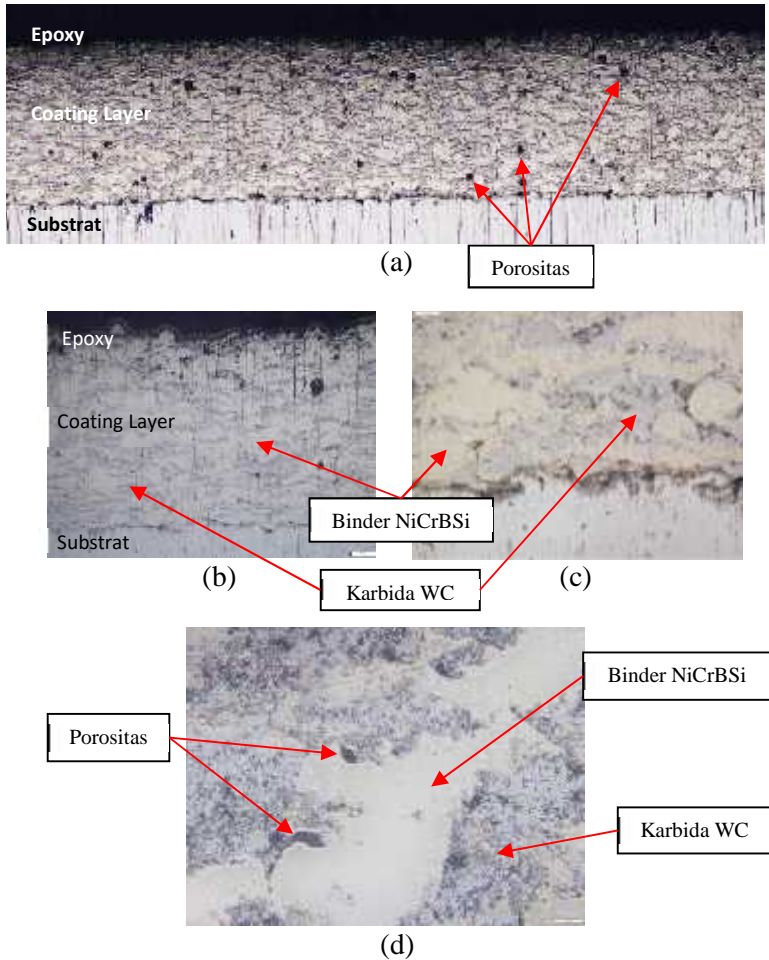
Gambar 4.7 Struktur mikro lapisan spesimen (NiCrBSi-40SiC) dengan perbesaran (a)50x, (b) 200x, (c) 500x

Dari Pengamatan struktur mikro pada spesimen (NiCrBSi-40SiC) dapat dilihat bahwa ketebalan lapisan yang didapat adalah sekitar 200-250 μm . Terdapat beberapa porositas yang tersebar pada lapisan dengan jumlah yang tidak terlalu

banyak. Porositas ini kemungkinan besar disebabkan oleh *entrapped unmelted partickel* SiC yang kemudian terkelupas pada saat proses *grinding* dan *polishing* dan menyebabkan *voids*. Akan tetapi secara umum dapat dilihat bahwa lapisan memiliki struktur yang padat. Hal ini dikarenakan lapisan telah mengalami proses fusi dimana hasil dari proses fusi adalah pemadatan lapisan serta menutupnya sebagian porositas yang muncul selama proses pelapisan. Selain itu warna putih yang hampir merata pada lapisan mengindikasikan bahwa sebagian besar partikel SiC telah bisa menyatu (*fully melted*) dan tersebar merata (*uniform*) pada seluruh matrix lapisan.

Pada daerah *interface* antara lapisan-*substrat* dapat dilihat bahwa ikatan yang terjadi sangat baik menunjukkan ikatan mekanik (*mechanical bonding*) dan tidak terlihat adanya *crack* seperti dapat dilihat pada gambar gambar 4.7 (d). Jika dilihat dari struktur ikatan yang saling mengikat (*interlocking*) antara lapisan dan *substrat* dapat disimpulkan bahwa proses *roughening* dengan menggunakan *grit blasting* pada permukaan substrat telah berhasil. Hasil ikatan yang baik ini juga membuktikan bahwa binder NiCrBSi telah mampu melekat dengan baik sebagaimana mestinya. Lapisan oksida tidak terbentuk pada *interface* lapisan-substrat, hal ini menunjukkan bahwa *stochiometri* pembakaran campuran *propane* dan oksigen yang baik dan temperatur substrat yang selalu terjaga di bawah 200°C. Akan tetapi masih terdapat beberapa porositas dan void pada *interface* seperti dapat dilihat pada gambar 4.7 (a).

4.3.2 Analisis Data Pengamatan Struktur Mikro NiCrBSi-40WC-Co

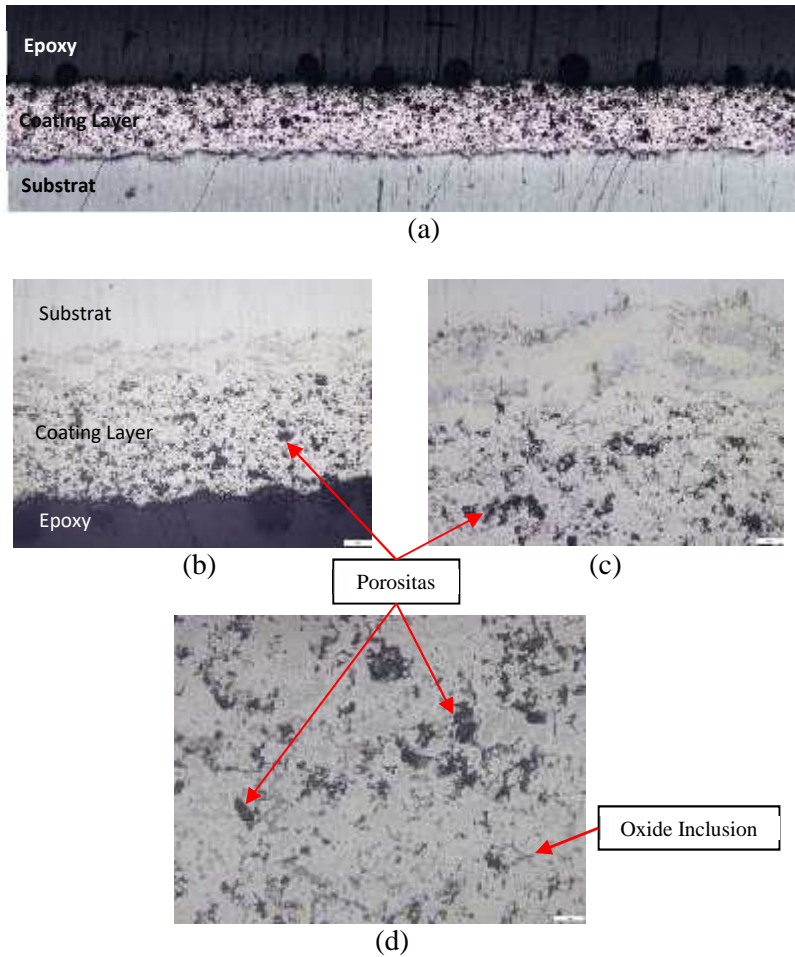


Gambar 4.8 Struktur mikro lapisan spesimen (NiCrBSi-40WC-Co) dengan perbesaran (a) 50x, (b) 200x, (c) 500x, (d) 1000x

Dari pengamatan struktur mikro pada spesimen (NiCrBSi-40WC-Co) dapat dilihat bahwa ketebalan lapisan yang didapat adalah sekitar 350-400 μm . Terdapat beberapa porositas yang tersebar pada lapisan dengan jumlah yang tidak terlalu banyak. Porositas ini kemungkinan besar disebabkan oleh *entrapped unmelted partickel WC* yang kemudian terkelupas pada saat proses *grinding* dan *polishing* dan menyebabkan *voids*. *Unmelted particle* bisa terjadi karena WC merupakan fasa keras, sehingga terkadang area dimana WC ada, disitu bisa terjadi porositas. Hal ini dapat diketahui dari porositas yang muncul di daerah sekitar karbida seperti dapat terlihat pada gambar 4.8 (d). Akan tetapi secara umum dapat dilihat bahwa lapisan memiliki struktur yang padat. Hal ini dikarenakan lapisan telah mengalami proses fusi dimana hasil dari proses fusi adalah pemadatan lapisan serta menutupnya sebagian porisitas yang muncul selama proses pelapisan. Bisa dilihat juga bahwa karbida WC telah menyatu, tersebar merata dan seragam (*uniform*) pada seluruh matrix lapisan. Hal inilah yang menyebabkan nilai kekerasan NiCrBSi-40WC-Co yang tinggi dan hampir merata pada seluruh lapisan.

Pada daerah *interface* antara lapisan-substrat dapat dilihat bahwa ikatan yang terjadi sangat baik menunjukkan ikatan mekanik (*mechanical bonding*) dan tidak terlihat adanya *crack* seperti dapat dilihat pada gambar gambar 4.8 (c). Akan tetapi masih terdapat beberapa porositas pada daerah *interface* seperti dapat dilihat pada gambar 4.8 (a). Jika dilihat dari struktur ikatan lapisan dengan substrat pada *interface* dapat dilihat bahwa proses *rougning* dengan menggunakan *grit blasting* pada permukaan substrat telah berhasil. Hasil ikatan yang baik ini juga membuktikan bahwa binder NiCrBSi telah mampu melekat dengan baik sebagaimana mestinya. Lapisan oksida tidak terbentuk pada *interface* lapisan-substrat, hal ini menunjukkan bahwa *stoichiometri* pembakaran campuran *propane* dan oksigen yang baik dan temperatur substrat yang selalu terjaga di bawah 200°C.

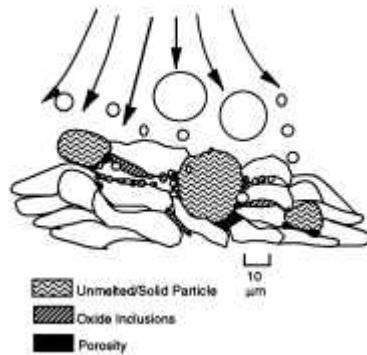
4.3.3 Analisis Data Pengamatan Struktur Mikro $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-20NiCr}$



Gambar 4.9 Struktur mikro lapisan spesimen ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-20NiCr}$) dengan perbesaran (a) 50x, (b) 200x, (c) 500x dan (d) 1000x

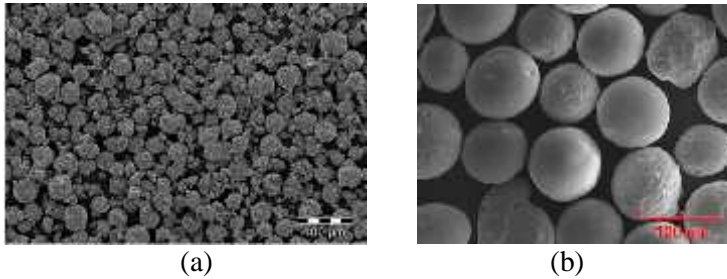
Dari Pengamatan struktur mikro pada spesimen (Cr_3C_2 -20NiCr) dapat dilihat bahwa ketebalan lapisan yang didapat adalah sekitar 250-300 μm . Lapisan memiliki struktur yang tidak terlalu padat dan jumlah porositas yang muncul sangat banyak seperti dapat dilihat pada gambar 4.9 (a). Ada beberapa kemungkinan yang menyebabkan terjadinya porositas pada kasus ini diantaranya adalah:

1. Tidak dilakukan proses *pre heating* pada material pelapis yang sudah disimpan lama sehingga dimungkinkan terdapat kandungan air pada material dikarenakan kelembaban. Sehingga pada saat dilakukan penyemprotan, air yang ada pada material pelapis berubah fasa menjadi uap air dan terjadi *gas trapping* pada struktur lapisan.
2. Karena terjadi *entrapped unmelted particle* Cr_3C_2 pada lapisan pada saat penyemprotan dimana partikel ini mempunyai kekuatan ikatan antar lamel yang tidak terlalu kuat (*weakly bonder interlamella*), sehingga waktu dilakukan proses *grinding* dan *polishing* partikel tersebut terkelupas dan menyebabkan terjadinya porositas. *Unmelted particle* bisa terjadi karena Cr_3C_2 merupakan salah satu fasa keras, sehingga terkadang area dimana Cr_3C_2 ada, disitu bisa terjadi porositas [4].
3. Karena terjadi *shadowing* dari *unmelts particle*. Pada saat tumbukan, partikel yang meleleh sempurna akan membentuk *splat* sehingga dihasilkan lapisan yang padat dan saling bertumpuk (lamela) sedangkan *unmelted particle* biasanya masih berbentuk bulat sehingga dapat menimbulkan rongga pada sela-sela butiran atau sering disebut *shadowing unmelts particle*. Skema dari fenomena *shadowing unmelts particle* ini dapat dilihat pada **Gambar 4.10**.



Gambar 4.10 Fenomena *shadowing unmelts particle* [4]

Sedangkan lapisan yang tidak padat bisa dikarenakan morfologi dari butiran $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-20NiCr}$, seperti dapat dilihat pada **Gambar 4.11**. Meskipun bentuk butiran $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-20NiCr}$ berbentuk bulat (*spheroidal*) akan tetapi tidak sehalus butiran NiCrBSi , hal ini bisa menyebabkan *freely-flowing material* pada saat proses pelapisan $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-20NiCr}$ tidak sebagai NiCrBSi . Hal ini terbukti pada saat proses pelapisan dilakukan untuk mendapatkan dimensi ketebalan lapisan yang diinginkan ($250\text{-}300\ \mu\text{m}$) material $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-20NiCr}$ memerlukan dua kali siklus, sedangkan material NiCrBSi hanya memerlukan satu kali siklus pelapisan. Hal inilah yang menyebabkan terjadinya perbedaan kepadatan pada lapisan dan dimungkinkan juga bisa menyebabkan terjadinya porositas, karena terlalu banyak gas dan udara yang masuk pada lapisan $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-20NiCr}$ sehingga bisa menyebabkan terjadinya *gas trapping*. Porositas yang ada pada lapisan dapat berpengaruh pada sifat mekanik seperti kekerasan [4], semakin tinggi persentase porositas lapisan maka kekerasan akan menurun demikian pula sebaliknya. Selain itu banyaknya porositas dapat menyebabkan ketahanan impak dari lapisan menurun, karena porositas dapat memicu retak saat permukaan lapisan menerima beban impak sehingga akan mudah terkelupas.



Gambar 4.11 Photo SEM morfologi partikel pelapis (a) $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-20NiCr}$, (b) NiCrBSi [14]

Pada daerah *interface* antara lapisan-substrat dapat dilihat bahwa ikatan yang terjadi sangat baik menunjukkan ikatan mekanik (*mechanical bonding*) dan tidak terlihat adanya *crack* dan porositas pada daerah interface seperti dapat dilihat pada gambar 4.9 (c). Jika dilihat dari struktur ikatan lapisan dengan substrat pada *interface* dapat dilihat bahwa proses *roughning* dengan menggunakan *grit blasting* pada permukaan substrat telah berhasil. Hasil ikatan yang baik ini juga membuktikan bahwa binder NiCr telah mampu melekat dengan baik sebagaimana mestinya. Lapisan oksida tidak terbentuk pada *interface* lapisan-substrat, hal ini menunjukkan bahwa *stoichiometri* pembakaran campuran *propane* dan oksigen yang baik dan temperatur substrat yang selalu terjaga di bawah 200°C .

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang didapatkan dari penelitian setelah proses pengambilan dan analisis data adalah :

1. Struktur mikro lapisan NiCrBSi-40WC-Co dan NiCrBSi-40SiC adalah padat, tidak ada *crack*, sedikit porositas, mempunyai persebaran karbida yang merata dan mempunyai kualitas ikatan dengan substrat yang baik. Sedangkan pada lapisan Cr₃C₂-20NiCr terdapat banyak porositas yang disebabkan oleh *unmelted particle*, *gas trapping*, dan *shadowing unmelted particle*.
2. Penggunaan karbida tungsten (WC) memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai kekerasan lapisan jika dibandingkan dengan penggunaan karbida silikon (SiC) dan karbida chromium (Cr₃C₂). Hal ini terlihat pada nilai kekerasan rata-rata tertinggi lapisan didapat pada campuran NiCrBSi-40WC-Co sebesar 859 HV.
3. Proses pelapisan pada salah satu sisi permukaan material mampu mengurangi laju oksidasi temperatur tinggi jika dibandingkan dengan material tanpa pelapisan.

5.2 Saran

Beberapa saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Melakukan prosedur *pre-heating* pada material pelapis yang telah lama disimpan sebelum proses *spraying* HVOF. Hal ini penting dilakukan untuk menghindari munculnya porositas pada lapisan.

2. Sebisa mungkin pada saat proses *sectioning* spesimen dilakukan dengan sangat hati-hati. Apabila memungkinkan disarankan untuk menggunakan *precision cutter* atau prosedur *wire cut*. Hal ini penting dilakukan untuk menghindari kerusakan pada spesimen berupa retak sambungan dan pengelupasan lapisan.
3. Menggunakan prosedur penyemprotan otomatis menggunakan bantuan lengan robot pada proses *spraying* HVOF agar supaya didapatkan hasil yang seragam baik dari sisi ketebalan lapisan maupun kualitas lapisan.
4. Untuk mengamati struktur mikro dan fenomena oksidasi temperatur tinggi secara lebih dalam dapat dilakukan pengujian XRD, dan SEM-EDX.
5. Untuk mengetahui kekuatan ikatan antara lapisan dan substrat secara lebih pasti dapat dilakukan prosedur pengujian *pull-off strength test*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Nayar Alok. 2002. **The Steel Handbook**. New York: McGraw Hill.
- [2] ASM Handbook Vol. 1. 2005. **Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys**. USA: ASM International.
- [3] William D. Callister, Jr. 2007. **Material Science and Engineering**. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- [4] ASM Thermal Spray Society. 2004. **Handbook of Thermal Spray Technology**. USA: ASM International.
- [5] ASM Handbook Vol. 5. 2005. **Surface Engineering**. USA: ASM International.
- [6] ASM Handbook Vol. 8. 2005. **Mechanical Testing and Evaluation**. USA: ASM International.
- [7] Lutz-Michael Berger. 2014. "Application of Hardmetals as Thermal Spray Coatings". **Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials** Elsevier Ltd.
- [8] J.M. Miguel, J.M. Guilemany, S. Vizcaino. 2003. Tribological study of NiCrBSi coating obtained by different processes. **Tribology International** 36 (2003) 181–187.
- [9] M.Karagöz, S.Islak, S.Buytoz, B.Kurt. 16-18 May 2011. "Microstructural Characteristics of High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) sprayed NiCrBSi-SiC Composite Coating on a Low Alloy Steel". **6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)**, Elazı , Turkey.
- [10] B. Prawara, E.Martides, B.Priyono, H.Ardy, N.Rikardo. 2016. "Wear and Impact Resistance of HVOF Sprayed Ceramic Matrix Composites Coating". **American Institute of Physics** 1710, 030032.
- [11] M.R. Ramesh, S. Prakash, S.K. Nath, Pawan Kumar Sapra, and N. Krishnamurthy. September 2011. "Evaluation of

Thermocyclic Oxidation Behavior of HVOF-Sprayed NiCrFeSiB Coatings on Boiler Tube Steels”. **Journal of Thermal Spray Technology** 992-Volume 20(5).

- [12] V. Higuera Hidalgo, F.J. Belzunce Varela, A. Carriles Mene´ndez, S. Poveda Martı´nez. 2001. “A comparative study of high-temperature erosion wear of plasma sprayed NiCrBSiFe and WC–NiCrBSiFe coatings under simulated coal-fired boiler conditions”. **Tribology International** 34 (2001) 161–169.
- [13] Neil Birks, Gerald H. Meier dan Fred S. Pettit. 2006. **Introduction to the High-Temperature Oxidation of Metal. United States of America**: Cambridge University Press.
- [14] Oerlikon Metco, 2016. **Material Product Data Sheet**. Switzerland: Oerlikon Metco.

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan dari keluarga pendidik yang sederhana di Klaten, 01 Januari 1994, merupakan anak ketiga dari empat bersaudara pasangan Bapak Drs. Heri Susanto dan Dra. Siti Chobsah. Yang beralamat di Desa Tanon, Kecamatan Juwiring, Kabupaten Klaten. Pendidikan formal yang telah ditempuh yaitu tahun 1999-2005 bersekolah di SDN 1 Tanjung, kemudian tahun 2005-2008 melanjutkan ke SMPN 2 Wonosari Klaten, tahun 2008-2011 melanjutkan ke SMAN 1 Sukoharjo dan tahun 2011 melanjutkan pendidikannya di Program Studi Diploma Teknik Mesin Universitas Gadjah Mada. Setelah lulus jenjang pendidikan Diploma Teknik Mesin pada tahun 2014, penulis melanjutkan pendidikan S-1 di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2015.

Di jurusan D-3 Teknik Mesin UGM penulis mengambil spesialisasi di program studi desain manufaktur. Penulis sempat merasakan magang selama 6 bulan di PT. United Tractors Pandu Engineering sebagai Design Engineer di Divisi Design Engineering. Kemudian, di Departemen Teknik Mesin ITS penulis mengambil konsentrasi di bidang studi Metallurgy. Keinginan untuk mengamalkan ilmu yang didapatkan selama kuliah, mendorong penulis untuk mengambil topik tugas akhir dengan judul “Analisis Struktur Mikro, Nilai Kekerasan dan Ketahanan Oksidasi Campuran NiCrBSi-40SiC, NiCrBSi-40WC-Co dan Cr₃C₂-20NiCr Pada Proses Pelapisan HVOF”. Penulis sangat berharap ilmu yang telah didapat bisa bermanfaat dan diamankan untuk keluarga, lingkungan, bangsa dan negara. Penulis dapat dihubungi via email:

e-mail : cak.hilmi@gmail.com