

**STUDI INTEGRITAS SILINDER BERLAPIS YANG DIPRODUKSI
DENGAN METODE *HOT CENTRIFUGAL COATING***

(Tesis)

Oleh

**SELVIANA LARASATI
NPM 2325021001**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

**STUDI INTEGRITAS SILINDER BERLAPIS YANG DIPRODUKSI
DENGAN METODE *HOT CENTRIFUGAL COATING***

Oleh:

SELVIANA LARASATI

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar

MAGISTER TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Mesin

Fakultas Teknik Universitas Lampung



**PROGRAM PASCA SARJANA TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

This study investigates the formation of brass coatings on carbon steel using the hot centrifugal coating method by varying pouring temperatur (ambient, 950 °C, and 1050 °C), rotational speed (900–1500 rpm), and flux type (no flux, acetone, and acetone combined with sodium tetraborate). The objective is to evaluate the effects of these parameters on microstructural evolution, diffusion zone characteristics, and mechanical properties of the resulting *bimetallic* layer. The coating process was performed on ASTM A53 steel pipes, where molten brass was distributed along the inner surface by centrifugal force to promote metallurgical bonding.

The results indicate that specimens processed without preheating failed to form a bonded layer. At a pouring temperatur of 950 °C, the *interface* began to develop; however, micro-defects and incomplete bonding were still observed. Optimal coating quality was achieved at 1050 °C and a rotational speed of 1500 rpm with flux addition, resulting in a wide diffusion zone, a homogeneous *interface*, and minimal porosity. *Microhardness* measurements reveal peak hardness values within the transition zone, confirming the formation of a strong metallurgical bond between the brass coating and the steel substrate. Overall, the hot centrifugal coating method demonstrates high effectiveness in producing brass–steel *bimetal* structures with good structural integrity, indicating its potential for industrial applications requiring improved wear and corrosion resistance.

Keywords: hot centrifugal coating; brass–steel *bimetal*; diffusion zone; flux; microstructure; *microhardness*.

ABSTRAK

Penelitian ini mengkaji pembentukan lapisan kuningan pada baja karbon menggunakan metode *hot centrifugal coating* dengan memvariasikan temperatur penuangan (tanpa pemanasan awal, 950 °C, dan 1050 °C), kecepatan putar (900–1500 rpm), serta jenis fluks (tanpa fluks, aseton, dan kombinasi aseton dengan natrium tetraborat). Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi pengaruh parameter tersebut terhadap evolusi struktur mikro, karakteristik zona difusi, serta sifat mekanik dari lapisan *bimetal* yang terbentuk. Proses pelapisan dilakukan pada pipa baja ASTM A53, di mana kuningan cair didistribusikan oleh gaya sentrifugal ke permukaan dalam pipa untuk mendorong terbentuknya ikatan metalurgi.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa spesimen yang diproses tanpa pemanasan awal tidak membentuk lapisan yang terikat. Pada temperatur penuangan 950 °C, antarmuka mulai terbentuk, namun masih dijumpai cacat mikro dan ikatan yang belum sempurna. Kondisi optimal dicapai pada temperatur 1050 °C dan kecepatan putar 1500 rpm dengan penambahan fluks, yang menghasilkan zona difusi yang lebar, antarmuka yang homogen, serta porositas yang minimal. Hasil pengujian kekerasan mikro menunjukkan nilai kekerasan tertinggi berada pada zona transisi, yang mengindikasikan terbentuknya ikatan metalurgi yang kuat antara lapisan kuningan dan substrat baja. Secara keseluruhan, metode *hot centrifugal coating* terbukti efektif dalam menghasilkan struktur *bimetal* kuningan–baja dengan integritas struktural yang baik, sehingga berpotensi diaplikasikan pada kebutuhan industri yang memerlukan ketahanan aus dan korosi yang lebih baik.

Kata kunci: *hot centrifugal coating*; *bimetal* kuningan–baja; zona difusi; fluks; struktur mikro; kekerasan mikro.

Judul Tesis

**: STUDI INTEGRITAS SILINDER BERLAPIS
YANG DIPRODUKSI DENGAN METODE
HOT CENTRIFUGAL COATING**

Nama Mahasiswa

: Selviana Larasati

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2325021001

Program Studi

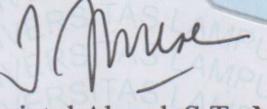
: Teknik Mesin

Fakultas

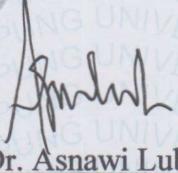
: Teknik



1. Komisi Pembimbing

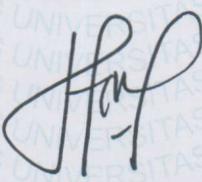

Dr. Jamiatul Akmal, S.T., M.T.

NIP. 196908011999031002


Dr. Asnawi Lubis, S.T., M.Sc.

NIP. 197004121997031006

2. Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin

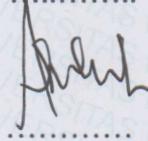
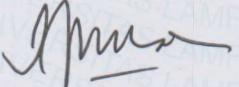


Dr. Harmen, S.T., M.T.
NIP. 196906202000031001

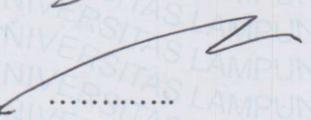
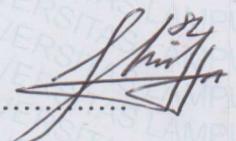
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua Penguji : Dr. Jamiatul Akmal, S.T., M.T.



Anggota Penguji : Dr. Asnawi Lubis, S.T., M.Sc.



Penguji Utama I : Dr. Eng. Shirley Savetlana, S.T., M.Met.

Penguji Utama II : Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc.

2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T.

NIP. 196910302000031001

3. Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung



Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.

NIP 196403261989021001

Tanggal Lulus Ujian Thesis : 15 Desember 2025

PERNYATAAN PENULIS

Tesis dengan judul “ STUDI INTEGRITAS SILINDER BERLAPIS YANG DIPRODUKSI DENGAN METODE *HOT CENTRIFUGAL COATING* “ dibuat sendiri oleh penulis dan bukan merupakan hasil plagiat siapa pun sebagaimana diatur didalam Pasal 27 Peraturan Akademik Universitas Lampung dengan Peraturan Rektor No. 02 Tahun 2024.

Bandar Lampung, 15 Desember 2025

Yang membuat pernyataan



Selviana Larasati

NPM. 2325021001

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Kabupaten Pringsewu, Provinsi Lampung pada tanggal 30 Juni 1995 sebagai anak pertama dari empat bersaudara, dari pasangan Bapak Benny Wahyudi dan Hesti Widijastuti. Penulis menempuh pendidikan dasar di SD NEGERI 7 GADINGREJO hingga tahun 2007, lalu dilanjutkan di SMP NEGERI 1 GADINGREJO yang diselesaikan tahun 2010, dan SMA NEGERI 1 GADINGREJO yang diselesaikan tahun 2013, hingga pada tahun 2013 penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung melalui Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN) dan lulus pada tahun 2019.

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai Anggota Humas. Selain aktif dalam HIMATEM, penulis juga pernah menjadi bagian dari UKM Forum Silaturrahim dan Studi Islam sebagai sekretaris departemen media informasi tahun 2016.

Penulis pernah melakukan kerja praktek (KP) di PT. SO GOOD FOOD, Lampung tahun 2018 dengan judul laporan ‘PERANCANGAN MODULAR CONVEYOR MESIN *GRINDING DESINEWED MEAT PRODUCT DAGING AYAM BERSTANDAR FOOD GRADE PADA RUMAH PEMOTONGAN AYAM DI PT. SO GOOD FOOD LAMPUNG’*

Pada tahun 2023 penulis terdaftar sebagai Mahasiswa Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Penulis sebagai asisten dosen Dr. Jamiatul Akmal, S.T., M.T. yang bertugas membantu dosen.

Kemudian pada tahun 2025 penulis pernah melaksanakan Tugas Akhir Thesis dengan judul “*STUDI INTEGRITAS SILINDER BERLAPIS YANG DIPRODUKSI DENGAN METODE HOT CENTRIFUGAL COATING*” pada tahun 2024-2025 dibawah bimbingan Dr. Jamiatul Akmal, S.T., M.T dan Dr. Asnawi Lubis, S.T., M.Sc.

SANWACANA

Assalamu'alaikum Warahmatullohi Wabarakatuh

Puji Syukur penulis panjatkan kepada Allah S.W.T yang telah memberikan rahmat dan hidayah, serta lindungan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan Tesis dengan lancar dan tetap dalam keadaan sehat. Shalawat serta salam tak lupa penulis sanjungkan kepada Nabi Muhammad S.A.W. yang telah membimbing umatnya menuju kehidupan yang berakhlak dan berilmu yang baik sehingga dapat menjalani kehidupan dengan baik dan benar. Tesis ini dibuat sebagai tanda hasil penggeraan Tesis yang penulis lakukan. Diharapkan karya tulis ini dapat menjadi salah satu bentuk perkembangan dalam ilmu di bidang mekanika, terkhusus dalam bidang mekanika struktur. Tesis ini juga merupakan salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik pada jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Semoga karya tulis ini dapat membawa manfaat bagi yang membaca dan yang mengutip serta dapat dijadikan acuan untuk studi-studi selanjutnya. Selesainya tesis ini tidak luput dari bantuan, bimbingan dan arahan dari semua pihak, oleh karena itu penyusun mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Jamiatul Akmal, S.T., M.T. sebagai Dosen Pembimbing I yang telah bersedia meluangkan waktu dan tenaga untuk membimbing penulis dalam penyusunan tesis ini.
2. Dr. Asnawi Lubis, S.T., M.Sc. selaku pembimbing kedua atas kesediaannya memberikan bimbingan, saran dan masukan dalam menyelesaikan tesis ini.
3. Dr. Eng. Shirley Savetlana, S.T., M.Met. selaku dosen penguji yang telah memberikan masukan selama proses pengujian.
4. Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc. selaku dosen penguji yang telah memberikan masukan selama proses pengujian.
5. Terimakasih kepada Laboratorium Fenomena Dasar Mesin, Laboratorium Material dan CV. Alsintan Muara yang sudah memfasilitasi penelitian tesis ini.
6. Orang tua penulis, Bapak Benny Wahyudi dan Ibu Hesti Widijastuti Atas segala kasih sayang, perjuangan dan pengorbanan tulus, serta selalu mendampingi, mendidik, mendoakan, mendukung, dan memberikan restu

penulis dapat tetap bersemangat dalam menjalankan serta menyelesaikan studi di Teknik Mesin.

7. Saudara kandung penulis, Angga Rizky Wahyudi, Keisya Chlesea Widijastuti dan Claudya Natalie yang selalu memberikan semangat, bantuan dan do'a untuk penulis.
8. Ibu Oktora Susanti, S.Pi.,M.Si., Ibu Fenny Aprilia, S.E., Bapak Prihamdhani dan Ibu Diah Suryandini yang selalu memberikan dukungan untuk penulis.
9. Seluruh Dosen dan Staf di Teknik Mesin Universitas lampung yang telah menjadi guru dan mengajarkan dasar pengetahuan yang dibutuhkan kepada penulis.
10. Teman-teman TM Angkatan 2013 dan MTM 2023 yang telah ada menemani, mendengarkan keluhan, memberikan motivasi, dan memberi dorongan semangat.

Penulis menyadari bahwa isi Tesis ini masih terdapat banyak kekurangan dan masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu penulis sangat mengharapkan saran dan kritik dari semua pihak yang bersifat membangun dalam rangka penyempurnaan Tesis ini. Semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi penulis khususnya dan bagi pembaca. Aamiin.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Bandar Lampung, 15 Desember 2025

Selviana Larasati

NPM 2325021001

MOTTO

“ Selalu berdo'a disetiap langkah agar Allah SWT bimbing, ridhoi, kuatkan dan bersihkan hati agar apa yang dikerjakan menjadi baik ”

“Jangan lupa senyum dan selalu semangat, ”

Selviana Larasati

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	iv
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
I. PENDAHULUAN	9
1.1 Latar Belakang.....	9
1.2 Rumusan Masalah	12
1.3 Batasan Masalah.....	13
1.4 Tujuan Penelitian.....	14
1.5 Sistematika Penulisan.....	14
II. TINJAUAN PUSTAKA	15
2.1. Logam Kuningan dan Baja.....	15
2.2. Proses Pelapisan Logam.....	15
2.3. Teori Difusi Atom dalam Sistem <i>Bimetal</i>	17
2.4. Teori Pembasahan Permukaan.....	18
2.5. Kecepatan Putar yang Disarankan dalam Proses <i>Centrifugal Coating</i> ..	19
2.6. Cacat Mikro: <i>Void</i> , Retak, dan Porositas	20
2.7. Logam Induk Silinder Berlapis	21
2.8. Metode Taguchi dalam Perancangan Eksperimen.....	23
2.9. Pengujian Kekerasan Vickers	23
2.10. Rumus dan Teori Kecepatan Putar pada Centrifugal Coating	25
III. METODE PENELITIAN	28
3.1 Diagram Alir.....	28
3.2 Rancangan Penelitian	30
3.3 Spesimen Pipa	31
3.3 Rancang Bangun <i>Centrifugal coating</i>	32
3.4 Alat dan Bahan Penelitian	34
3.5 Eksperimen	40
3.6 Pengujian Pipa Silinder	41
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	49
4.1 Hasil dan Pembahasan.....	49
4.2 Analisis Mesin <i>Hot centrifugal coating</i>	50

4.3	Analisis Pipa Berlapis	55
4.4	Uji Kekerasan <i>Mikrohardness</i>	73
4.5	Analisis Uji <i>Scanning Electron Mucroscopy</i> (SEM) dan <i>Energy Dispersive X-ray</i> (EDX).....	88
V. KESIMPULAN DAN SARAN.....		102
5.1	Kesimpulan.....	102
5.2	Saran.....	103
DAFTAR PUSTAKA.....		105
LAMPIRAN		

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 3.1 Rancangan Eksperimen Metode Taguchi (<i>Orthogonal Array L9</i>).....	30
Tabel 3.2 Desain Matriks Eksperimen (L9 <i>Orthogonal Array</i>).....	30
Tabel 3.1 Uji <i>Microhardness Vickers</i>	45
Tabel 4.1 Tabel Hasil Performa Mesin <i>Hot Centrifugal Coating</i>	50
Tabel 4.2 Tabel Hasil Pengujian Struktur Mikro	55
Tabel 4.3. Rekapitulasi Karakteristik Mikrostruktur Sampel	72
Tabel 4.4 Hasil Uji Kekerasan <i>Microhardness</i>	73
Tabel 4.5 Interpretasi <i>Probability-Value</i> Uji Microhardness	81
Tabel 4.6 Kuantitatif Komposisi Unsur (<i>Qout Map wt%</i>).....	96
Tabel 4.7 Kuantitatif Komposisi Unsur (<i>Qout Map at%</i>)	99

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 3.1 Rancangan Spesimen Uji	31
Gambar 3.2 Rancangan Mesin <i>Hot centrifugal coating</i>	33
Gambar 3.3. Mesin <i>Centrifugal coating</i>	33
Gambar 3.4 Gun Termometer	35
Gambar 3.5 Tungku Pemanas Logam Cair	35
Gambar 3.6 Mesin Gerinda Dan Sampel Uji	36
Gambar 3.7 Pipa baja karbon ASTM A53 3" SCH 40	37
Gambar 3.8 Grafik CuZn	38
Gambar 3.9 Aseton dan Natrium Tetraborat.....	39
Gambar 3.10 Gas LPG	40
Gambar 3.11 Mikroskop	42
Gambar 3.12 Spesimen Uji <i>Microhardness Vickers</i>	44
Gambar 3.13 Titik Pengujian	44
Gambar 3.14 Spesimen pengamatan SEM-EDX.....	48
Gambar 4.1 Pipa Baja Dengan Suhu 950 C	51
Gambar 4.2 Kecepatan Putar Pada <i>Tachometer</i>	52
Gambar 4.3 Proses Peleburan Kuningan.....	57
Gambar 4.4 Grafik CuZn Temperatur 878°C.....	58
Gambar 4.3 Struktur Mikro Sample 4.....	61
Gambar 4.4 Struktur Mikro Sample 5.....	63
Gambar 4.5 Struktur Mikro Sample 6.....	64
Gambar 4.6 Struktur Mikro Sampel 7.....	66
Gambar 4.7 Struktur Mikro Sampel 8.....	68

Gambar 4.8 Struktur Mikro Sampel 9	70
Gambar 4.9 Grafik Hasil Uji Kekerasan <i>Vickers Mikrohardness</i>	74
Gambar 4.10 Grafik <i>Main Effect Plot</i> Uji Kekerasan Mikro	83
Gambar 4.11 Grafik <i>Interaction Plot</i> Uji Kekerasan Mikro	86
Gambar 4.12 Citra SEM mode <i>Secondary Electron</i> (SE)	90
Gambar 4.13 Citra SEM <i>Back Scattered Electron Mode</i> (BSE)	93
Gambar 4.14 Grafik Kuantitatif Komposisi Unsur (<i>Qout Map wt%</i>).....	96
Gambar 4.15 Grafik Kuantitatif Komposisi Unsur (<i>Qout Map at%</i>).....	99

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam industri modern, penggunaan pipa logam menjadi komponen penting dalam berbagai sistem, mulai dari transportasi fluida (Velasco et al., 2025; Guo et al., 2025), proses termal (Bang et al., 2025), hingga transmisi tenaga mekanik (Zhai et al., 2025). Namun, pipa berbahan dasar baja yang banyak digunakan saat ini sering menghadapi dua tantangan utama, yaitu korosi (Zhang et al., 2025) dan keausan (Sahoo et al., 2024). Korosi disebabkan oleh paparan lingkungan agresif seperti fluida asam, air laut, atau uap panas, yang dapat merusak permukaan pipa dan mengurangi ketebalan dinding secara progresif (Zhou et al., 2017). Sementara itu, keausan disebabkan oleh gesekan mekanis antara permukaan dalam pipa dengan zat padat, fluida abrasif, atau komponen bergerak seperti piston, yang mempercepat kerusakan material (Singh & Prakash, 2016).

Beberapa sektor industri menggunakan pipa baja dalam kondisi operasional yang sangat ekstrem yaitu Industri geothermal dimana pipa harus mentransportasikan uap panas dengan kandungan senyawa korosif tinggi seperti H₂S dan CO₂ pada tekanan tinggi, yang mempercepat korosi dan scaling pada dinding pipa (Meng et al., 2024; Iglesias & Díaz, 2025; Cong et al., 2024; Martelo et al., 2024). Selanjutnya industri kelapa sawit (PKS) dimana pipa digunakan dalam sistem distribusi uap dan minyak sawit yang bersuhu tinggi dan mengandung senyawa kimia yang agresif, menyebabkan terjadinya korosi dan *fouling* (Zulfri et al., 2024). Lalu industri otomotif yang menggunakan komponen seperti silinder dan liner mesin mengalami kontak langsung dengan

piston dan fluida pelumas, memicu keausan berat pada permukaan dalamnya (Lyu et al., 2025).

Situasi ini menuntut pengembangan solusi pelapisan permukaan pipa yang mampu meningkatkan ketahanan terhadap korosi dan keausan sekaligus menjaga integritas struktural pipa baja (Martelo et al., 2024). Sebelumnya telah ada sejumlah metode pelapisan yang dikembangkan, namun sebagian besar masih memiliki keterbatasan, berikut ini beberapa metode yang sudah ada :

- *Cold/thermal spray coating* merupakan pelapisan partikel logam ke permukaan padat dengan kecepatan tinggi. Ikatan umumnya bersifat mekanis, bukan metalurgis, sehingga rentan delaminasi di bawah beban termal atau tekanan (Chung et al., 2018).
- *Electroplating* adalah proses elektrokimia untuk mendeposit logam ke permukaan substrat. Umumnya terbatas pada pelapisan tipis dan tidak cocok untuk lingkungan dengan keausan tinggi (Lee & Kim, 2015).
- *Hot power spinning* yang merupakan metode deformasi termomekanik logam pada suhu tinggi. Meski memiliki kekuatan ikatan yang cukup, proses ini mahal dan kurang cocok untuk pelapisan bagian dalam pipa (Zhang et al., 2014).

Masalah utama dari metode-metode tersebut adalah tidak terbentuknya ikatan metalurgi yang kuat antara lapisan pelindung dan logam induk, menyebabkan lapisan mudah terkelupas saat mengalami beban kerja berulang atau siklus termal.

Untuk mengatasi tantangan tersebut, diperlukan pendekatan baru yang lebih inovatif dan efektif. Salah satu pendekatan yang menjanjikan adalah *centrifugal coating* dan *thermal* yang dapat menciptakan *diffusion bonding*—ikatan metalurgi kuat antar logam akibat difusi atom pada suhu tinggi. *Centrifugal coating* menghasilkan gaya tekan tinggi secara radial yang mendorong logam cair (misalnya kuningan) ke dinding pipa baja, sementara proses dengan *thermal* dapat memperbaiki permukaan antarmuka sebelum proses pengecoran berlangsung.

Kuningan sebagai material pelapis memiliki keunggulan konduktivitas, ketahanan korosi, dan keausan, serta titik leleh yang relatif rendah (± 900 – 940 °C), membuatnya ideal untuk difusi ke permukaan baja jika dikombinasikan dengan proses termal yang sesuai. Oleh karena itu, penelitian ini akan mengkaji secara sistematis parameter temperatur, kecepatan rotasi, serta penggunaan fluks dalam proses pengecoran sentrifugal panas untuk menciptakan ikatan metallurgi yang kuat antara kuningan dan baja. Metode ini diharapkan mampu menghasilkan struktur lapisan yang tahan lama dan andal untuk aplikasi industri berat.

Rancang bangun mesin *centrifugal coating* memegang peranan penting dalam menentukan kualitas produk akhir, khususnya jika digunakan dalam penelitian pelapisan logam. Parameter utama yang perlu diperhitungkan dalam desain meliputi sistem putar (motor, *pulley*, transmisi), sistem penyangga, sistem cetakan, mekanisme kontrol kecepatan rotasi, serta ketahanan terhadap temperatur tinggi saat logam cair dituangkan (Stefanescu, 2008).

Dalam konteks pelapisan logam (*cladding*), penggunaan mesin *centrifugal coating* memberikan keuntungan karena dapat menghasilkan tekanan sentrifugal yang tinggi pada logam cair sehingga memungkinkan pembentukan ikatan metallurgi antara logam pelapis dan logam dasar (Rahbar et al., 2016). Salah satu aplikasi yang dikembangkan adalah pelapisan logam kuningan pada baja, dengan tujuan untuk menggabungkan sifat unggul dari masing-masing material: kekuatan mekanik tinggi dari baja dan ketahanan korosi serta konduktivitas dari kuningan (Callister, 2007).

Namun, keberhasilan pelapisan tidak hanya bergantung pada keberadaan gaya sentrifugal, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh parameter proses, seperti temperatur tuang logam pelapis, kecepatan putar mesin, dan penggunaan fluks untuk membersihkan permukaan logam dasar dari oksida (Han et al., 2017).

Logam cair kuningan harus memiliki kemampuan membasahi permukaan baja, yang dipengaruhi oleh bersihnya permukaan dari oksida dan

gaya tekan yang dihasilkan oleh putaran. Di sinilah peran fluks seperti aseton atau natrium tetraborat menjadi sangat penting dalam meningkatkan keberhasilan ikatan antarmuka (Lee et al., 2014).

Berbagai studi telah dilakukan untuk meneliti pelapisan logam dengan metode *centrifugal coating*, tetapi penelitian pada sistem kuningan–baja dengan fokus pada efek temperatur, kecepatan putar, dan jenis fluks masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan sebagai langkah lanjutan dari rancang bangun mesin *centrifugal coating* menuju aplikasi praktis, dengan tujuan mengevaluasi kualitas struktur mikro hasil pelapisan dan menentukan parameter optimal untuk menghasilkan ikatan metalurgi yang baik.

1.2 Rumusan Masalah

Pelapisan logam dengan metode *hot centrifugal coating* memerlukan kontrol parameter yang tepat agar dapat menghasilkan ikatan metalurgi yang kuat dan struktur mikro yang terbaik. Dalam hal ini, sistem logam kuningan–baja menghadirkan tantangan tersendiri karena perbedaan sifat fisik dan termal yang signifikan. Proses pelapisan yang tidak terkontrol dengan baik dapat menyebabkan gagalnya pembentukan lapisan yang seragam, zona transisi yang sempit, hingga timbulnya cacat mikro seperti porositas atau retakan pada antarmuka kedua logam.

Salah satu faktor penting yang memengaruhi hasil pelapisan adalah temperatur tuang logam cair. Temperatur yang terlalu rendah dapat menyebabkan logam pelapis tidak sepenuhnya mencair atau tidak mampu membasihi permukaan logam dasar dengan baik. Sebaliknya, temperatur yang terlalu tinggi berisiko menyebabkan reaksi logam yang berlebihan atau bahkan penguapan unsur-unsur paduan tertentu, seperti Zn dari kuningan. Oleh karena itu, perlu dilakukan kajian mengenai temperatur tuang yang optimal untuk membentuk ikatan yang baik antara kuningan dan baja.

Selain temperatur, kecepatan putar mesin *centrifugal coating* juga berperan besar dalam menentukan distribusi logam cair dan tekanan sentrifugal yang dihasilkan. Kecepatan putar yang terlalu rendah akan menyebabkan pembasahan tidak merata dan logam pelapis cenderung menumpuk di bagian bawah. Sementara itu, kecepatan yang terlalu tinggi dapat menimbulkan gaya inersia yang menyebabkan pemisahan fasa logam cair atau ketidakteraturan dalam pembentukan zona antarmuka. Dengan demikian, perlu dirumuskan bagaimana kecepatan putar memengaruhi kualitas struktur mikro hasil pelapisan.

Selain dua parameter tersebut, penggunaan fluks menjadi faktor kunci yang tidak boleh diabaikan. Fluks berfungsi menghilangkan lapisan oksida pada permukaan baja yang dapat menghambat kontak langsung antara logam cair dan logam padat. Tanpa fluks, pembentukan ikatan metalurgi akan sangat sulit dicapai meskipun temperatur dan tekanan sudah memadai. Oleh karena itu, peran dan efektivitas fluks — baik itu aseton sebagai pembasahan permukaan, maupun kombinasi dengan natrium tetraborat sebagai fluks aktif — perlu dikaji secara mendalam dalam proses pelapisan ini.

1.3 Batasan Masalah

Agar mendapatkan hasil yang maksimal dalam penelitian ini, maka dibutuhkan batasan masalah dengan asumsi sebagai berikut :

1. Penelitian ini membahas proses pelapisan logam kuningan pada baja menggunakan metode *hot centrifugal coating*.
2. Sampel dibuat dengan bentuk pipa baja sebagai substrat logam padat, dan kuningan komersial sebagai logam pelapis cair.
3. Parameter yang divariasikan dalam penelitian ini meliputi:
 - Temperatur tuang kuningan: ambient (tanpa pemanasan), 950 °C, dan 1050 °C.
 - Kecepatan putar mesin *centrifugal*: 900 rpm, 1200 rpm, dan 1500 rpm.

- Jenis fluks: tanpa fluks, aseton, dan kombinasi aseton + natrium tetraborat.
4. Analisis yang dilakukan adalah analisis struktur mikro, pengujian *microhardness*, SEM-EDX dan pengujian tarik.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menentukan parameter proses terbaik untuk menghasilkan struktur mikro yang optimal pada pelapisan kuningan–baja menggunakan metode *hot centrifugal coating*.

1.5 Sistematika Penulisan

Penyusunan thesis ini terdiri atas 5 Bab. Bab I Pendahuluan yang berisi tentang penjelasan latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah serta sistematika penulisan thesis. Bab II adalah Tinjauan Pustaka, yang berisi tentang teori-teori dasar yang berhubungan dengan topik thesis, serta mendukung pembahasan pada Bab IV. Bab III ialah Metode Penelitian yang berisi tentang bagaimana proses dalam pembuatan alat *centrifugal coating*, pembuatan silinder berlapis dan metode yang digunakan. Hasil dan Pembahasan pada Bab IV yang berisikan tentang analisis hasil pengujian pada eksperimen pembuatan silinder berlapis menggunakan metode *centrifugal coating*. Selanjutnya bagian akhir terdapat Simpulan dan Saran yang berisi simpulan dan hasil pembahasan yang didapatkan serta saran yang dapat diberikan oleh penulis untuk penelitian lebih lanjut. Selanjutnya Daftar Pustaka, dimana pada bagian ini berisikan tentang sumber-sumber kepustakaan yang digunakan, dan terakhir terdapat Lampiran berisikan tentang data-data yang mendukung dalam penulisan laporan akhir ini.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Logam Kuningan dan Baja

Baja merupakan logam *ferrous* yang memiliki kekuatan mekanik tinggi dan digunakan secara luas dalam struktur teknik dan industri. Baja memiliki titik leleh lebih tinggi (sekitar 1450 °C), serta menunjukkan performa struktural dan keuletan yang baik (Totten, 2006).

Kuningan adalah paduan logam yang terdiri dari tembaga (Cu) dan seng (Zn), yang dikenal memiliki sifat tahan korosi, konduktivitas listrik dan termal yang baik, serta kemampuan proses yang baik, khususnya untuk aplikasi teknik. Titik leleh kuningan relatif rendah yaitu sekitar 900–940 °C, sehingga cocok untuk digunakan sebagai logam pelapis (Callister, 2007).

2.2. Proses Pelapisan Logam

Pelapisan logam dilakukan untuk meningkatkan ketahanan permukaan logam dasar terhadap korosi, keausan, dan meningkatkan fungsionalitas. Teknik pelapisan berkembang mulai dari pelapisan elektro, pelapisan termal, hingga pelapisan dengan metode pengecoran logam cair seperti *centrifugal coating* (Davis, 2001).

Dalam metode pelapisan logam padat dengan logam cair, interaksi antarmuka menjadi kunci penting karena mempengaruhi pembentukan ikatan dan struktur mikro lapisan (Smith & Hashemi, 2011).

2.2.1. Berbagai Metode Pelapisan Logam

Pelapisan logam adalah proses teknik permukaan yang dilakukan untuk melapisi logam dasar (substrat) dengan logam lain guna meningkatkan sifat fungsional seperti ketahanan korosi, keausan, atau konduktivitas listrik. Ada berbagai metode pelapisan logam yang digunakan secara luas, tergantung pada tujuan, jenis material, dan biaya proses.

a. Pelapisan Elektrolitik (*Electroplating*)

Electroplating adalah metode pelapisan logam menggunakan arus listrik untuk mendepositkan ion logam dari larutan elektrolit ke permukaan substrat. Proses ini umum digunakan untuk pelapisan nikel, krom, dan emas pada baja atau tembaga. Meskipun hasilnya halus dan presisi, metode ini tidak membentuk ikatan metalurgi yang kuat, melainkan hanya ikatan fisik antar lapisan (Davis, 2001).

b. Pelapisan Termal (*Thermal Spray Coating*)

Pelapisan termal menggunakan energi panas (biasanya api oksigen-asetilen atau plasma) untuk melelehkan serbuk logam dan menyemprotkannya ke permukaan substrat. Metode ini cocok untuk pelapisan baja dengan logam seperti alumunium, seng, atau nikel, dan digunakan pada turbin, pipa, dan sistem kelistrikan (Pawlowski, 2008). Kelemahannya, pelapisan ini juga cenderung menghasilkan ikatan mekanik, bukan ikatan metalurgi, serta dapat memiliki porositas tinggi.

c. *Hot-Dip Galvanizing*

Metode ini dilakukan dengan mencelupkan baja ke dalam lelehan seng. Proses ini membentuk lapisan logam seng dan *intermetalik* seng-besi yang tahan terhadap korosi. Ikatan antara baja dan seng dalam galvanizing sebagian dapat berupa ikatan metalurgi karena terjadi reaksi antara logam cair dan substrat (Zhou & Song, 2014).

d. *Cladding Mekanik dan Rolled Bonding*

Metode ini menggunakan tekanan mekanis (misalnya melalui *rolling* atau *pressing*) untuk menyatukan dua lapisan logam berbeda. Proses ini memerlukan permukaan yang sangat bersih dan biasanya dilakukan pada temperatur tinggi agar terjadi difusi atom. Hasilnya lebih kuat dibanding pelapisan elektrolitik karena memungkinkan ikatan metalurgi (ASM International, 1993).

e. Pelapisan dengan *Centrifugal coating*

Metode ini merupakan teknik pelapisan logam cair pada substrat padat dengan bantuan gaya sentrifugal. Dibanding metode lain, *centrifugal coating* memiliki keunggulan dalam hal penetrasi logam cair ke pori mikro, kemungkinan terbentuknya ikatan metalurgi, dan ketebalan lapisan yang lebih seragam (Rahbar et al., 2016).

2.3. Teori Difusi Atom Dalam Sistem *Bimetal*

Difusi adalah perpindahan atom dari satu bagian material ke bagian lain akibat gradien konsentrasi. Dalam pelapisan logam cair ke logam padat, difusi terjadi ketika atom logam cair (misalnya Cu, Zn) memasuki kisi logam padat (Fe), atau sebaliknya. Proses ini diatur oleh hukum Fick dan dipengaruhi oleh suhu, waktu kontak, struktur kisi logam, serta kondisi permukaan (Shewmon, 1989).

Pada suhu tinggi, laju difusi meningkat secara eksponensial. Oleh karena itu, proses *hot centrifugal coating* dengan temperatur tuang tinggi memperbesar kemungkinan terjadinya difusi antarelemen dan pembentukan zona transisi antara kuningan dan baja (Porter & Easterling, 2009).

2.3.1. Ikatan Metalurgi dan Difusi Antar Logam

Ikatan metalurgi terbentuk ketika dua logam saling berdifusi dan membentuk zona transisi. Difusi dipengaruhi oleh temperatur, waktu, kemurnian permukaan, dan kelarutan antar unsur. Senyawa *intermetalik*

dapat terbentuk di zona ini, tergantung pada sistem logam yang digunakan (Porter & Easterling, 2009).

Dalam sistem Cu–Fe atau Cu–Zn–Fe, dapat terbentuk senyawa *intermetalik* seperti CuFe, FeZn₁₃, atau fasa campuran yang memengaruhi kekuatan dan kerapuhan lapisan (Zhou & Song, 2014).

2.3.2. Pembentukan Senyawa *Intermetalik*

Dalam sistem *bimetal* seperti Cu–Fe atau Cu–Zn–Fe, difusi antar atom dapat menghasilkan senyawa *intermetalik*, yaitu senyawa dengan struktur kristal tetap dan komposisi tertentu. Beberapa *intermetalik* yang umum ditemukan antara lain FeZn₁₃, CuFe₂, dan Cu₅Zn₈. *Intermetalik* memiliki sifat keras tetapi getas, dan dapat meningkatkan atau menurunkan kekuatan ikatan tergantung pada jumlah dan distribusinya (Zhou & Song, 2014).

Zona *intermetalik* ini biasanya terbentuk di antarmuka dan bisa menjadi indikasi keberhasilan difusi dan ikatan metallurgi, namun juga bisa menjadi titik lemah jika terlalu tebal atau tidak merata (Liang & Zhang, 2015).

2.4. Teori Pembasahan Permukaan

Pembasahan (*wetting*) adalah proses penting dalam pelapisan logam cair pada permukaan padat. Pembasahan baik terjadi bila energi permukaan logam cair rendah dan sudut kontak terhadap logam padat kecil. Hal ini dapat dicapai jika permukaan bebas dari oksida, dan logam cair memiliki mobilitas cukup tinggi (Han et al., 2017).

2.4.1. Peran Fluks Dalam Pengecoran

Fluks berfungsi untuk menghilangkan oksida dan kotoran dari permukaan logam sehingga pembasahan logam cair terhadap substrat menjadi lebih efektif. Aseton digunakan sebagai pembersih permukaan,

sedangkan natrium tetraborat (boraks) merupakan fluks aktif untuk sistem logam non-ferrous (Rajan et al., 1991).

Tanpa fluks, lapisan oksida akan menghambat pembentukan ikatan metalurgi antara logam cair dan padat sehingga fluks berperan besar dalam menurunkan tegangan permukaan dan menghilangkan oksida yang menghambat pembasahan. Tanpa fluks, logam cair tidak akan mampu membentuk ikatan penuh pada permukaan baja (Lee et al., 2014).

2.5. Kecepatan Putar Yang Disarankan Dalam Proses *Centrifugal coating*

Kecepatan putar dalam proses *centrifugal coating* adalah salah satu parameter paling penting yang memengaruhi kualitas lapisan logam cair pada substrat padat. Gaya sentrifugal yang dihasilkan dari rotasi memaksa logam cair tersebar merata pada dinding cetakan atau permukaan logam dasar. Besarnya gaya ini dinyatakan dengan rumus:

di mana m adalah massa logam cair, r adalah jari-jari rotasi, dan ω atau ω adalah kecepatan sudut.

Menurut Stefanescu (2008), kecepatan putar ideal tergantung pada diameter cetakan, jenis logam, dan bentuk produk. Namun secara umum:

- Untuk cetakan berdiameter kecil (25–100 mm), kecepatan 800–1800 rpm dianggap optimal.
 - Untuk cetakan besar, kecepatan bisa lebih rendah (300–800 rpm) karena massa logam lebih besar sehingga gaya sentrifugal tetap tercapai.

Penelitian Sahoo dan Pal (2012) menunjukkan bahwa kecepatan 1200–1500 rpm memberikan distribusi logam cair yang merata serta pembentukan zona transisi yang lebih luas antara dua logam. Mereka juga mencatat bahwa kecepatan di atas 1800 rpm cenderung menyebabkan segregasi unsur logam

akibat gaya inersia berlebih, serta meningkatkan risiko terbentuknya lapisan tidak homogen atau bahkan delaminasi.

- Kecepatan yang terlalu rendah kurang dari 900 rpm juga tidak direkomendasikan karena logam cair akan menumpuk di dasar cetakan dan tidak mampu membentuk lapisan merata. Oleh karena itu, pemilihan kecepatan harus mempertimbangkan (Rahbar et al., 2016) :
- Diameter dan bentuk cetakan
- Viskositas logam cair
- Ketebalan lapisan yang diinginkan
- Keseragaman pembasahan dan ikatan

2.6. Cacat Mikro: *Void*, Retak Dan Porositas

Dalam proses pelapisan logam cair terhadap substrat padat, seperti pada metode *hot centrifugal coating*, pembentukan cacat mikro merupakan tantangan utama yang dapat menurunkan kualitas ikatan antarmuka serta performa akhir material. Beberapa jenis cacat mikro yang umum terjadi meliputi *void* (rongga), porositas, dan retakan mikro.

2.6.1. *Void*

Void adalah rongga kecil yang terbentuk akibat adanya gas yang terperangkap selama proses pengecoran. Gas ini dapat berasal dari udara, kelembaban pada permukaan logam, atau reaksi kimia antara logam cair dengan oksida permukaan. *Void* juga dapat terbentuk jika logam cair tidak sepenuhnya membasahi permukaan substrat, yang biasanya disebabkan oleh buruknya pembersihan permukaan atau tidak digunakannya fluks (Huang & Lee, 2007).

2.6.2. Porositas

Porositas adalah akumulasi rongga-rongga kecil yang menyebar di dalam lapisan pelapis atau di zona antarmuka. Porositas dapat bersifat terbuka atau tertutup. Faktor penyebab utamanya adalah pendinginan terlalu cepat, pembekuan tidak merata, atau campuran logam cair yang tidak homogen. Porositas menurunkan kerapatan dan kekuatan lapisan serta mempercepat proses korosi di lingkungan agresif (Rahbar et al., 2016).

2.6.3. Retakan Mikro (*Microcrack*)

Retakan mikro dapat terjadi akibat tegangan termal antara logam pelapis dan substrat selama proses pendinginan. Perbedaan koefisien muai termal antara logam pelapis (misalnya kuningan) dan logam dasar (baja) menyebabkan tegangan sisa yang jika tidak dikompensasi dapat menghasilkan retakan mikro pada zona antarmuka atau dalam lapisan (Zhou & Song, 2014).

Tingkat keparahan cacat ini sangat dipengaruhi oleh (Han et al., 2017):

- Kualitas persiapan permukaan logam dasar
- Suhu dan kecepatan tuang
- Penggunaan fluks yang efektif
- Kecepatan pendinginan setelah pelapisan
- Keseragaman gaya sentrifugal

Identifikasi cacat-cacat ini dapat dilakukan dengan pengamatan mikroskop optik, serta dikonfirmasi dengan metode SEM (*Scanning Electron Microscopy*) atau uji non-destruktif lainnya, tergantung ketersediaan fasilitas laboratorium.

2.7. Logam Induk Silinder Berlapis

Logam Induk yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis Baja ASTM A53 3" SCH 40 merupakan salah satu jenis pipa baja karbon yang digunakan secara luas dalam industri perpipaan, konstruksi, dan manufaktur. Baja ini memiliki standar spesifikasi dari *American Society for Testing and Materials* (ASTM), dengan dua tipe utama: Tipe E (*welded*) dan Tipe S (*seamless*). Penelitian ini menggunakan spesifikasi ASTM A53 *Grade B*, ukuran nominal 3 *inch*, *Schedule 40*, yang umumnya digunakan untuk pipa tekanan menengah dan tinggi (ASTM, 2012).

Pipa baja SCH 40 dengan diameter nominal 3" memiliki:

- Diameter luar (OD): 88.9 mm
- Ketebalan dinding (T): 5.49 mm
- Komposisi kimia: dominan besi (Fe) dengan kandungan karbon maksimum 0.30%, mangan 1.2%, serta jejak fosfor dan sulfur

Kekuatan tarik dari baja A53 *grade B* adalah minimum 415 MPa, dan kekuatan luluh minimum 240 MPa. Baja jenis ini sangat cocok sebagai substrat pelapisan logam karena:

- Sifat mekaniknya tinggi
- Tidak mudah retak saat menerima beban termal dan mekanik
- Biaya produksinya rendah
- Struktur permukaan dapat dimodifikasi melalui pembersihan atau pemanasan

Dalam penelitian ini, baja A53 digunakan sebagai substrat padat dalam proses *hot centrifugal coating* yang dilapisi oleh logam kuningan cair. Karakteristik permukaan dan dimensi geometrinya berpengaruh terhadap pembentukan lapisan serta distribusi logam pelapis.

2.8. Metode Taguchi dalam Perancangan Eksperimen

Metode Taguchi adalah suatu pendekatan statistik untuk merancang eksperimen (*Design of Experiment/DOE*) yang dikembangkan oleh Genichi Taguchi. Tujuan utamanya adalah untuk mengidentifikasi kombinasi parameter proses yang optimal dengan jumlah eksperimen seminimal mungkin, menggunakan *array ortogonal* (Taguchi, 1986).

Prinsip utama metode Taguchi:

- Menggunakan matriks ortogonal (seperti L9, L16, L27) untuk merancang kombinasi faktor dan level
- Menilai pengaruh parameter terhadap kualitas menggunakan *Signal-to-Noise Ratio* (S/N Ratio)
- Fokus pada *robust design*, yaitu desain yang tahan terhadap variasi luar

Dalam penelitian ini, metode Taguchi digunakan untuk menyusun variasi perlakuan berdasarkan tiga parameter utama:

1. Temperatur tuang (ambient, 950 °C, 1050 °C)
2. Kecepatan putar (900, 1200, 1500 rpm)
3. Jenis fluks (tanpa fluks, aseton, aseton + natrium tetraborat)

Dengan tiga level untuk masing-masing parameter, kombinasi eksperimen dapat diatur secara efisien menggunakan array ortogonal L9 (3^3). Ini memungkinkan peneliti untuk mengevaluasi pengaruh setiap faktor tanpa harus melakukan 27 eksperimen (*full factorial*), sehingga menghemat waktu, biaya, dan material (Ross, 1996).

2.9. Pengujian Kekerasan Vickers

Pengujian kekerasan mikro Vickers merupakan salah satu metode karakterisasi mekanik yang digunakan untuk menentukan resistansi material

terhadap penetrasi beban kecil melalui pembuatan indentasi berbentuk piramida. Metode ini banyak digunakan dalam penelitian metalurgi, terutama pada material berlapis, sambungan las, daerah antarmuka difusi, serta logam yang mengalami perlakuan panas karena mampu memberikan informasi kekerasan dalam skala mikroskopis dengan presisi tinggi. Prinsip kerja uji Vickers didasarkan pada pembebanan penekan berbentuk piramida intan dengan sudut puncak 136° , kemudian pengukuran dua diagonal lekukan yang terbentuk dengan mikroskop optik berperbesaran tinggi. Nilai kekerasan dinyatakan dalam satuan Vickers Hardness (HV) yang dihitung menggunakan persamaan standar :

$$HV = \frac{1,8544 \times F}{d^2} \quad \dots \dots \dots \quad (2.2)$$

dimana:

HV = angka kekerasan Vickers (kgf/mm²),

F = beban uji dalam kilogram-force (kgf) (misal 0,1 kgf = 100 gf),

d = panjang diagonal lekukan rata-rata (mm).

Pendekatan kuantitatif ini memungkinkan perbedaan kekerasan antar fase logam, zona transformasi mikrostruktur, dan daerah transisi antar material dapat dianalisis dengan baik (Callister&Rethwisch,2018).

Dalam praktik pengujinya, beberapa faktor mempengaruhi akurasi nilai HV, antara lain kondisi permukaan spesimen, besarnya beban uji, durasi pembebanan, serta stabilitas indent. Preparasi permukaan yang baik diperlukan untuk menghindari kesalahan pengukuran diagonal yang dapat terjadi akibat goresan amplas atau relief mikrostruktur. Selain itu, standardisasi jarak antar indentasi dan jarak dari tepi spesimen minimal tiga kali panjang diagonal menjadi penting untuk menghindari pengaruh deformasi plastis residual antarleukan (ASTM,2013). Standar kekerasan mikro yang paling umum digunakan adalah ASTM E384, yang mengatur metode pengujian, beban uji antara 10 gf hingga 1000 gf, prosedur pengukuran diagonal, hingga tata cara pelaporan hasil. Dalam

konteks penelitian pipa *bimetal* baja–kuningan yang memiliki zona antarmuka sempit, metode Vickers menjadi sangat relevan karena mampu memetakan perubahan kekerasan secara bertahap pada jarak mikron dari permukaan.

Selain itu, uji Vickers banyak dipilih dalam studi mengenai material *bimetal* karena interpretasi nilai HV dapat dikaitkan dengan fenomena metalurgi seperti difusi unsur, pembentukan senyawa *intermetalik*, segregasi, dan perbedaan tingkat pengerasan akibat pendinginan cepat. Pada daerah antarmuka baja–kuningan yang mengalami proses casting sentrifugal, nilai kekerasan dapat meningkat atau menurun bergantung pada komposisi larutan padat, adanya fase β pada kuningan, serta difusi Fe–Cu yang dapat membentuk zona transisi mekanik yang khas. Studi terbaru menunjukkan bahwa nilai HV dapat digunakan sebagai indikator ketebalan lapisan difusi dan homogenitas ikatan *metallurgical bonding* pada komponen *bimetal* (Wang et al, 2022).

Dengan demikian, tinjauan pustaka mengenai uji kekerasan mikro Vickers menegaskan bahwa metode ini tidak hanya menjadi alat penguji kekerasan, tetapi juga metode diagnostik untuk memahami evolusi mikrostruktur, perilaku mekanik lokal, serta kualitas ikatan antarmuka pada material hasil proses manufaktur temperatur tinggi seperti centrifugal casting. Oleh karena itu, pemahaman terhadap prinsip kerja, standar uji, serta faktor-faktor yang mempengaruhi nilai HV menjadi landasan penting dalam melakukan analisis pada penelitian ini.

2.10. Rumus dan Teori Kecepatan Putar pada Centrifugal Coating

Proses centrifugal casting memanfaatkan putaran *mould* (cetakan) untuk menghasilkan gaya sentrifugal yang mendorong logam cair ke dinding cetakan, sehingga memungkinkan pengecoran tabung, pipa, atau benda silindris dengan ketebalan dinding yang relatif seragam dan padat.

Secara teori, gaya sentrifugal F_c yang bekerja pada massa logam cair dapat diturunkan dari hukum fisika klasik:

di mana:

m = massa logam cair (kg),

ω = kecepatan sudut (rad/s),

r = jari-jari dari pusat putaran ke dinding *mould* (m).

Kecepatan sudut ω sendiri berhubungan dengan kecepatan putar *mould* dalam rpm (N) melalui:

Dengan demikian, gaya sentrifugal juga dapat dipandang berbanding kuadrat terhadap kecepatan putar (rpm): $F_c \propto N^2$. Rumus ini membantu memahami bahwa sedikit peningkatan rpm menghasilkan peningkatan signifikan pada gaya sentrifugal, yang berdampak signifikan pada aliran logam, distribusi partikel, solidifikasi, dan ketebalan dinding coran.

Namun, dalam literatur proses pengecoran sentrifugal, parameter “kecepatan putar” (*rotational speed of the mould*) sering dijadikan variabel kritis yang dipilih berdasarkan ukuran cetakan, viskositas logam cair, volume cairan, serta bentuk cetakan bukan hanya berdasarkan rumus fisika saja.

Menurut tinjauan komprehensif dengan judul *Effect of processing factors on the characteristics of centrifugal casting* (Mohapatra et al, 2020) kecepatan putar mould (rpm) merupakan salah satu dari beberapa faktor proses yang menentukan karakteristik hasil *coating*, termasuk struktur mikro, distribusi fase atau inklusi, densitas, homogenitas, dan kualitas keseluruhan produk.

Dalam praktik, para peneliti sering mencari “kecepatan optimum” untuk *mould*, yaitu rpm di mana gaya sentrifugal cukup untuk memaksa seluruh logam cair menempel ke dinding *mould* dan menghasilkan produk dengan dinding

seragam dan minim cacat. Pada rpm terlalu rendah, logam mungkin tidak “terangkat” sepenuhnya ke dinding → hasil coran bisa tidak padat atau cacat; sedangkan rpm terlalu tinggi bisa menimbulkan turbulensi, gaya geser besar, atau cacat permukaan.

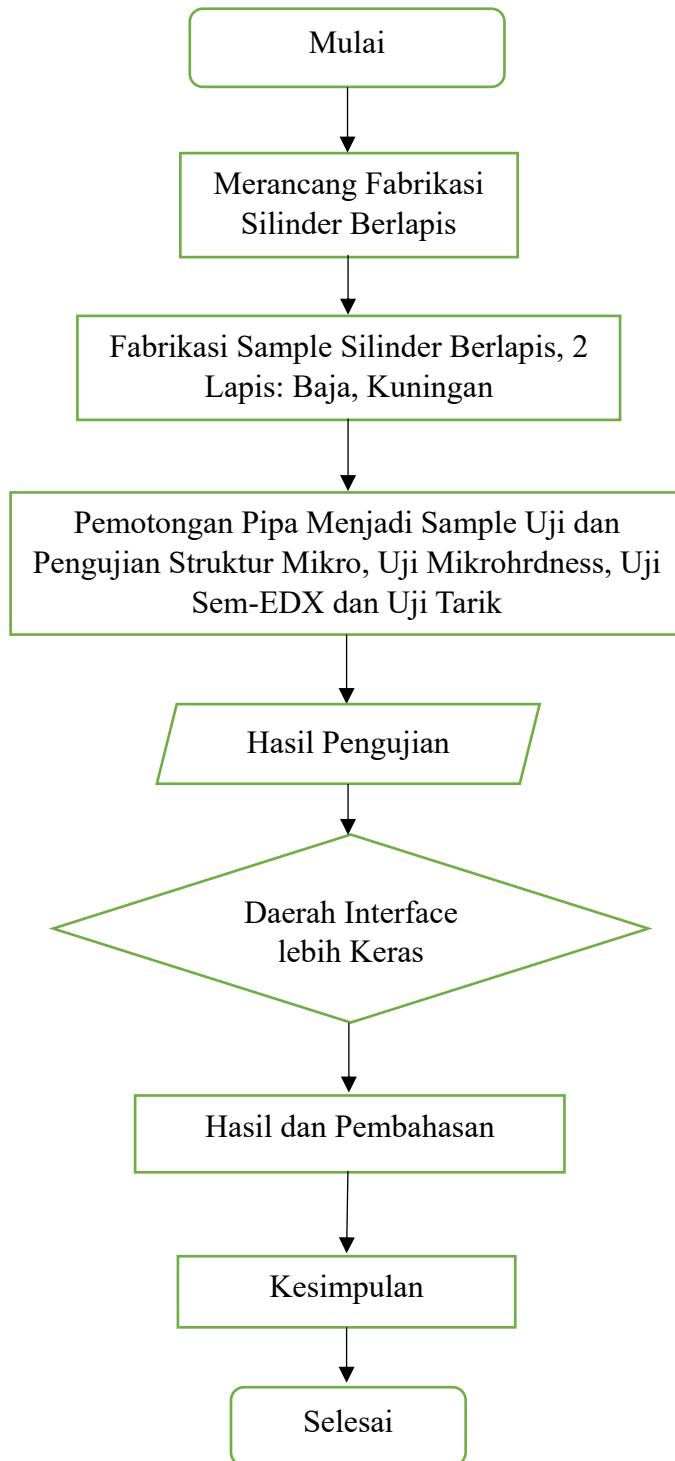
Selain itu, dalam penelitian eksperimental pada paduan logam, peningkatan kecepatan putar *mould* menunjukkan peningkatan sifat mekanik dan mikstruktur misalnya pengerasan, densitas, dan homogenitas dibandingkan metode pengecoran gravitasi biasa. Oleh karena itu, dalam tinjauan pustaka penelitian Anda, kombinasi antara rumus teoretis (fisika) dan hasil empiris dari literatur menjadi landasan kuat untuk menentukan rentang rpm yang akan digunakan dalam eksperimen (Narivskiy et al., 2024).

III. METODE PENELITIAN

Eksperimental pembuatan Silinder Berlapis menggunakan metode *hot centrifugal coating* merupakan penelitian yang dilakukan untuk mengetahui mengetahui perbedaan kekuatan mekanik antara silinder struktur berlapis dibandingkan dengan silinder yang terbuat dari satu jenis material dan mencoba menemukan Teknik fabrikasi silinder berlapis yang dapat diterapkan untuk industry, serta mengetahui struktur mikro pada silinder berlapis.

3.1 Diagram Alir

Dalam aplikasinya penlitian ini dibagi menjadi 3 tahapan, yaitu: rancang bangun *centrifugal coating*, eksperimen pembuatan silinder berlapis dan analisis hasil eksperimen



Dalam aplikasinya penlitian ini dibagi menjadi 3 tahapan, yaitu: rancang bangun *centrifugal coating*, eksperimen pembuatan silinder berlapis dan analisis hasil eksperimen.

3.2 Rancangan Penelitian

Adapun susunan penelitian yang dilakukan yaitu :

Tabel 3.1 Rancangan Eksperimen Metode Taguchi (*Orthogonal Array L9*)

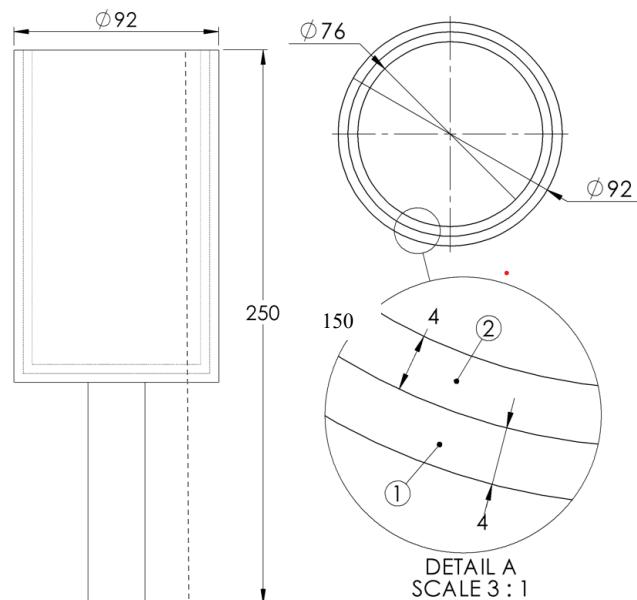
Faktor	Level 1	Level 2	Level 3
Temperatur Substrat	<i>Ambient</i>	950 °C	1050 °C
Kecepatan Putar	900 rpm	1200 rpm	1500 rpm
Fluks Treatment	No Fluks	Aseton	Aston + Natrium Tetraborat

Tabel 3.2 Desain Matriks Eksperimen (L9 Orthogonal Array)

Sampel	Temperatur	Kecepatan Putar	Penambahan Fluks
S1	Ambient	900 rpm	No Fluks
S2	Ambient	1200 rpm	Aseton
S3	Ambient	1500 rpm	Aseton + Natrium Tetraborat
S4	950 °C	900 rpm	Aseton
S5	950 °C	1200 rpm	Aseton + Natrium Tetraborat
S6	950 °C	1500 rpm	No Fluks
S7	1050 °C	900 rpm	Aseton + Natrium Tetraborat
S8	1050 °C	1200 rpm	No Fluks
S9	1050 °C	1500 rpm	Aseton

3.3 Spesimen Pipa

Penelitian ini menggunakan spesimen pipa *bimetal* yang terdiri atas baja karbon ASTM A53 sebagai substrat dan kuningan sebagai logam pelapis. Spesimen dirancang sesuai gambar teknik, dengan diameter luar 92 mm, diameter dalam 76 mm, dan panjang total 250 mm, serta dilengkapi poros penjepit berdiameter 25 mm seperti yang terlihat pada Gambar 3.1 untuk memastikan kestabilan posisi selama proses *hot centrifugal coating*. Lapisan kuningan berada pada bagian dalam pipa dan terbentuk melalui proses penuangan logam cair ketika pipa diputar pada kecepatan tinggi.



Gambar 3.1 Rancangan Spesimen Uji

Proses pembuatan spesimen diawali dengan pembersihan dan pemanasan awal pipa baja hingga mencapai temperatur variasi yang telah ditentukan. *Preheating* dilakukan untuk mengurangi kejutan termal dan memfasilitasi terbentuknya zona difusi antara baja dan kuningan. Pada tahap berikutnya, kuningan dilebur hingga mencapai kondisi cair homogen, kemudian ditambahkan fluks untuk meminimalkan oksidasi. Kuningan cair tersebut dituangkan ke dalam pipa yang sedang berputar pada kecepatan 900–

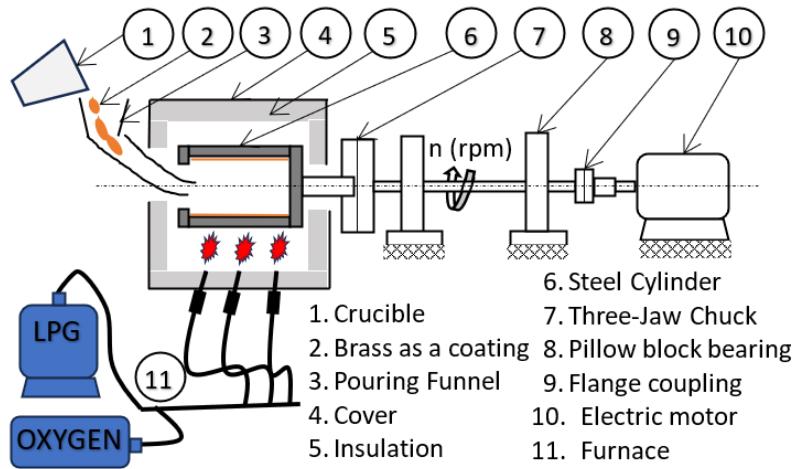
1500 rpm sehingga gaya sentrifugal mendorong logam cair menuju dinding pipa dan menghasilkan lapisan pelapis yang merata.

Setelah proses pembekuan, spesimen dipotong pada beberapa bagian sesuai detail pada gambar teknik untuk kebutuhan analisis. Potongan tersebut digunakan untuk pemeriksaan struktur makro, mikrostruktur, dan zona difusi menggunakan mikroskop optik serta SEM-EDX. Pengujian kekerasan dilakukan pada daerah baja, zona difusi, dan kuningan untuk mengetahui perubahan sifat mekanik akibat interaksi antarlogam. Selain itu, uji geser dilakukan untuk mengevaluasi kekuatan ikatan lapisan dan menentukan mode kegagalannya.

Seluruh rangkaian prosedur ini bertujuan memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai pengaruh temperatur tuang, kecepatan putar, dan penggunaan fluks terhadap pembentukan lapisan *bimetal* kuningan–baja dalam proses *hot centrifugal coating*.

3.4 Rancang Bangun *Centrifugal coating*

Rancang bangun *Centrifugal coating* dilakukan sebagai salah satu instrument yang harus dimiliki dalam penelitian ini. Gambar 3.2. merupakan rancangan mesin *centrifugal coating*.



Gambar 3.2 Rancangan Mesin *Hot centrifugal coating*

Proses rancang bangun ini dimulai dengan melakukan observasi design *centrifugal coating*. Observasi terkait eksperimen pembuatan silinder berlapis yang telah dilakukan sebelumnya. Selanjutnya dilakukan pembuatan design *centrifugal coating* serta menentukan material yang akan digunakan sehingga dapat berfungsi sebagaimana mestinya dan juga memperhatikan faktor keamanan saat nanti dilakukan percobaan. Hal ini harus dilakukan karena eksperimen menggunakan material dengan suhu tinggi. Selanjutnya dilakukan proses perakitan komponen hingga tahap *finishing*.



Gambar 3.3. Mesin *Centrifugal Coating*

Mesin *Hot centrifugal coating* yang dapat dilihat pada Gambar 3.3 menggunakan elektro motor dengan daya 1 HP sebagai penggerak utama yang dihubungkan dengan inverter untuk pengatur kecepatan, Inverter yang digunakan pada *centrifugal coating* dapat mengatur kecepatan putar dengan range 900 rpm-1500 rpm. Bagian rangkanya menggunakan besi siku yang dirakit melalui metode pengelasan. Selanjutnya bagian pelindung silinder berlapis besi yang dengan bentuk prisma heksagonal, yang dilapis menggunakan *ceramic fibre board* sebagai isolator pada pipa dan lingkungan. Hal ini juga dilakukan dengan mempertimbangkan keamanan dalam proses *coating*. Pemanas pada pipa menggunakan gas *tourch* pada bagian bawah prisma heksagonal. Selanjutnya sebagai penahan poros silinder agar putaran stabil digunakan dua buah *bearing* dan *clow 5inch*.

3.5 Alat dan Bahan Penelitian

Adapun alat dan bahan utama dalam penelitian ini dijelaskan sebagai berikut:

3.4.1. Alat

a. Mesin *Hot centrifugal coating*

Mesin *Hot centrifugal coating* pada Gambar 3.3 merupakan hasil rancang bangun yang menggunakan motor AC 1 HP dengan putaran maksimal 1500 RPM, dikendalikan dengan inverter. Rangka mesin terbuat dari baja tahan panas dengan struktur penyangga *bearing* ganda untuk stabilisasi putaran. Sistem pemanas menggunakan dua kompor berbahan bakar gas tekanan tinggi yang terintegrasi dalam ruang bakar untuk mencapai suhu target hingga 900 °C.

b. *Gun Thermometer* Digital

Alat *Gun Thermometer* Digital ini digunakan untuk mengukur suhu aktual saat proses pengecoran berlangsung.



Gambar 3.4 *Gun Thermometer*

c. *Tachometer*

Alat yang digunakan untuk mengukur kecepatan putaran saat proses pengecoran berlangsung. Tachometer yang digunakan dapat dilihat pada gambar 4.3.

d. Tungku pemanas logam cair (*crucible furnace*).

Tungku jenis ini digunakan untuk melebur logam hingga mencapai kondisi cair, yang kemudian dapat digunakan untuk proses pengecoran.



Gambar 3.5 Tungku Pemanas Logam Cair

e. Mesin pemotong metalografi.

Mesin yang digunakan adalah gerinda tangan untuk memotong sampel logam dari bentuk pipa menjadi kubus kecil agar dapat diamati struktur mikronya tanpa merusak mikrostruktur aslinya.



Gambar 3.6 Mesin Gerinda dan Sampel Uji

f. Mesin amplas dan poles.

Digunakan dalam tahap preparasi permukaan sampel metalografi setelah pemotongan.

- *Grinding* (amplas) bertujuan untuk meratakan dan menghilangkan bekas potong menggunakan kertas abrasif dengan tingkat kekasaran berbeda-beda (*grit* bertahap).
- *Polishing* (poles) menggunakan kain poles dan pasta (biasanya *alumina* atau *diamond suspension*) untuk menghasilkan permukaan cermin, siap untuk etching dan observasi mikroskopis.

g. Mikroskop Mikro dan Kamera Mikroskopik.

Digunakan untuk mengamati struktur mikro logam yang telah dipersiapkan.

- Mikroskop optik (mikro) memperbesar citra permukaan logam hingga 1000× atau lebih.
- Kamera mikroskopik berfungsi untuk mengambil dan merekam gambar hasil pengamatan.

h. Peralatan *Etching* (Larutan Nital dan Ammonium Persulfat).

Etching adalah proses kimiawi untuk menampakkan struktur mikro logam yang telah dipoles.

- Larutan Nital (biasanya campuran alkohol dan asam nitrat) digunakan untuk baja dan besi, membantu menonjolkan batas butir dan fasa.
- Larutan Ammonium Persulfat cocok untuk kuningan dan paduan tembaga, bekerja sebagai *oksidator* ringan yang menampakkan fasa dan struktur mikro tembaga-paduannya.

3.4.2. Bahan Penelitian

A. Logam dasar (substrat)

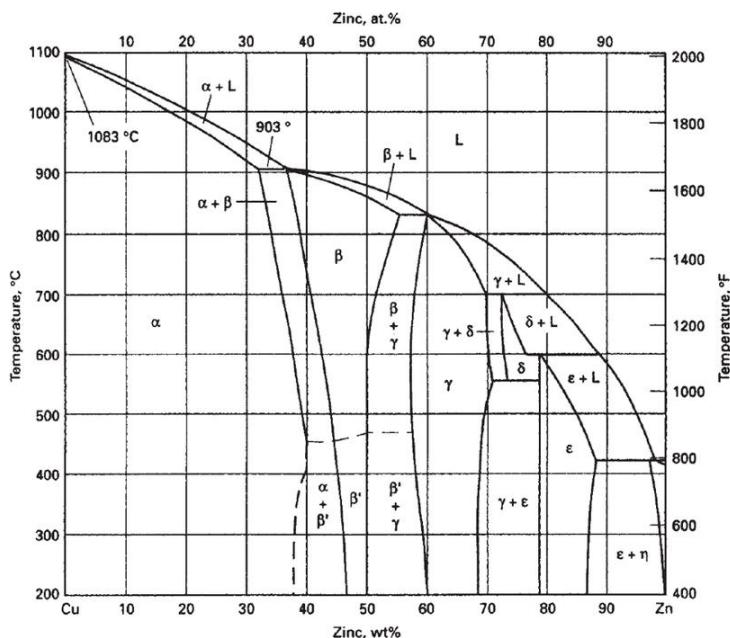
Logam dasar yang digunakan adalah pipa baja karbon ASTM A53 3" SCH 40. Jenis baja ini merupakan material umum yang digunakan untuk aplikasi pipa tekanan menengah, memiliki ketahanan mekanik dan termal yang baik, serta mudah dilas maupun dilapisi. Pipa memiliki diameter nominal 3 inci dengan ketebalan dinding sekitar 5,49 mm. Baja ASTM A53 terdiri dari komposisi kimia utama berupa Fe sebagai unsur dasar, dengan tambahan C (0,25%), Mn (\leq 0,95%), P (\leq 0,05%), dan S (\leq 0,045%). Material ini dipilih karena stabil terhadap deformasi termal pada suhu tinggi, serta umum digunakan di industri perpipaan sehingga hasil penelitian relevan untuk pengaplikasian.



Gambar 3.7 Pipa Baja Karbon ASTM A53 3" SCH 40

B. Logam pelapis

Material pelapis yang digunakan adalah kawat kuningan (*brass*) kawat las kuningan. Untuk melihat komposisi kimia kandungan antara tembaga dan seng dilakukan pengujian terlebih dahulu, dengan cara kuningan dipanaskan hingga titik lelehnya. Saat kuningan tepat akan meleleh suhunya diukur menggunakan termogun. Lalu suhu yang didapatkan disamakan dengan suhu yang ada di tabel CuZn sehingga akan didapatkan komposisi antara Cu dan Zn pada kawatlas kuningan yang digunakan pada penelitian ini. Kuningan dipilih karena memiliki konduktivitas panas yang tinggi, ketahanan terhadap korosi, serta kemampuan membentuk lapisan difusi yang baik dengan baja pada suhu tinggi.



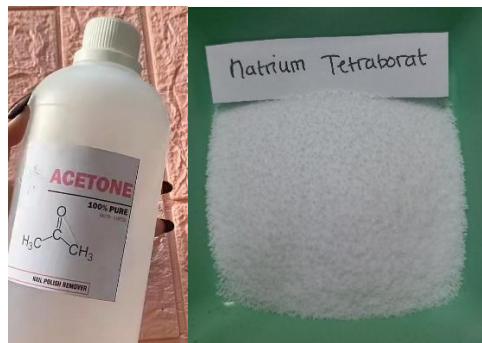
Gambar 3.8 Grafik CuZn

C. Fluks

Bahan fluks yang digunakan terdiri dari dua jenis, yaitu:

1. Aseton (C_3H_6O) – digunakan sebagai pelarut dan pembersih permukaan logam sebelum proses pelapisan.

- Aseton efektif dalam menghilangkan minyak, kotoran, dan lapisan oksida tipis yang dapat menghambat ikatan antarlogam.
2. Natrium tetraborat ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) atau boraks – berfungsi sebagai fluks aktif untuk menghilangkan lapisan oksida yang terbentuk selama proses pemanasan. Boraks mampu menurunkan tegangan permukaan logam cair, sehingga membantu pembasahan logam pelapis terhadap substrat dan mendukung terbentuknya ikatan difusi yang kuat antara baja dan kuningan.



Gambar 3.9 Aseton dan Natrium Tetraborat

D. Gas pembakar

Proses pemanasan pada penelitian ini menggunakan campuran gas LPG dan oksigen murni sebagai bahan bakar sistem pembakaran. Gas LPG (*Liquefied Petroleum Gas*) berfungsi sebagai sumber energi panas utama, sedangkan oksigen (O_2) ditambahkan untuk meningkatkan suhu nyala api agar mencapai temperatur target antara 900°C hingga 1100°C , yang dibutuhkan untuk melebur sebagian permukaan logam pelapis serta membentuk lapisan difusi pada antarmuka baja–kuningan.



3.10 Gas LPG

3.6 Eksperimen

Lapisan terluar atau logam induk pada silinder berlapis menggunakan baja ASTM A53 *Grade B*, lapisan dalam yaitu kuningan. Pada tahapan eksperimen dilakukan di CV. Alsintan Muara.

SOP fabrikasi pipa berlapis :

A. Persiapan Material:

- Membersihkan logam induk dan memanaskannya
- Fluks diaplikasikan sesuai perlakuan: tanpa fluks, hanya aseton atau kombinasi dengan boraks.
- Kuningan dilebur hingga meleleh pada temperatur $\pm 900^{\circ}\text{C}$ (pada perlakuan pipa induk suhu ambient).

B. Proses Pengecoran:

- Baja dipasang sebagai logam induk pada mesin *centrifugal*.
- Mesin diatur pada kecepatan putar yang ditentukan.
- Pada temperatur lingkungan (ambient) logam cair kuningan dituangkan ke dalam pipa saat mesin berputar. Sedangkan pada pipa induk dengan

suhu 950 dan 1050 kuningan langsung dimasukkan ke dalam pipa induk sebelum proses berlangsung.

C. Pendinginan dan Pemotongan:

- Setelah logam membeku, sampel didinginkan dalam udara terbuka.
- Pemotongan dilakukan pada setiap sampel untuk analisis struktur mikro.

D. Preparasi Metalografi:

- Sampel diamplas dan dipoles hingga permukaan reflektif.
- *Etching* dilakukan menggunakan larutan nital atau ammonium persulfat.

3.7 Pengujian Pipa Silinder

Setelah proses pembuatan silinder berlapis, tahapan selanjutnya adalah melakukan pengujian pada spesimen. Pengujian yang dilakukan adalah analisis struktur mikro, uji kekerasan *micro-vickers*, uji SEM-EDX dan uji Tarik

3.4.3. Pengamatan Struktur Mikro

Pada penelitian ini digunakan mikroskop optik merek OPTIKA yang dapat dilihat pada Gambar 3.11 sebagai alat utama untuk melakukan observasi struktur mikro pada sampel pipa *bimetal* baja–kuningan. Mikroskop ini berfungsi untuk memperbesar citra permukaan spesimen yang telah dipoles dan dietsa, sehingga memungkinkan analisis morfologi butir, zona ikat, dan ketebalan difusi antar-material.



Gambar 3.11 Mikroskop

Merupakan jenis mikroskop biologis/metalografi tipe *upright* dengan sistem iluminasi dari bawah (*transmitted light*) dan dapat digunakan juga untuk observasi reflektif pada permukaan logam yang dipoles. Sistem optik menggunakan binokular dengan *eyepiece* ganda yang dapat disesuaikan lebar pandangnya. Dilengkapi camera *head* digital OPTIKA pada *port* trinokular untuk dokumentasi citra mikrostruktur.

3.4.4. Pengujian Kekerasan *Vickers Micro Hardness*

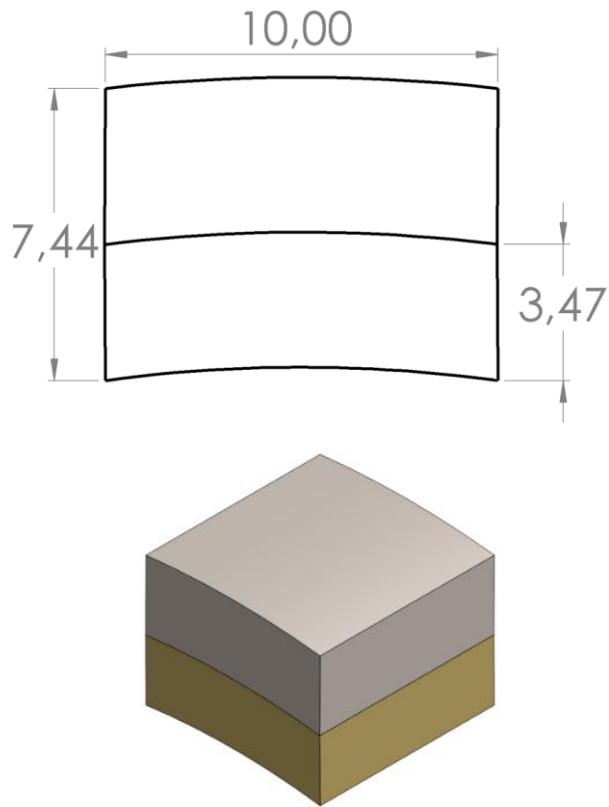
Pengujian kekerasan mikro Vickers dilakukan untuk mengetahui distribusi kekerasan pada daerah antarmuka (*interface*) antara lapisan kuningan dan baja hasil proses *hot centrifugal casting*. Nilai kekerasan mikro digunakan untuk mengevaluasi kualitas ikatan metallurgi, tingkat difusi antar logam, serta homogenitas struktur mikro setelah proses peleburan sentrifugal. Pengujian kekerasan mikro mengacu pada standar internasional: ASTM E384 – *Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*. Standar

ini menetapkan metode, gaya pembebanan, waktu pembebanan, serta cara pengukuran diagonal indentasi dan perhitungan nilai HV.

Pengujian dilakukan menggunakan perangkat *Microhardness Tester* dengan spesifikasi sebagai berikut :

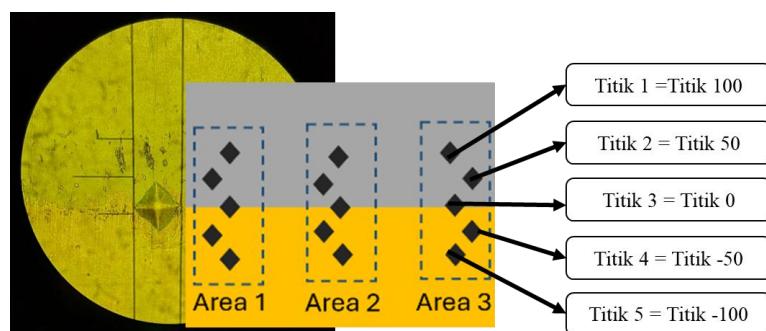
- LECO LM-800AT *Microhardness Tester*
- Indentor : *Vickers diamond pyramid* (136° apex angle)
- Beban uji : 192 gf (≈ 1.96 N)
- Dwell time : 10–15 detik
- Perbesaran optik : $40\times$ untuk fokus dan $50\times/100\times$ untuk pengukuran diagonal
- Mode pembacaan : otomatis dengan kamera optik digital

Alat ini mampu menghasilkan indentasi berukuran mikro dengan akurasi tinggi, sehingga cocok untuk mengukur zona tipis di sekitar *interface* kuningan–baja yang memiliki variasi sifat mekanik dalam skala mikron (LECO Corporation, 2020).



Gambar 3.12 Spesimen Uji *Microhardness Vickers*

Gambar 3.12 merupakan gambar spesimen uji kekerasan yang dilakukan untuk mengetahui variasi sifat mekanik pada setiap lapisan (kuningan, zona difusi, dan baja) serta menilai pengaruh proses pelapisan terhadap kekerasan permukaan dan antarmuka. Pengukuran dilakukan pada tiga daerah: daerah kuningan, daerah *interface* (tiga titik), daerah baja dapat dilihat pada Gambar 3.13.



Gambar 3.13 Titik Pengujian

Berikut ini merupakan tabel yang akan digunakan dalam pengujian :

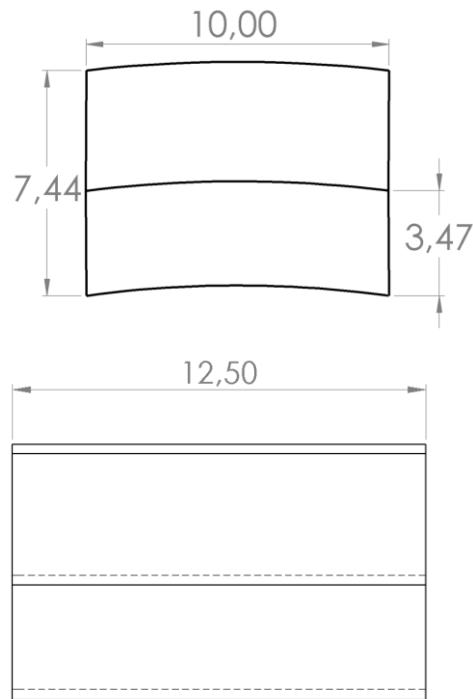
Tabel 3.3. Uji *Microhardness* Vickers

Sampel	Area	Titik	d_1 (μm)	d_2 (μm)	d_{rerata} (μm)	HV	$\text{HV}_{\text{rerata}}$	Standar Deviasi
Sampel 4 (S4) Temperatur 950 RPM 900 Aseton	S4.1	1						
		2						
		3						
		4						
		5						
	S4.2	1						
		2						
		3						
		4						
		5						
	S4.3	1						
		2						
		3						
		4						
		5						
Sampel 5 (S5) Temperatur 950 RPM 1200 Aseton + Natruim Tetraborat	S5.1	1						
		2						
		3						
		4						
		5						
	S5.2	1						
		2						
		3						
		4						
		5						
	S5.3	1						
		2						
		3						
		4						
		5						
	S6.1	1						
		2						
		3						

	S8.3	3									
		4									
		5									
Sampel 9 (S9) Temperatur 1050 RPM 1500 Aseton	S9.1	1									
		2									
		3									
		4									
		5									
	S9.2	1									
		2									
		3									
		4									
		5									
	S9.3	1									
		2									
		3									
		4									
		5									

3.4.5. Analisis SEM-EDX

Analisis struktur mikro menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (EDX) dilakukan untuk mengetahui kondisi morfologi serta komposisi unsur pada area antarmuka antara baja dan kuningan hasil proses *hot centrifugal casting*. Sampel dipotong pada bagian penampang melintang, kemudian melalui proses *mounting*, pengamplasan bertahap, pemolesan halus, dan pembersihan menggunakan *ultrasonic cleaner*. Setelah itu, sampel dilapisi tipis dengan *gold sputter* guna mencegah *charging* selama pengamatan. Gambar specimen uji dapat dilihat pada Gambar 3.11.



Gambar 3.14 Spesimen pengamatan SEM-EDX

Pengamatan SEM dilakukan menggunakan dua mode, yaitu *Secondary Electron* (SE) untuk mengamati topografi permukaan dan *Back Scattered Electron* (BSE) untuk melihat kontras komposisi antar fasa logam. Pengujian dilaksanakan pada tegangan percepatan 15 kV dan pembesaran yang disesuaikan dengan kebutuhan analisis. Untuk mengetahui komposisi kimia pada zona transisi, digunakan analisis EDX dengan parameter tegangan 15 kV, waktu akuisisi 336 detik, dan resolusi peta distribusi 768×512 piksel. Data yang diperoleh berupa komposisi unsur dalam satuan berat (wt%), jumlah atom (at%), dan pemetaan distribusi unsur Fe, Cu, Zn, O, Si, dan C.

Melalui integrasi hasil SE, BSE, dan EDX, struktur mikro pada antarmuka dapat dianalisis untuk mengidentifikasi morfologi lapisan, zona difusi, serta mekanisme ikatan metalurgi yang terbentuk selama proses pelapisan sentrifugal.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pembuatan dan pengujian pipa berlapis kuningan-baja dengan metode *Hot Centrifugal Coating*, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Proses *hot centrifugal coating* efektif menghasilkan ikatan *bimetal* baja–kuningan yang bersifat metalurgi, bukan sekadar perlekatan mekanis. Keberhasilan ini ditunjukkan oleh terbentuknya zona transisi kontinu pada daerah antarmuka sebagai hasil interaksi termal, difusi atomik, dan gaya sentrifugal selama proses berlangsung.
2. Mekanisme utama pembentukan ikatan antarlapisan dikendalikan oleh difusi unsur, di mana Zn dari kuningan terdifusi secara dominan dan lebih dalam ke dalam logam induk baja dibandingkan Cu. Difusi Zn tersebut menjadi faktor penentu terbentuknya zona *interdiffusion* Fe–Zn dan Fe–Cu yang berperan sebagai jembatan metalurgi antara lapisan kuningan dan baja.
3. Penerapan kecepatan putar dalam rentang 900–1500 rpm menghasilkan kondisi pembasahan dan tekanan efektif yang optimal, sehingga mendorong penetrasi kuningan cair ke permukaan baja dan mempercepat proses difusi. Kondisi ini memungkinkan terbentuknya *diffusion layer* yang lebih homogen dan stabil pada daerah antarmuka.
4. Struktur mikro lapisan menunjukkan gradasi yang jelas, mulai dari lapisan kuningan (Cu–Zn), zona *interdiffusion* Fe–Zn dan Fe–Cu yang bersifat sangat keras, hingga baja induk dengan struktur ferrit–pearlit.

Gradasi mikrostruktur ini mencerminkan transisi sifat mekanik yang bertahap dari lapisan ke substrat.

5. Profil nilai *microhardness* Vickers memperlihatkan puncak kekerasan tertinggi pada zona *interdiffusion*, yang berkorelasi langsung dengan pembentukan fase keras dan penguatan akibat difusi unsur. Hasil ini menegaskan bahwa zona antarmuka merupakan elemen kunci dalam menentukan performa mekanik pipa *bimetal* hasil pelapisan.

5.2 Saran

Adapun saran yang dirasa perlu dilakukan pada penelitian selanjutnya yaitu :

1. Diperlukan penambahan variasi temperatur pemanasan awal dan temperatur penuangan untuk mendapatkan pemahaman lebih mendalam mengenai pengaruh energi termal terhadap ketebalan zona difusi dan kualitas ikatan metalurgi. Penggunaan rentang temperatur yang lebih sempit tetapi bertahap dapat membantu menentukan titik optimum secara lebih presisi.
2. Analisis karakterisasi dapat diperluas dengan menggunakan metode difraksi sinar-X (XRD), *mapping* EDX, atau *line scan* untuk mengidentifikasi pembentukan fasa *intermetalik* Cu–Fe–Zn secara lebih spesifik di zona transisi. Hal ini penting untuk memahami mekanisme penguatan dan korelasinya terhadap hasil uji kekerasan maupun uji geser.
3. Penelitian selanjutnya sebaiknya memasukkan uji performa lapisan seperti uji korosi, uji keausan, dan uji fatik untuk memperoleh gambaran menyeluruh terhadap kelayakan aplikasi industri, khususnya pada lingkungan kerja ekstrem seperti geothermal, minyak, gas, dan pabrik kelapa sawit. Uji tersebut dapat memperkuat klaim bahwa metode ini tidak hanya

menghasilkan ikatan metallurgi yang baik, tetapi juga memiliki ketahanan jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- ASM International. (1993). Metals handbook: Volume 6 - Welding, brazing, and soldering. ASM International.
- ASTM International. (2012). ASTM A53/A53M-12: Standard Specification for Pipe, Steel, Black and Hot-Dipped, Zinc-Coated, Welded and Seamless. ASTM International.
- ASTM International. (2013). ASTM E384-17: Standard test methods for microindentation hardness of materials. ASTM International.
- Bang, Y. M., Cho, C., Bang, H., Kim, J.-G., & Park, S. (2025). Thermal and flow characteristics of multilayer pipes for transporting superheated steam. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 39, 465–476. <https://doi.org/10.1007/s12206-024-1243-1>
- Callister, W. D. (2007). Materials science and engineering: An introduction (7th ed.). John Wiley & Sons.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials science and engineering: An introduction* (10th ed.). Wiley.
- Chung, Y. C., Lee, J. S., & Choi, H. J. (2018). Bonding strength and wear resistance of thermal spray coatings under high temperature conditions. *Surface and Coatings Technology*, 350, 558–565. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.07.055>
- Cong, L., Lu, S., Jiang, P., Zheng, T., Yu, Z., & Lü, X. (2024). Research progress on CO₂ as geothermal working fluid: A review. *Energies*, 17(21), 5415. <https://doi.org/10.3390/en17215415>
- Davis, J. R. (2001). Surface engineering for corrosion and wear resistance. ASM International.
- Guo, C., Di, M., Gong, H., Zhang, J., Sun, S., Ye, K., Li, B., & Quan, L. (2025). Study of fluid flow characteristics and mechanical properties of aviation fuel-welded pipelines via the fluid–solid coupling method. *Aerospace*, 12(1), 60. <https://doi.org/10.3390/aerospace12010060>
- Han, S., Lee, J., Kim, H., & Park, S. (2017). Role of borate flux in copper–iron wetting and interface formation. *Journal of Alloys and Compounds*, 698, 459–466. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.12.327>

- Huang, S. C., & Lee, C. (2007). Formation of *voids* in metal clad *interfaces*. *Journal of Materials Processing Technology*, 192–193, 44–50. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.039>
- Iglesias, N., & Díaz, E. (2025). Influence of H₂S and CO₂ partial pressures and temperatur on the corrosion of superduplex S32750 stainless steel. *Corrosion and Materials Degradation*, 6 (2), 20. <https://doi.org/10.3390/cmd6020020>
- Khanna, O. P. (2010). *A Textbook of Welding Technology*. Dhanpat Rai Publications.
- Kim, H., Park, J., & Lee, D. (2019). *Interface* bonding mechanism in *bimetallic* pipes produced by *centrifugal coating*. *Materials Science and Engineering A*, 740–741, 410–418. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.10.103>
- LECO Corporation. (2020). *LM-800AT Microhardness Tester Operation Manual*. LECO Corporation.
- Lee, J., Park, C., & Choi, Y. (2014). Effect of flux on *interface* formation in dissimilar metal welding. *Welding Journal*, 93(3), 75–82.
- Lee, S. H., & Kim, H. J. (2015). Limitations of electroplating in high-stress environments: Case study in automotive applications. *Journal of Coating Technology and Research*, 12(3), 423–430. <https://doi.org/10.1007/s11998-014-9632-x>
- Liang, W., & Zhang, T. (2015). Interfacial bonding of Cu–Fe *bimetals*. *Materials Characterization*, 106, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.04.021>
- Liu, Y., Wang, Y., & Zhang, X. (2020). Microstructure evolution and interfacial bonding of dissimilar metal joints in high-temperatur diffusion environments. *Materials Characterization*, 167, 110489. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110489>
- Lyu, X., Hu, J., Wang, Y., et al. (2025). Surface characterization of cylinder liner–piston ring friction pairs under different temperatur and load by power spectral density method. *Lubricants*, 13(6), 237. <https://doi.org/10.3390/lubricants13060237>
- Male, A. T., & Cockcroft, M. G. (1993). *Materials processing and manufacturing science*. Prentice Hall.
- Martelo, D., Holmes, B., Kale, N., Scott, S. W., & Paul, S. (2024). Investigation of scaling and materials' performance in simulated geothermal brine. *Materials*, 17(21), 5250. <https://doi.org/10.3390/ma17215250>
- Meng, S., Yue, P., Zhang, S., Li, H., Zhao, Y., Hua, Y., Zhang, T., & Wang, F. (2024). Synergistic effects of CO₂ and H₂S on stress corrosion cracking of stainless steel 254SMo in an extremely aggressive oil-field environment. *Corrosion Communications*, 16, 81–95. <https://doi.org/10.1016/j.corcom.2024.03.003>

- Mohapatra, S., Sarangi, H., & Mohanty, U. (2020). *Effect of processing factors on the characteristics of centrifugal casting*. Manufacturing Review, 7, 26. <https://doi.org/10.1051/mfreview/2020024>
- Narivskiy, A., Polyvoda, S., Voron, M., & Semenko, A. (2024). Influence of centrifugal casting parameters on Al–Mg alloy castings microstructure and mechanical properties. *Metallurgical Research & Technology*, 122(1), 113. <https://doi.org/10.1051/metal/2024105>
- Pawlowski, L. (2008). The science and engineering of thermal spray coatings(2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Porter, D. A., & Easterling, K. E. (2009). Phase transformations in metals and alloys (3rd ed.). CRC Press.
- Rahbar, N., Karimi, A., & Kermanpur, A. (2016). *Centrifugal coating of bimetallics: Characterization of interface*. Materials & Design, 95, 219–229. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.093>
- Rajan, T. V., Sharma, C. P., & Sharma, A. (1991). Heat treatment: Principles and techniques. PHI Learning.
- Ross, P. J. (1996). Taguchi techniques for quality engineering(2nd ed.). McGraw-Hill.
- Rossi, F., & Lecoanet, F. (2013). Influence of fluxing agents on interfacial bonding during metal–metal composite coating. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(2), 298–304. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.09.008>
- Sahoo, M., & Pal, S. (2012). *Centrifugal coating: Effect of speed on microstructure*. International Journal of Cast Metals Research, 25(4), 235–240. <https://doi.org/10.1179/1743133612Y.0000000006>
- Shewmon, P. G. (1989). Diffusion in solids(2nd ed.). McGraw-Hill.
- Singh, P., & Prakash, S. (2016). Wear behavior of coated cylinder liner materials for internal combustion engines. *Surface & Coatings Technology*, 303, 388–395. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.12.046>
- Smith, W. F., & Hashemi, J. (2011). Foundations of materials science and engineering (5th ed.). McGraw-Hill.
- Stefanescu, D. M. (2008). *Science and engineering of coating solidification* (2nd ed.). Springer.
- Taguchi, G. (1986). *Introduction to quality engineering: Designing quality into products and processes*. Asian Productivity Organization.
- Totten, G. E. (2006). *Steel heat treatment handbook*. CRC Press.

- Wang, X., Tang, B., Wang, L., Wang, D., Dong, W., & Li, X. (2022). Microstructure, *microhardness* and tribological properties of bronze–steel *bimetallic* composite produced by vacuum diffusion welding. *Materials*, 15(4), 1588. <https://doi.org/10.3390/ma15041588>
- Zhang, W., Chen, X., & Liu, Z. (2014). Analysis of hot power spinning process for inner-surface coating of steel tubes. *Journal of Manufacturing Processes*, 16(3), 417–425. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2014.03.001>
- Zhou, F., Wang, Y., & Liu, Z. (2017). Friction and wear properties of carbon steel in corrosive environments. *Tribology International*, 113, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.09.027>
- Zhou, H., Wang, Z., Liu, Z., & Chen, G. (2016). Influence of centrifugal speed on the interfacial bonding of *bimetallic* coatings. *Materials Science and Engineering: A*, 668, 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.05.061>
- Zhou, Y., & Song, X. (2014). *Interface* characteristics in dissimilar metal clad plates. *Materials Science Forum*, 783–786, 120–126. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.783-786.120>
- Zulfri, M., Ali, N., Mulyati, S., Hasanuddin, I., & Fonna, S. (2024). The *atmospheric* corrosion of structural steel after exposure in the palm oil mill ind Aceh–Indonesia. *Indonesian Journal of* <https://doi.org/10.22146/ijc.62769>