

**SIMULASI 2D ELEMEN HINGGA PADA PIPA BAJA BERLAPIS
KUNINGAN HASIL PRODUKSI *HOT CENTRIFUGAL COATING*
DENGAN BEBAN INTERNAL *PRESSURE***

(Skripsi)

Oleh

**MUHAMMAD HUSSEIN
NPM 2115021054**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

**SIMULASI 2D ELEMEN HINGGA PADA PIPA BAJA BERLAPIS
KUNINGAN HASIL PRODUKSI *HOT CENTRIFUGAL COATING*
DENGAN BEBAN INTERNAL *PRESSURE***

Oleh

MUHAMMAD HUSSEIN

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

SIMULASI 2D ELEMEN HINGGA PADA PIPA BAJA BERLAPIS KUNINGAN HASIL PRODUKSI *HOT CENTRIFUGAL COATING* DENGAN BEBAN INTERNAL *PRESSURE*

Oleh

MUHAMMAD HUSSEIN

Pipa baja berlapis kuningan produksi *Hot Centrifugal Coating* (HCC) memiliki keunggulan tahan korosi, namun perbedaan sifat material menimbulkan risiko kegagalan struktural. Penelitian ini bertujuan menganalisis distribusi tegangan pada pipa tersebut akibat beban tekanan internal sebesar 120 MPa menggunakan simulasi *Finite Element Method* (FEM) 2D dengan ANSYS *Static Structural*. Model geometri terdiri dari pipa baja (tebal 4,2 mm) dan kuningan (3,16 mm), dengan ikatan antarmuka dimodelkan menggunakan *Cohesive Zone Method* (CZM). Hasil simulasi menunjukkan tegangan radial tekan maksimum sebesar -119,84 MPa pada dinding dalam. Terjadi diskontinuitas signifikan pada tegangan *hoop*, di mana lapisan baja menanggung beban jauh lebih besar (812,49 MPa) dibandingkan lapisan kuningan (390,39 MPa) karena kekakuannya yang lebih tinggi. Selain itu, ditemukan konsentrasi tegangan geser pada antarmuka material (maksimum 0,2 dan -0,3 MPa). Disimpulkan bahwa antarmuka merupakan area paling kritis yang rentan terhadap delaminasi akibat ketidakcocokan regangan (*strain mismatch*).

Kata Kunci: *Hot Centrifugal Coating*, Pipa Berlapis, *Finite Element Method* (FEM), *Cohesive Zone Method* (CZM), Tekanan Internal.

ABSTRACT

2D FINITE ELEMENT SIMULATION OF BRASS-LINED STEEL PIPE PRODUCED BY HOT CENTRIFUGAL COATING SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE

By

MUHAMMAD HUSSEIN

Brass-lined steel pipes produced via Hot Centrifugal Coating (HCC) offer superior corrosion resistance; however, differences in material properties pose risks of structural failure due to uneven stress distribution. This study aims to analyze the stress distribution within these pipes under an internal pressure of 120 MPa using a 2D Finite Element Method (FEM) simulation in ANSYS Static Structural. The geometric model consists of a steel pipe (4.2 mm thickness) and a brass liner (3.16 mm thickness), with the bonding interface modeled using the Cohesive Zone Method (CZM). The simulation results reveal a maximum compressive radial stress of -119.84 MPa at the inner wall. A significant discontinuity is observed in the hoop stress distribution, where the steel layer bears a much higher load (812.49 MPa) compared to the brass layer (390.39 MPa) due to its higher stiffness. Furthermore, a shear stress concentration (0,2 and -0,3 MPa) was detected at the material interface. It is concluded that the interface is the most critical zone, being susceptible to delamination caused by strain mismatch.

Keywords: Hot Centrifugal Coating, Lined Pipe, Finite Element Method (FEM), Cohesive Zone Method (CZM), Internal Pressure.

Judul Skripsi

**: SIMULASI 2D ELEMEN HINGGA PADA PIPA
BAJA BERLAPIS KUNINGAN HASIL
PRODUKSI *HOT CENTRIFUGAL COATING*
DENGAN BEBAN INTERNAL PRESSURE**

Nama Mahasiswa

: Muhammad Hussein

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2115021054

Program Studi

: S1 Teknik Mesin

Jurusan

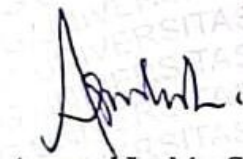
: Teknik Mesin

Fakultas

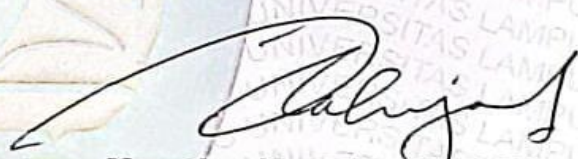
: Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing



Asnawi Lubis, S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP. 197004121997031006



Nurcahya Nugraha, S.T., M.T.
NIP. 199510112024061001

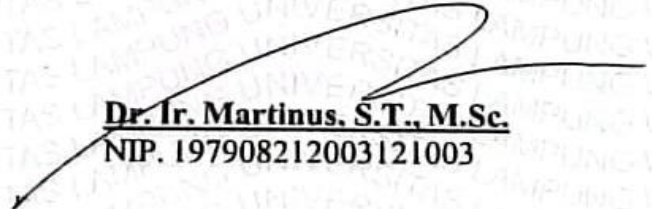
Mengetahui,

2. Ketua Jurusan Teknik Mesin

3. Ketua Prodi S1 Teknik Mesin



Ahmad Souli, S.T., M.T.
NIP. 197408162000121001

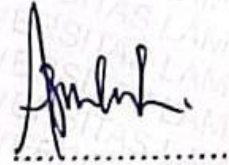


Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc.
NIP. 197908212003121003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Asnawi Lubis, S.T., M.Sc., Ph.D.**



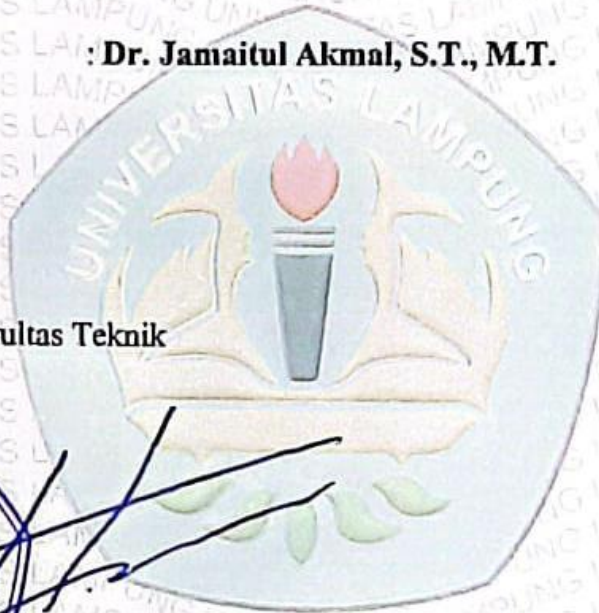
Sekretaris Penguji : **Nurchaya Nugraha, S.T., M.T.**



Anggota : **Dr. Jamaitul Akmal, S.T., M.T.**



2. Dekan Fakultas Teknik



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

NIP. 196910302000031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 27 Februari 2026

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Hussein

NPM : 2115021054

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul "**SIMULASI 2D ELEMEN HINGGA PADA PIPA BAJA BERLAPIS KUNINGAN HASIL PRODUKSI *HOT CENTRIFUGAL COATING* DENGAN BEBAN INTERNAL PRESSURE**" merupakan karya saya sendiri dan bukan karya orang lain. Semua tulisan yang tertuang di skripsi ini telah mengikuti kaidah penulisan karya ilmiah Universitas Lampung. Apabila di kemudian hari terbukti skripsi saya merupakan hasil penjiplakan atau dibuat orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi berupa pencabutan gelar yang saya terima.

Bandar Lampung, 4 Februari 2026



METERAN TEMPORER
BANX273609730

Muhammad Hussein

NPM. 2115021054

RIWAYAT HIDUP



Lahir di Kota Prabumulih pada hari Jum'at, 19 April 2003. Anak kedua dari dua bersaudara, dari Bapak Witomo Atmojo dan Ibu Meiny Agustini. Menyelesaikan Pendidikan di SDN 48 Prabumulih pada tahun 2015, kemudian menyelesaikan Pendidikan menengah pertama di SMP N 2 Prabumulih pada tahun 2018 dan lulus dari Pendidikan menengah atas di SMA N 2 Prabumulih pada tahun 2021.

Pada tahun 2021, terdaftar sebagai mahasiswa jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN. Kegiatan-kegiatan yang dilakukan selama menjadi mahasiswa yaitu sebagai berikut :

1. Menjadi anggota Bidang Kreatifitas Himpunan Teknik Mesin periode 2023/2024.
2. Menjadi Asisten Dosen mata kuliah Praktikum Fenomena Dasar di Jurusan Teknik Mesin pada tahun ajaran Genap 2024/2025.
3. Menjadi Asisten Dosen mata kuliah Praktikum Fenomena Dasar di Jurusan Teknik Mesin pada tahun ajaran Ganjil 2025/2026
4. Melaksanakan Kerja Praktik Pada Bulan Januari 2025 – Februari 2025 di PT. Bukit Asam Tbk Tanjung Enim.
5. Melaksanakan Kuliah Kerja Nyata di Desa Rajabasa lama 2 Lampung Timur Pada Tahun 2024.

MOTO

“ Satu langkah nyata lebih berharga dari pada seribu rencana “

-Muhammad Hussein-

PERSEMBAHAN

Alhamdulillahirobbil'alamin

Puja dan puji Syukur tercurahkan kepada Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas segala Rahmat dan Karunia-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini.

Shalawat serta salam selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW.

Kupersembahkan karya ini kepada :

Keluarga Tercinta

Papa, Mama, Ayuk

Yang senantiasa memberikan yang terbaik dan do'a terbaik yang selalu menyertaiku. Kuucapkan terima kasih yang sebesar besarnya kepada papa dan mama karena telah mendidik dan membesarkanku dengan cara yang dipenuhi kasih sayang, dukungan, dan pengorbanan. Kupersembahkan semua ini untuk kalian. Tanpa kalian, semua ini tidak akan terwujud. Setiap Langkah yang kuambil adalah hasil dari cinta dan kerja keras kalian.

Seluruh Keluarga Teknik Mesin 2021

Yang selalu memberikan motivasi dan dukungan.

Almamater Tercinta, Universitas lampung dan Jurusan Teknik Mesin

Tempat menimba ilmu, untuk menjadi bekal hidup dunia dan akhirat.

SANWACANA

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat, taufik, dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul “Simulasi 2D Elemen Hingga pada Pipa Baja Berlapis Kuningan hasil Produksi *Hot Centrifugal Coating* dengan Beban Internal Pressure” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Skripsi ini adalah bukti perjalanan panjang yang tidak mudah. Ada proses yang senyap, ada lelah yang tak terlihat, namun setiap langkah selalu disertai keyakinan bahwa usaha yang tulus tidak akan sia-sia. Di balik halaman-halaman ini, tersimpan banyak pelajaran, pengorbanan, serta doa yang senantiasa menyertai.

Dengan segala kerendahan hati, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ayahanda tercinta Witomo Atmojo, ibunda tercinta Meiny Agustini, ayukku tersayang Krisanti Winina Putri serta keluarga besar M.Tasim dan Abi Kabri yang selalu memberikan Do’a serta dukungan yang tiada hentinya dengan penuh kasih sayang.
2. Dr. Hi. Ahmad Herison, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.

3. Dr. Asnawi Lubis sebagai Dosen Pembimbing 1 yang telah membimbing penulis untuk dapat menyelesaikan penelitian ini.
4. Bapak Nurcahya Nugraha S.T., M.T sebagai Dosen Pembimbing 2 yang telah memberikan masukan yang bermanfaat dalam menjalankan simulasi dan perbaikan skripsi ini.
5. Dr. Jamaitul Akmal S.T., M.T sebagai dosen pembahas yang selalu memberikan semangat dan motivasi dalam pelaksanaan penelitian.
6. Bapak Ahmad Suudi S.T., M.T selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin.
7. Dr. Ir. Martinus S.T., M.Sc sebagai ketua program studi S1 Teknik Mesin.
8. Bapak Ahmad Yonanda S.T., M.T selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah memberikan arahan, ide, motivasi, dan dukungan akademik penulis.
9. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu dan pengalaman dalam hidup untuk menjadi lebih baik.
10. Pak Jarni, Pak Dadang, dan Pak Agung yang dapat membantu segala urusan administrasi penulis di Jurusan Teknik Mesin.
11. Keluarga Besar Teknik Mesin 2021 yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.
12. Seluruh pihak yang terlibat dalam proses penelitian skripsi ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Bandar Lampung, 2026

Muhammad Hussein

NPM. 2115021054

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	i
DAFTAR TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR	iv
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	5
1.5 Batasan Masalah	5
1.6 Sistematika Penulisan	6
II. TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Hot Centrifugal coating	8
2.2 Finite Element Method	13
2.3 Cohesive Zone Method (CZM)	19
2.4 Simulasi Hasil Produk dari Cetakan Hot Centrifugal Coating Berdasarkan Penelitian Terdahulu.....	21
2.5 Proses produksi Pipa Baja Berlapis Kuningan	25
2.6 Tegangan Radial dan Tegangan Hoop Pipa Baja Berlapis Kuningan 27	
III. METODE PENELITIAN	30
3.1 Diagram Alir Penelitian	30
3.2 Rancangan Penelitian	32
3.3 Langkah-langkah Penelitian	32
3.3.1 Studi Literatur	32

3.3.2	Perumusan Masalah dan Tujuan Penelitian	33
3.3.3	Pemodelan <i>Geometry</i>	33
3.3.4	<i>Pre-processing</i>	34
3.3.5	Pengaturan pemodelan antar muka.....	43
3.3.6	Kondisi batas dan Pembebanan	43
3.3.7	<i>Solution and Post processing</i>	44
3.4	Alat dan Bahan	45
3.5	Tempat dan Waktu Penelitian	45
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN	48
4.1	Desain <i>Geometry</i> 2D	48
4.2	Pembuatan <i>Mesh</i>	48
4.3	Pengaturan Kondisi Batas dan Pembebanan	50
4.4	Hasil simulasi ANSYS FEM	51
4.5.1	Radial stress.....	51
4.5.2	Hoop stress	59
4.5.3	Shear stress	67
V.	KESIMPULAN DAN SARAN	70
5.1	Kesimpulan	70
5.2	Saran.....	71
	DAFTAR PUSTAKA.....	73

DAFTAR TABEL

Halaman

Tabel 3. 1 Engineering data baja dan kuningan.	35
Tabel 3. 2 Engineering data CZM Fracture.....	36
Tabel 3. 3 Definisi Radial Path.	39
Tabel 3. 4 Definisi koordinat cylindrical.....	40
Tabel 3. 6 Definisi Kontak.	41
Tabel 4. 1 Dimensi Geometry Pipa Baja Berlapis Kuningan.	48
Tabel 4. 2 Parameter mesh.	47
Tabel 4. 3 Mesh independence test.	48
Tabel 4. 4 Tabel skewness.	49
Tabel 4. 5 Tabel Orthogonal Quality Mesh geometri pipa baja berlapis kuningan.	50

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2. 1 Hot Centrifugal coating (Badalan et al., 2022).	10
Gambar 2. 2 Gambar Model Pipa Baja Berlapis Kuningan.	14
Gambar 2. 3 Mesh convergence (Patil & Jeyakarthikeyan, 2018).	16
Gambar 2. 4 Internal pressure pada pipa baja berlapis kuningan.	18
Gambar 2. 5 Simulasi Pipa Berlapis (Habbar et al., 2023).	22
Gambar 2. 6 Area pemrosesan dan mekanisme pertumbuhan pelapisan	25
 Gambar 3. 1 Diagram Alir.	 31
Gambar 3. 2 Dimensi pipa baja berlapis kuningan.	34
Gambar 3. 3 Desain geometry pipa baja berlapis kuningan.	34
Gambar 3. 4 Hasil eksperimen uji pull of test pipa baja berlapis	35
Gambar 3. 5 Penginputan material.	36
Gambar 3. 6 Diagram elemen tegangan normal dan tegangan geser.	37
Gambar 3. 7 Radial <i>path</i>	38
Gambar 3. 8 Geometry selection pada pengaturan sistem koordinat.	39
Gambar 3. 9 Daerah Kontak.	40
Gambar 3. 10 Metode <i>multizone quad/tri</i>	41
Gambar 3. 11 Inflasi.	42
Gambar 3. 12 Hasil meshing.	42
Gambar 3. 13 Displacement.	43
Gambar 3. 14 Pressure.	44
 Gambar 4. 1 Grafik mesh independence test.	 49
Gambar 4. 2 Contour View.	52

Gambar 4. 3 Radial stress $P_i = 100 \text{ Mpa}$ (Paramaguru et al., 2025).	53
Gambar 4. 4 Radial stress path.....	54
Gambar 4. 5 Radial stress path dan perhitungan.....	55
Gambar 4. 6 Luas area simulasi 0,8 sampai dengan 0,9.	56
Gambar 4. 7 Luas area simulasi 0,9 sampai dengan 1.	57
Gambar 4. 8 Luas area perhitungan.	57
Gambar 4. 9 Radial stress path (Phalguna, 2017).	59
Gambar 4. 10 Contour View.....	60
Gambar 4. 11 Hoop Stress (Mackerle et al., 2019).	61
Gambar 4. 12 Hoop stress path	62
Gambar 4. 13 Perhitungan Hoop stress.....	63
Gambar 4. 14 Luas area simulasi 0,8 sampai dengan 0,9.	64
Gambar 4. 15 Luas area simulasi 0,9 sampai dengan 1.	65
Gambar 4. 16 Luas area perhitungan.	65
Gambar 4. 17 Hoop stress path (Phalguna, 2017).....	67
Gambar 4. 18 <i>Contour view</i>	68
Gambar 4. 19 Shear Stress path.	69

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pipa baja berlapis kuningan merupakan salah satu komponen yang sangat penting dan luas penggunaannya dalam berbagai sektor industri, khususnya industri minyak dan gas, kimia, serta instalasi air laut. Komponen ini menuntut ketahanan tinggi terhadap korosi dan keausan, karena lingkungan kerja yang ekstrem dan kondisi operasional yang berat. Oleh sebab itu, proses pelapisan yang mampu menghasilkan lapisan pelindung yang homogen, kuat, dan tahan lama sangat dibutuhkan (Swales, 2023).

Salah satu teknologi yang berkembang dan terbukti efektif untuk aplikasi tersebut adalah *hot centrifugal coating* (pelapisan sentrifugal panas). Metode ini menggunakan prinsip gaya sentrifugal untuk mendistribusikan material pelapis secara merata pada permukaan pipa atau cetakan yang berputar dengan kecepatan tinggi. Proses pelapisan ini dimulai dari pemanasan substrat pipa sampai suhu *austenitik* yang tinggi, kemudian menuangkan kuningan cair yang akan menyelimuti permukaan dalam pipa atau cetakan secara merata akibat gaya sentrifugal. Melalui proses ini, terbentuk ikatan metalurgi yang kuat yang dikenal sebagai *diffusion bonding*, sehingga lapisan pelapis memiliki kekuatan ikatan yang baik serta ketahanan terhadap korosi dan keausan yang lebih tinggi dibandingkan metode pelapisan konvensional seperti *thermal spraying* dan *centrifugal casting* biasa (Das, 2023).

Dalam konteks aplikasi komponen *bushing* dan pipa di industri berat, permasalahan utama yang ditemukan adalah sifat permukaan dalam yang rentan terhadap keausan mekanis dan korosi akibat beban siklik dan kontak gesek yang tinggi misalnya pada aplikasi otomotif, petrokimia, dan hidrolik. Metode pelapisan tradisional sering kali mengalami kendala seperti *bonding* yang lemah, ketidakseragaman lapisan, serta risiko delaminasi, yang dapat mengakibatkan kegagalan prematur pada komponen tersebut. Oleh karenanya, pengembangan alat dan teknologi *hot centrifugal coating* yang inovatif menjadi sangat dibutuhkan untuk menghasilkan produk dengan kualitas pelapisan yang superior, stabil, dan tahan lama (Zhang & Xu, 2022).

Dalam penelitian ini, dikembangkan sebuah metode inovatif untuk meningkatkan kekuatan lapisan pelindung pada permukaan dalam silinder baja, khususnya bagi aplikasi *bushing* dalam sistem industri berat. Metode tersebut dikenal dengan nama *Hot Centrifugal Coating* (HCC), yang menggabungkan keunggulan dari proses *thermal spray coating* dari segi kecepatan pelapisan dan fleksibilitas material dengan proses *centrifugal coating* yang unggul dalam pemadatan dan distribusi pelapis melalui gaya sentrifugal. Pada proses ini, substrat baja dipanaskan hingga mencapai suhu *austenitik* sekitar $\pm 1000^{\circ}\text{C}$, kemudian kuningan cair dilapiskan pada silinder yang berputar dengan kecepatan tinggi sekitar 1000 rpm. Teknik ini memungkinkan terbentuknya ikatan metalurgi melalui mekanisme *diffusion bonding*, yang diharapkan dapat meningkatkan ketahanan terhadap keausan dan risiko delaminasi lapisan pelindung.

Penelitian ini memberikan kontribusi sebagai dasar teori yang kokoh dalam desain pipa atau silinder baja berlapis kuningan yang dihasilkan melalui metode *Hot Centrifugal Coating* (HCC). Simulasi numerik menggunakan Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method/FEM*) berfungsi sebagai alat untuk menganalisis distribusi tegangan normal dan tegangan geser pada batas antara baja dan kuningan serta memprediksi secara kuantitatif potensi kegagalan pada antarmuka material. Secara praktik, penelitian ini tidak hanya terbatas pada desain *bushing*, tetapi juga dapat diterapkan secara luas pada berbagai sistem mekanis di industri berat, seperti alat berat, rel kereta

api, dan sistem hidrolik dengan tekanan tinggi. Dengan menggabungkan pendekatan eksperimen dan simulasi, hasil penelitian ini diharapkan menjadi acuan dalam merancang teknik pelapisan yang lebih kuat, efisien, dan mudah diprediksi. *Output* dari penelitian ini berupa model numerik yang telah divalidasi dengan data eksperimen sebagai dasar ilmiah dalam perancangan pipa berlapis (Ding et al., 2023).

Sejalan dengan perkembangan teknologi manufaktur modern, analisis dan simulasi tegangan internal dari hasil cetakan menjadi aspek penting dalam menjamin kualitas dan keandalan hasil produksi. Simulasi menggunakan perangkat lunak canggih seperti ANSYS *Static Structural* memungkinkan prediksi perilaku tegangan dan distribusi gaya akibat beban internal pada produk hasil *hot centrifugal coating*. Proses simulasi ini membantu mengidentifikasi potensi titik lemah atau risiko kegagalan struktural, sehingga dapat dilakukan pengoptimalan desain alat dan parameter proses dengan lebih akurat dan efisien tanpa harus melakukan uji coba fisik yang mahal dan memakan waktu. Penelitian terkait simulasi *hot centrifugal coating* menggunakan ANSYS menunjukkan kemampuan signifikan dalam analisis tegangan internal untuk menjamin kualitas produk cetakan berlapis (Adamiak et al., 2023).

Tugas akhir ini bertujuan untuk mensimulasi tegangan normal antara lain tegangan radial dan tegangan *hoop* serta tegangan geser yang diakibatkan oleh tekanan internal pada pipa baja berlapis kuningan hasil *hot centrifugal coating* menggunakan ANSYS *Workbench*, diharapkan dapat diperoleh pemahaman mendalam mengenai mekanisme distribusi tegangan dalam hasil produk, sehingga mutu dan masa pakai produk dapat ditingkatkan secara signifikan. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi dalam pengembangan teknologi pelapisan dan manufaktur yang berorientasi pada kualitas tinggi dan efisiensi produksi di industri berat. Secara keseluruhan, simulasi tegangan normal dan tegangan geser akibat tekanan internal hasil dari *hot centrifugal coating* menawarkan pendekatan teknologi modern untuk menjawab kebutuhan industri akan produk

komponen yang tahan lama, presisi, dan berkualitas tinggi dengan proses produksi yang lebih optimal dan terukur.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang yang telah dijelaskan di atas, maka rumusan masalah yang diangkat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana memodelkan tegangan (*hoop*, radial, geser) pada FEM?
2. Bagaimana analisis konvergensi *mesh* (*mesh independence test*) digunakan untuk memvalidasi akurasi FEM di zona antarmuka.
3. Bagaimana distribusi tegangan normal dan tegangan geser akibat *internal pressure*?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Membuat model FEM untuk menghitung tegangan normal dan geser pada pipa baja kuningan.
2. Mengevaluasi peningkatan akurasi FEM di zona antarmuka dengan analisis konvergensi *mesh*.
3. Menganalisis distribusi tegangan akibat tekanan internal dan mengidentifikasi konsentrasi di antarmuka.

1.4 Manfaat Penelitian

Berdasarkan pada tujuan penelitian yang disajikan di atas, maka manfaat penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Memberikan penjelasan terhadap model tegangan normal dan tegangan geser pada FEM.
2. Memberikan penjelasan mengenai pentingnya analisis konvergensi *mesh* (*mesh independence test*) untuk memvalidasi akurasi FEM pada zona antarmuka.
3. Memberikan penjelasan distribusi tegangan normal dan tegangan geser pada pipa baja berlapis kuningan akibat pembebanan internal.

1.5 Batasan Masalah

Berdasarkan tujuan penelitian di atas, maka penelitian ini memiliki batasan-batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini tidak melakukan uji langsung di lapangan, tapi hanya berdasarkan simulasi dan analisis di laboratorium.
2. Penelitian hanya fokus pada pipa baja berlapis kuningan, tidak membahas material lain.
3. Penelitian ini mensimulasikan tegangan radial, *hoop* dan geser.
4. Simulasi ini menggunakan *static structural* dengan pemodelan 2D.
5. Penelitian ini membatasi analisis elemen hingga pada pipa baja berlapis kuningan hasil produksi *hot centrifugal coating* dengan dimensi pipa standar industri.
6. Material diasumsikan bimaterial dan isotropik, tanpa mempertimbangkan efek korosi, kelelahan, atau perubahan termal selama operasi.
7. Simulasi ini menggunakan pemodelan antar muka CZM.

8. Simulasi dilakukan terhadap kondisi linier elastis untuk memprediksi distribusi tegangan.
9. Analisis tidak memperhitungkan cacat mikrostruktur atau ketidaksempurnaan lapisan.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika yang digunakan dalam penulisan laporan penelitian ini yaitu sebagai berikut:

I. PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan. Bagian ini bertujuan untuk memberikan gambaran awal mengenai topik yang diteliti serta arah dari penelitian yang dilakukan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas teori-teori dasar yang berkaitan dengan teori dasar rancang bangun alat, proses produksi pipa, kemudian analisis menggunakan FEM

III. METODOLOGI PENELITIAN

Berisi spesifikasi komponen yang dipakai, komponen utama dan pendukungnya, proses pembuatan, alat-alat yang digunakan, dan bahan material yang digunakan dan proses simulasi.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi garis besar analisa perhitungan pembuatan pipa baja berlapis kuningan yang terjadi, komponen-komponen yang mendukung dalam perencanaan pembuatan alat *hot centrifugal coating* ini dan pengujian yang dilakukan setelah penyelesaian mesin *hot centrifugal coating*

V. SIMPULAN DAN SARAN

Berisi tentang kesimpulan – kesimpulan yang dapat diambil oleh penulis serta saran – saran yang dapat penulis berikan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Hot Centrifugal coating*

Pelapisan logam adalah proses pemberian lapisan tipis pada permukaan logam dengan tujuan utama untuk melindungi logam tersebut dari kerusakan seperti korosi, keausan, dan pengaruh lingkungan lain yang dapat menurunkan kinerja dan masa pakai logam. Selain fungsi proteksi, pelapisan juga dapat memberikan nilai tambah seperti peningkatan estetika, ketahanan kimia, dan sifat fungsional lainnya.

Secara teknis, pelapisan logam dilakukan dengan cara menerapkan bahan lapisan berupa logam lain, keramik, polimer, atau kombinasi bahan tersebut pada permukaan substrat logam. Metode pelapisan sangat beragam, mulai dari *elektroplating*, *spray coating*, hingga metode yang menggunakan gaya sentrifugal seperti *centrifugal coating* untuk mendapatkan lapisan yang merata dan tipis.

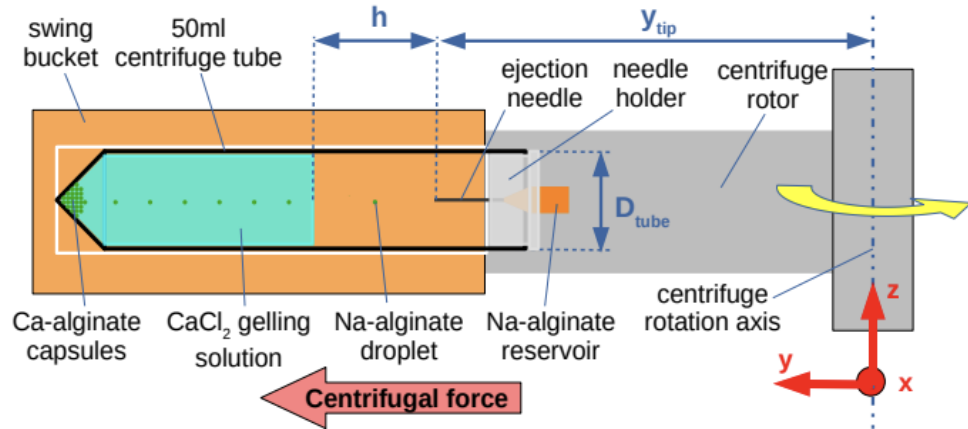
Dalam beberapa penelitian terbaru, pelapisan logam dipelajari tidak hanya dari segi teknik aplikasinya saja, tetapi juga dari sisi material yang dipakai, mekanisme proteksi, dan ketahanan lapisan terhadap kondisi ekstrem. Misalnya, ada kajian tentang pelapisan logam yang dilakukan menggunakan *additive manufacturing* yang memungkinkan pembuatan lapisan dengan presisi tinggi dan sifat khusus (Mohanty & Gokuldoss, 2023). Selain itu, pelapisan logam menjadi sangat penting dalam konservasi benda-benda logam bersejarah agar tetap terlindungi dari kerusakan, sebagaimana dijelaskan dalam *review* tentang pelapisan pelindung untuk konservasi *heritage* logam (Molina et al., 2023).

Pelapisan juga berkembang dengan inovasi material baru seperti *self-healing coatings* yang dapat merespon kerusakan lapisan dengan mekanisme perbaikan otomatis (Yimyai et al., 2023). Dari aspek substrat, studi menunjukkan bahwa jenis logam dasar memengaruhi efektivitas lapisan pelindung yang diterapkan, sehingga penting untuk memilih kombinasi bahan lapisan dan substrat yang tepat agar mendapatkan perlindungan optimal (Gong et al., 2024). Kesimpulannya, pelapisan logam adalah proses penting dalam industri yang melibatkan berbagai metode dan bahan pelapis yang dirancang khusus sesuai kebutuhan aplikasi untuk meningkatkan daya tahan dan fungsi permukaan logam.

Hot centrifugal coating adalah metode pelapisan yang menggunakan gaya sentrifugal pada benda yang sedang berputar dengan kecepatan tinggi saat dalam keadaan panas. Metode ini bertujuan untuk menyebarkan lapisan pelapis secara merata ke permukaan material. Karena adanya gaya sentrifugal tersebut, lapisan yang terbentuk memiliki ketebalan yang seragam dan kuat. Cara ini banyak dipakai dalam berbagai bidang industri, seperti pembuatan pipa berlapis, pelapisan katalis pada substrat, hingga produksi film tipis untuk elektronik.

Contohnya, suatu penelitian oleh Tran et al., (2022) yang menggunakan metode ini berhasil membuat film CsPbBr₃ yang berkualitas tinggi tanpa retak, sehingga cocok untuk aplikasi *fotodetektor* dengan performa bagus. Selain itu, metode *centrifugal coating* juga dipakai untuk melapisi katalis pada bahan berpori agar lapisan katalisnya merata dan menempel dengan kuat. Hal ini sangat berguna dalam bidang kimia dan teknik katalis. Selain itu, metode ini juga dapat mengubah sifat fisik dan kimia dari partikel yang dilapisi, misalnya dalam pembuatan obat dengan pelepasan yang dikontrol.

Secara teoritis, proses *hot centrifugal coating* menggunakan prinsip distribusi partikel pelapis dengan gaya sentrifugal dan pengendalian suhu agar lapisan yang terbentuk memiliki struktur yang tepat dan fungsi yang diinginkan. Ada juga pengembangan metode ini dengan teknologi induksi sentrifugal yang memungkinkan pelapisan yang lebih presisi dan efisien.



Gambar 2. 1 *Hot Centrifugal coating* (Badalan et al., 2022).

Dari Gambar 2.1 dapat diambil kesimpulan, *hot centrifugal coating* merupakan cara yang efektif dan efisien untuk membuat lapisan pelapis yang kuat, merata, dan berkualitas tinggi pada berbagai material. Metode ini tidak hanya cocok untuk aplikasi industri tapi juga banyak digunakan dalam penelitian dan pengembangan produk baru. Dengan keunggulan dalam menghasilkan lapisan dengan ketebalan konsisten dan daya rekat kuat, *hot centrifugal coating* menjadi teknologi yang sangat penting di bidang manufaktur modern.

2.1.1 Aspek pada *hot centrifugal coating*

Adapun aspek-aspek penting pada *hot centrifugal coating* ini adalah sebagai berikut.

a. Torsi

Torsi yang dihasilkan motor disalurkan langsung ke poros. Torsi ini dihitung dari persamaan poros:

$$\begin{aligned}
 P &= T \cdot \omega \\
 P &= T \cdot 2\pi f \\
 P &= \frac{T \cdot 2\pi n}{60} \\
 T &= \frac{P \times 60}{2\pi n}
 \end{aligned} \tag{2-1}$$

di mana,

T = Torsi (Nm)

P = Daya Motor (Watt)

n = Kecepatan Putar (rpm)

b. Gaya Sentrifugal

Gaya sentrifugal juga disebut gaya khayal terjadi saat benda bergerak menjauhi titik pusat dari gaya. Untuk rumus dari gaya sentrifugal dinyatakan dengan persamaan (2-2) berikut :

$$F_s = m\omega^2 r \quad (2-2)$$

di mana,

F_s = Gaya sentrifugal (N)

m = massa logam cair (kg)

ω = kecepatan Sudut (rad/s)

r = jarak dari titik pusat (m)

Gaya ini mendorong logam ke dinding cetakan, tetapi juga menyebabkan gaya reaksi ke arah pusat putaran, yang ditanggung oleh bantalan dan rangka transmisi.

c. Gaya Gesek (*Viscous Force*)

Proses ini juga dipengaruhi oleh gaya gesek (*viscous force*) yang bergantung pada kekentalan bahan pelapis dan berperan melawan pergerakan material pelapis, yang dimodelkan dari keseimbangan gaya (Fitri et al., 2024), seperti pada persamaan (2-3) di bawah ini.

$$F_{gesek} = \mu \times N \quad (2-3)$$

di mana pada persamaan (2-4) merupakan rumus dasarnya,

$$F_{Viscous} = \eta \times A \times \frac{du}{dy} \quad (2-4)$$

di mana,

F_{gesek} = Gaya gesek mekanik (N)

$F_{Viscous}$ = Gaya Gesek Viskos

η = Viskositas bahan pelapis (N.s/m²)

A = Luas bidang (m²)

μ = Koefisien gesek

$\frac{du}{dy}$ = Gradien kecepatan geser (m/s)

Persamaan (2-3) menunjukkan bahwa besarnya gaya gesek pada bantalan sebanding dengan besar gaya yang ditanggung serta nilai koefisien gesekan antara permukaan yang saling bersinggungan.

d. Ketebalan dan laju perubahan film

Pada *hot centrifugal coating*, faktor suhu juga penting karena pelapisan dilakukan dalam kondisi panas yang menyebabkan pelarut menguap cepat, sehingga mempengaruhi viskositas dan pembentukan lapisan akhir. Kecepatan putar biasanya antara 200-1000 rpm untuk mencapai gaya sentrifugal yang cukup menyebarkan *coating* secara optimal. Diketahui untuk rumus tebal *film spin coating* dibuat sebagai modifikasi rumus klasik berdasarkan mekanika fluida *Newtonian* yang mempertimbangkan parameter-parameter seperti kecepatan sudut, viskositas, dan waktu proses. Pada persamaan (2-5), rumus yang diberikan (Lee et al., 2019) :

$$h = \frac{h_0}{\sqrt{1 + \frac{4\rho W^2 h_0^2 t}{3\mu}}} \quad (2-5)$$

di mana,

h = Ketebalan film (m, meter)

h_0 = Ketebalan film awal (m, meter)

ρ = Massa jenis fluida (kg/m³)

ω = Kecepatan sudut putar/spin (rad/s)

t = Waktu *spin coating* (s, detik)

μ = Viskositas dinamis fluida (Pa·s atau kg/(m·s))

Kemudian, untuk mendapatkan distribusi ketebalan lapisan kuning yang seragam, rumus hubungan gaya sentrifugal dan viskositas cairan kuning adalah (Makhlouf & Tiginyanu., 2011) :

$$\frac{\partial h}{\partial t} = - \frac{\omega^2 r^2 h^2}{3\nu} \quad (2-6)$$

di mana,

$\frac{\partial h}{\partial t}$ = laju perubahan ketebalan film (m/s),

- ω = kecepatan sudut (rad/s),
- r = jarak radius dari pusat putaran (m),
- h = ketebalan film (m),
- ν = viskositas kinematik (m²/s).

2.2 *Finite Element Method*

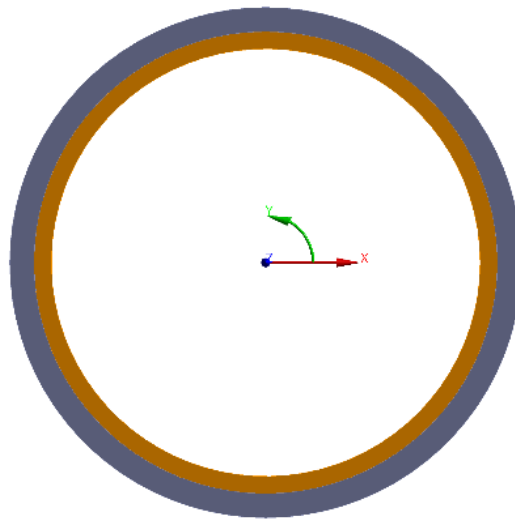
Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method* atau FEM) adalah suatu teknik numerik yang digunakan untuk mengatasi permasalahan teknik dan fisika yang rumit dan sulit diselesaikan secara langsung. Prinsip kerjanya adalah dengan membagi suatu struktur atau domain yang kontinu menjadi bagian-bagian kecil yang disebut elemen hingga atau *mesh*. Masing-masing elemen ini kemudian dianalisis secara matematis untuk memahami perilakunya.

Setelah itu, elemen-elemen yang telah dianalisis tersebut digabungkan kembali untuk memperoleh gambaran perilaku keseluruhan struktur ketika diberikan beban, mengalami tegangan, deformasi, perubahan temperatur, dan pengaruh lainnya. Dengan menggunakan FEM secara detail dapat diprediksi dan dipahami bagaimana suatu objek atau material merespons kondisi nyata di lapangan, sehingga metode ini sangat berguna dalam proses desain dan analisis teknik untuk memastikan kinerja dan keamanan suatu produk atau struktur.

2.2.1 *Modeling*

Metode elemen hingga (FEM) dalam analisis pipa baja berlapis kuningan yang diproduksi dengan proses *hot centrifugal coating* dimulai dari pemodelan geometris yang merepresentasikan pipa baja sebagai substrat utama dan lapisan kuningan yang diaplikasikan secara merata di permukaannya. Model ini biasanya berupa tabung silinder dengan dua domain utama, yaitu pipa baja dan lapisan tipis kuningan. Ketebalan lapisan kuningan diperkirakan dengan menggunakan data

empiris hasil pengukuran atau berdasarkan perhitungan teoritis yang mempertimbangkan parameter proses sentrifugal seperti kecepatan putar (rotasi), viskositas logam cair, dan waktu *coating*. Material kedua komponen utama ini, pipa baja dan lapisan kuningan, didefinisikan dengan sifat mekanik dan termal lengkap, yang meliputi *modulus elastisitas*, rasio *Poisson*, densitas, dan koefisien ekspansi termal (Müzel, 2020). Pada Gambar 2.2 dapat dilihat model dari pipa berlapis.



Gambar 2. 2 Gambar Model Pipa Baja Berlapis Kuningan.

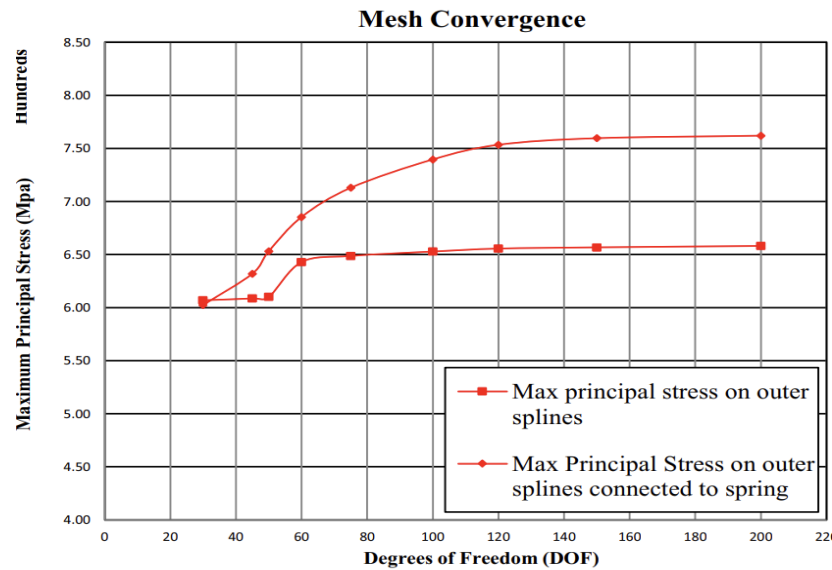
Parameter ini sangat krusial terutama untuk analisis termomekanik, karena perbedaan sifat termal antara lapisan kuningan dan substrat baja dapat menimbulkan tegangan sisa (*residual stress*) akibat perubahan suhu selama dan setelah proses *coating*. Dengan menggunakan FEM, analisis tidak hanya terbatas pada distribusi tegangan dan deformasi akibat beban mekanik eksternal, tapi juga mencakup efek beban termal dan gaya sentrifugal yang terjadi selama proses *coating*. Model ini berguna untuk memprediksi perilaku struktural dan memastikan integritas lapisan, serta dapat menjadi dasar dalam optimasi proses produksi agar diperoleh lapisan yang berkualitas tinggi dan tahan lama.

2.2.2 *Meshing*

Setelah selesai membuat model geometri pipa baja berlapis kuningan, langkah berikutnya dalam FEM adalah membuat *mesh*. *Mesh* ini pada

dasarnya adalah cara untuk membagi model fisik menjadi bagian-bagian kecil (elemen-elemen) agar komputer bisa menghitung secara numerik. Biasanya, untuk pipa baja dan lapisan kuningan yang agak tebal, dipakai elemen 2D seperti *Quadrilateral dominant* dan *triangle*. Tapi untuk lapisan kuningan yang cukup tipis, lebih baik kalau memakai elemen gabungan yakni *quad/tri* dengan ketebalan yang sangat tipis agar hasil distribusi tegangan dan deformasinya dapat lebih akurat, tanpa membuat simulasi menjadi berat dan lama pada proses *solving*. Selain itu, penting untuk membuat *mesh* yang cukup rapat khususnya di bagian lapisan kuningan dan perbatasannya dengan pipa baja agar semua perubahan fisik seperti konsentrasi tegangan atau potensi lapisan terlepas bisa terdeteksi dengan baik.

Untuk memastikan ukuran *mesh* yang akurat, dapat dilakukan analisis konvergensi dengan menambah jumlah elemen atau memperkecil ukuran elemen (Yusup et al., 2024). Tujuannya supaya diperoleh gambaran terbaik antara ketelitian hasil dan waktu komputasi. Proses ini juga bertujuan untuk menemukan keseimbangan optimal antara ketelitian hasil simulasi dan waktu komputasi yang diperlukan, sehingga hasil yang diperoleh merepresentasikan kondisi nyata dengan presisi tinggi tanpa membebani kapasitas komputasi secara berlebihan. Dengan demikian, analisis konvergensi membantu memvalidasi bahwa *mesh* yang digunakan sudah cukup halus untuk menghasilkan solusi yang stabil dan valid. Pada Gambar 2.3 merupakan contoh grafik *mesh convergence* berdasarkan dari penelitian (Patil & Jeyakarthikeyan, 2018) berikut.



Gambar 2. 3 *Mesh convergence* (Patil & Jeyakarthikeyan, 2018).

2.2.3 *Mesh independence test*

Mesh independence test adalah suatu prosedur yang dilakukan sebelum melakukan simulasi. Prosedur ini dilakukan untuk memastikan simulasi tidak terpengaruhi oleh kondisi *meshing* dan ukuran dari kepadatan *meshing*. Terdapat 3 metode tradisional yang sering dipakai untuk melakukan *mesh independence test* antara lain, *grid resolution method*, *generalized richardson extrapolation*, dan *grid convergence index (GCI)* (Chen et al., 2013).

Pada umumnya metode yang sering digunakan adalah *grid resolution method* karena metode ini lebih sederhana dibandingkan dengan metode yang lain tetapi tingkat akuratan yang masih tinggi. Hal ini dapat menghemat waktu untuk melakukan *mesh independence test* karena metode *grid resolution method* memiliki konsep yang lebih mudah dipahami dan juga implementasi yang sangat sederhana.

2.2.4 *Boundary Condition*

Kondisi batas (*boundary condition*) dalam metode elemen hingga (FEM) pada analisis pipa baja berlapis kuningan sangat penting untuk memastikan simulasi yang akurat dan sesuai dengan kondisi nyata. Pada umumnya, kondisi batas melibatkan penopang seperti *fixed*

support yang dipasang di salah satu ujung pipa untuk menahan gerakan, atau model dapat dibuat bebas tergantung pada tujuan analisis, misalnya untuk menguji respons tegangan lokal akibat beban tertentu yang bekerja pada pipa. Jika geometri dan beban bersifat simetris, maka kondisi simetri juga diterapkan agar beban komputasi bisa berkurang tanpa mengorbankan akurasi hasil (Yahya, 2023).

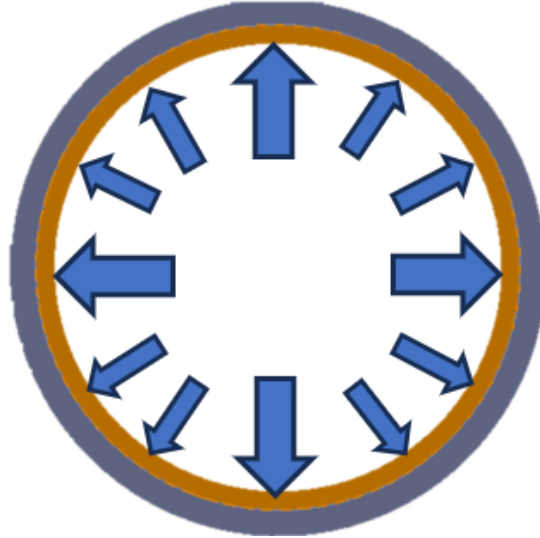
Pada *interface* antara lapisan kuningan dan pipa baja, kontak antar material diatur sebagai *bonded* atau kohesif, yang menggambarkan ikatan kuat antara kedua material tersebut sehingga deformasi dan tegangan dapat diteruskan dengan benar pada antarmuka (*interface*). Untuk analisis yang melibatkan aspek termal, kondisi suhu awal, serta beban konveksi dan radiasi panas disertakan agar simulasi dapat memodelkan pengaruh temperatur selama proses pelapisan *hot centrifugal coating* secara realistis. Dengan pengaturan kondisi batas yang tepat, FEM mampu memprediksi perilaku mekanik dan termal pipa berlapis kuningan dengan hasil yang lebih dapat dipercaya.

2.2.5 Load

Beban yang diberikan pada model dalam analisis metode elemen hingga (FEM) untuk pipa baja berlapis kuningan sangat beragam dan mencerminkan kondisi operasional nyata. Beban mekanik utama biasanya berupa tekanan internal yang dialami pipa saat berfungsi mengalirkan fluida, yang menjadi faktor penting dalam menentukan kekuatan struktural dan ketahanan pipa terhadap kerusakan. Selain itu, beban tarik dan tekan juga diaplikasikan untuk mensimulasikan bagaimana pipa merespons gaya eksternal yang mempengaruhi kekakuan dan deformasinya.

Pada proses produksi, terutama *hot centrifugal coating*, gaya sentrifugal yang dihasilkan dari kecepatan putar tinggi dan radius pipa menjadi beban khusus yang signifikan. Gaya ini berperan dalam meratakan lapisan kuningan pada permukaan pipa dan menyebabkan *redistribusi* tegangan serta massa, sehingga menjadi bagian penting dalam simulasi

FEM agar representasi kondisi fisik pipa lebih akurat (Hamdani & Turmizi, 2022). Pada Gambar 2.4 dapat dilihat simulasi pembebanan internal pada pipa berlapis.



Gambar 2. 4 Internal *pressure* pada pipa baja berlapis kuningan.

Pada Gambar 2. 4 dapat dilihat bahwa pada internal *geometry* pipa diberikan gaya internal pressure yang ditunjukkan oleh garis dan area yang berwarna biru. Lebih lanjut, beban termal dari perubahan suhu selama proses *coating* dan operasi memberikan dampak pada ekspansi atau kontraksi material, sementara beban *residual* yang timbul akibat perbedaan koefisien ekspansi termal antara lapisan kuningan dan pipa baja berdampak jangka panjang pada performa dan integritas lapisan. Beban *residual* ini dapat menimbulkan tegangan sisa yang memicu deformasi atau bahkan kegagalan delaminasi jika tidak diantisipasi dengan baik. Oleh karena itu, seluruh jenis beban ini harus dimodelkan dengan hati-hati dalam FEM agar hasil simulasi dapat menjadi prediksi yang valid dan dapat digunakan untuk desain dan evaluasi kualitas pipa berlapis.

2.3 Cohesive Zone Method (CZM)

Cohesive zone models sering dipakai untuk mensimulasikan retakan pada tingkat mikroskopik. Pada skala makro, fenomena retak biasanya dievaluasi lewat uji *Double Cantilever Beam* (DCB) dan *End-Notched Flexure* (ENF), kemudian solusi analitik berbasis LEFM dipakai untuk memvalidasi model numerik. Namun, kekakuan kohesif dan kekuatan kohesif tidak dapat diturunkan secara langsung dari solusi tersebut kekuatan kohesif khususnya sangat memengaruhi keakuratan model sehingga harus dikalkulasi (Linke & Lammering, 2023).

Penelitian ini menambah literatur dengan menyesuaikan nilai kekuatan kohesif agar hasil numerik selaras dengan solusi analitik, memperhitungkan deformasi, beban, dan panjang retakan aspek yang sebelumnya terlewat. Studi parametrik meminimalkan kriteria yang diusulkan untuk menemukan *fit* terbaik, sekaligus mengevaluasi efek semua *parameter input* serta ukuran elemen pada nilai kekuatan kohesif yang terkalibrasi. Informasi ini memungkinkan penggunaan *mesh* kasar namun tetap memperoleh prediksi retak yang akurat, serta memberikan wawasan komprehensif tentang kekuatan kohesif sebagai variabel pemodelan. Adapun fungsi dari CZM adalah sebagai berikut :

1. CZM menggantikan asumsi “retak sempurna” dengan sebuah zona kohesif yang mengikuti kurva *traction vs separation*. Kurva itu menentukan gaya maksimum (σ_{max}) dan bagaimana kekuatan menurun (softening) sampai pemisahan penuh.
2. Energi yang diperlukan untuk membuka antarmuka dinyatakan oleh *fracture energy* (G_c). Ini membuat kegagalan menjadi energi terikat sehingga cocok untuk perbandingan langsung dengan pengukuran eksperimen.
3. CZM bisa menangani proses inisiasi (munculnya retak dari permukaan yang sebelumnya utuh) dan *propagasi* (pergerakan retak) dalam satu

kerangka tanpa perlu *remeshing* kompleks jika antarmuka sudah dimodelkan dengan elemen kohesif.

4. Dapat mengakomodasi kombinasi mode pembukaan (mode I), geser (mode II), dan *tearing* (mode III) menggunakan kriteria kerusakan *mixed-mode* (misal, *Benzeggagh–Kenane*).

Kemudian adapun kelebihan dari penggunaan CZM dibanding dengan metode tradisional adalah sebagai berikut :

1. LEFM mengasumsikan zona patah sangat kecil dibanding ukuran struktur; CZM justru merepresentasikan zona kohesif yang berdimensi, jadi lebih akurat untuk bahan komposit, lapisan tipis, dan antarmuka.
2. Metode seperti *nodal release* atau *criteria* berbasis *stress* sering memerlukan pemotongan *node*/manipulasi jaringan ketika retak terjadi. Dengan CZM, bila antarmuka sudah ditempatkan elemen kohesifnya, retak “muncul” secara natural melalui evolusi *damage* tanpa *remeshing* manual.
3. Parameter G_c dapat diukur dari uji *pull-off/pull-out/delaminasi* dan langsung digunakan untuk kalibrasi, membuat validasi eksperimental lebih langsung.
4. Mudah memasukkan efek geser, pembukaan bersamaan, leleh lokal, dan bahkan laju ketergantungan (*visco/poro/plastis*) ke dalam hukum kohesif.
5. Tidak bergantung pada *singularitas stress tip* klasik (yang memerlukan kriteria khusus), sehingga numerik lebih stabil untuk kasus-kasus yang tidak memenuhi asumsi LEFM.

Penelitian Maqableh & Hatamleh, (2023) menggunakan model CZM tiga-dimensi pada uji tarik-out serat-silicone. Dengan memadukan data eksperimen (kurva beban-perpindahan) ke dalam simulasi FEM, penulis berhasil mereproduksi nilai maksimal beban F_{max} dan menentukan energi fraktur $G_c = 12 \sigma_{max} MOD$. Analisis sensitivitas mengungkap bahwa

parameter *Maximum Opening Displacement* (MOD) mendominasi perilaku antarmuka lunak, sedangkan *Critical Opening Displacement* (COD) mengatur transisi antara respons reversibel dan ireversibel. Validasi eksperimental menunjukkan kesesuaian $\leq 5\%$ antara hasil numerik dan uji laboratorium, menegaskan kemampuan CZM untuk menangkap mekanisme *debonding* secara akurat.

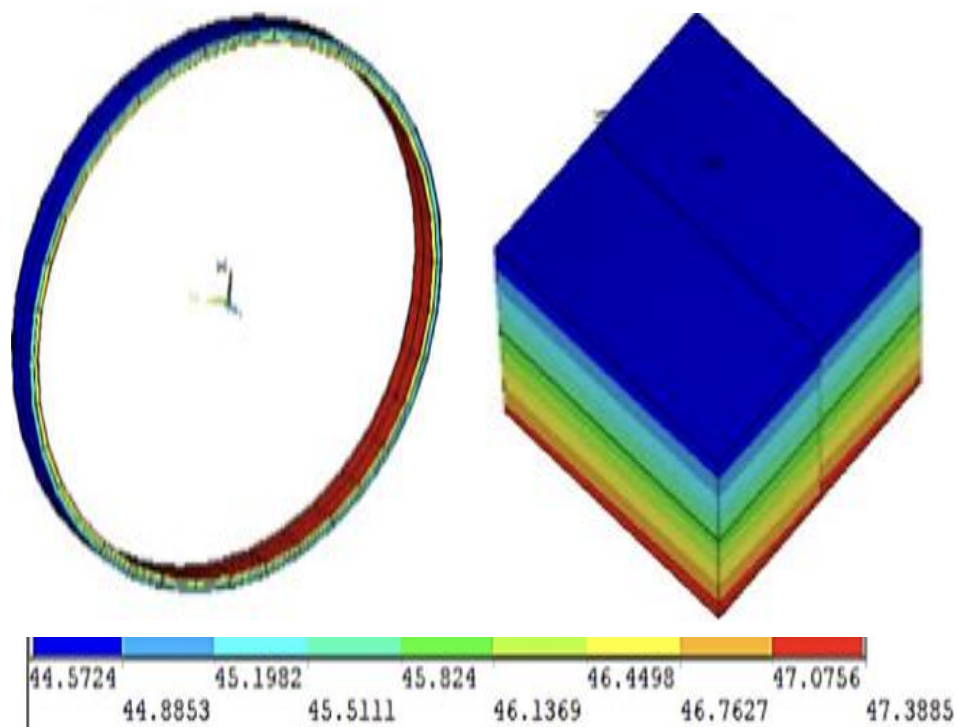
Pada artikel Mirone et al., (2023) menelaah pengaruh sifat material mikro mekanik *modulus elastis*, energi fraktur, serta distribusi *mikrostruktur* terhadap perilaku *delaminasi*. Pendekatan global-local mengidentifikasi bahwa pada antarmuka keras, energi kohesif G_c menjadi faktor penentu utama, sementara pada antarmuka lunak, MOD berperan lebih signifikan. Studi ini juga menyoroti peran *filler particle size* dan distribusi dalam meningkatkan konsentrasi tegangan lokal, yang pada gilirannya memengaruhi nilai *cohesive strength* yang diperlukan dalam model CZM berskala kasar

2.4 Simulasi Hasil Produk dari Cetakan *Hot Centrifugal Coating* Berdasarkan Penelitian Terdahulu

Cetakan *centrifugal coating* merupakan metode pelapisan logam yang memanfaatkan *gaya sentrifugal* untuk mendistribusikan logam cair secara merata ke seluruh permukaan cetakan yang berputar. Metode ini banyak digunakan dalam produksi komponen berbentuk silinder seperti pipa, ring, dan elemen berbentuk tabung lainnya, karena mampu menghasilkan produk dengan densitas tinggi dan homogenitas material yang baik. Namun, proses ini menghadapi berbagai tantangan teknis, mulai dari distribusi tekanan yang tidak merata, variasi laju pendinginan, hingga risiko munculnya cacat pada produk akhir seperti porositas dan retak yang dapat menurunkan kualitas dan ketahanan produk. Metode ini sangat diunggulkan dan banyak digunakan dalam produksi komponen-komponen berbentuk silinder atau tubular. Contoh

utamanya meliputi pipa bimetalik (pipa dengan lapisan dalam yang berbeda dari lapisan luar), ring piston, bantalan (bearings), selongsong (sleeves), dan berbagai elemen berbentuk tabung lainnya yang menuntut ketahanan aus atau korosi yang tinggi pada salah satu permukaannya.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut dan mendapatkan pemahaman yang mendalam mengenai fenomena fisik yang terjadi selama proses pelapisan, simulasi numerik menggunakan perangkat lunak berbasis *Finite Element Method* (FEM) seperti *Ansys Static Structural* menjadi sangat krusial. Simulasi ini memungkinkan evaluasi kuantitatif terhadap distribusi tekanan, respons mekanik, serta identifikasi potensi titik lemah yang berhubungan dengan cacat struktural, sehingga dapat menjadi panduan dalam optimalisasi proses produksi untuk menghasilkan produk dengan performa dan kualitas yang optimal. Dapat dilihat pada Gambar 2.5 hasil dari simulasi numerik pembebanan internal dari penelitian (Habbar et al., 2023).



Gambar 2. 5 Simulasi Pipa Berlapis (Habbar et al., 2023).

Dengan simulasi ini, perilaku aliran logam cair akibat gaya sentrifugal, distribusi tegangan yang timbul akibat pendinginan dan kontraksi, serta titik-titik potensi cacat mekanik dapat dimodelkan dan dianalisis dengan lebih

akurat. Beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa simulasi ini bermanfaat untuk memprediksi perilaku mekanik produk, seperti tegangan sisa (*residual stress*), deformasi, dan kekuatan material yang dihasilkan dari proses *centrifugal coating*. Simulasi juga memungkinkan optimasi parameter proses seperti kecepatan putar cetakan, suhu tuang, dan waktu pendinginan agar produk akhir memenuhi standar kualitas yang diinginkan. Secara khusus, penerapan simulasi *static structural* pada produk *hot centrifugal coating* berguna untuk menganalisis struktur pipa berlapis yang memerlukan ketahanan terhadap tekanan internal selama pemakaian, sehingga distribusi tegangan dan deformasi dapat dievaluasi secara menyeluruh sebelum produksi massal dilakukan.

Dukungan terhadap pentingnya simulasi ini juga datang dari penelitian terdahulu, (Bohacek et al., 2014) yang berhasil memprediksi perilaku aliran logam cair dan proses *solidifikasi* dalam cetakan horizontal dengan sangat baik. Selain itu, ada juga yang meneliti perilaku termal dan mekanik selama proses pengecoran yang berpengaruh pada struktur mikro dan sifat mekanis akhir produk, serta membantu mengoptimalkan parameter proses pengecoran. Berdasarkan penelitian-penelitian ini, simulasi berbasis FEM memberikan gambaran detail tentang distribusi tegangan sisa, pola pendinginan, dan potensi cacat produk pipa berlapis yang dihasilkan melalui metode *centrifugal coating*. Oleh karena itu, penggunaan simulasi *static structural* seperti yang disediakan oleh *Ansys* menjadi alat penting dalam merancang produk pelapisan yang lebih handal dan efisien.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk meningkatkan ikatan *bonding* pada pelapisan, seperti *hot power spinning* (Zhang et al., 2025), *thermal spraying* (Gildersleeve & Vaßen, 2023), *centrifugal casting*, dan *fluxing*. *Thermal spraying* sudah terbukti mampu menghasilkan lapisan dengan ketahanan aus yang tinggi, namun tidak menghasilkan ikatan difusi dan sering mengalami masalah adhesi akibat perbedaan koefisien ekspansi termal antara lapisan dan substrat (Gildersleeve & Vaßen, 2023). Begitu pula, *centrifugal casting* masih menghadapi kendala dalam hal homogenitas *mikrostruktur* dan

pengendalian porositas, sehingga ikatan antara lapisan dan substrat belum kuat (Nurhadiyanto et al., 2017).

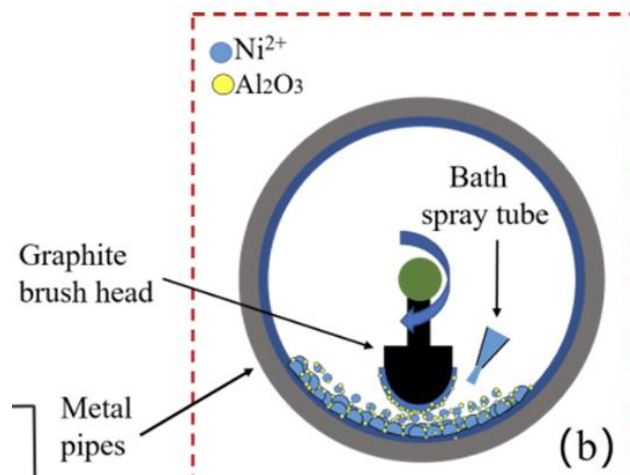
Teknologi *thermal spraying* seperti *Atmospheric Plasma Spraying* dan *High-Velocity Oxy Fuel* telah digunakan selama lebih dari enam dekade untuk membuat lapisan pelindung tahan panas. Namun, ikatan yang terbentuk umumnya bersifat mekanis melalui *interlocking* permukaan, bukan ikatan metalurgi sejati, sehingga rentan terhadap delaminasi terutama jika terjadi siklus termomekanik berulang. Metode *cold spray* menawarkan pelapisan tanpa melelehkan partikel, memungkinkan ikatan plastis antar partikel logam, tetapi ikatan metalurgi yang kuat belum tercapai sepenuhnya. Walaupun metode ini mempertahankan sifat fungsional bahan, kekuatan ikatan logam antar partikel tetap menjadi tantangan (Giguère et al., 2025).

Untuk mengatasi keterbatasan metode pelapisan konvensional seperti lemahnya ikatan mekanis pada *thermal spraying* dan ketidakseragaman struktur serta lemahnya *bonding* pada *centrifugal casting*, penelitian ini mengusulkan pendekatan *Hot Centrifugal Casting* (HCC). Metode ini merupakan pengembangan dari *centrifugal casting* yang dikombinasikan dengan pemanasan substrat hingga suhu *austenitik*, dengan tujuan membentuk ikatan metalurgi melalui mekanisme *diffusion bonding*. Teknik *centrifugal casting* dikenal mampu menghasilkan material bergradasi fungsional (*Functionally Graded Materials/FGM*), karena gaya sentrifugal mendorong partikel ringan seperti Si atau Mg_2Si ke permukaan dalam silinder, sehingga meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus pada lapisan. Penelitian awal menunjukkan HCC efektif membentuk fasa *intermetalik* antara baja dan kuningan, sebagaimana terlihat dari pengamatan *mikroskopik*. Namun, pengujian mekanik dan karakterisasi lanjutan dengan SEM-EDX masih dilakukan untuk memastikan kekuatan ikatan dan kestabilan mikrostruktur lapisan.

2.5 Proses produksi Pipa Baja Berlapis Kuningan

Proses *hot centrifugal coating* pada pipa baja berlapis kuningan dimulai dengan pemanasan pipa hingga mencapai suhu yang telah ditentukan, yang bertujuan agar permukaan pipa menjadi kondusif untuk menerima lapisan logam kuningan dalam kondisi cair. Setelah suhu optimal tercapai, logam kuningan yang telah dicairkan kemudian dituangkan ke dalam pipa yang berputar dengan kecepatan tinggi. Rotasi ini menghasilkan gaya sentrifugal yang sangat kuat, menyebabkan logam cair tersebar dengan merata dan cepat sepanjang permukaan bagian dalam pipa.

Akibat penyebaran yang seragam ini, dapat dilihat pada Gambar 2.6 lapisan kuningan dapat terbentuk secara homogen dan konsisten. Setelah proses pendinginan dan pengerasan, lapisan kuningan tersebut merekat kuat pada permukaan pipa, menghasilkan pelapisan yang tahan lama dengan karakteristik mekanik dan korosi yang unggul (C. Zhang et al., 2023).



Gambar 2. 6 Area pemrosesan dan mekanisme pertumbuhan pelapisan (Zhang et al., 2023).

Proses produksi pipa baja berlapis kuningan menggunakan metode *hot centrifugal coating* diawali dengan tahap pembersihan pipa secara menyeluruh, kemudian dilanjutkan dengan pemanasan pipa hingga mencapai suhu optimal yang menjamin kondisi permukaan siap menerima lapisan logam. Selanjutnya, logam kuningan dilelehkan hingga mencapai kondisi cair dan kemudian

dituangkan ke dalam pipa yang sedang berputar dengan kecepatan tinggi. Gaya sentrifugal yang dihasilkan oleh putaran ini berperan penting dalam mendistribusikan logam cair secara merata ke seluruh permukaan bagian dalam pipa, membentuk lapisan yang homogen dan konsisten. Setelah tahap pelapisan, dilakukan pendinginan perlahan-lahan untuk memastikan lapisan kuningan mengeras dengan kuat tanpa muncul retakan atau cacat struktural.

Parameter utama yang mengendalikan kualitas lapisan ini meliputi kecepatan putar pipa, durasi proses *coating*, suhu pemanasan pipa, serta karakteristik fisik logam cair seperti viskositas dan komposisi kimianya. Data hasil pengukuran ketebalan lapisan dan karakteristik fisik-metalik ini selanjutnya digunakan dalam simulasi numerik berbasis *Finite Element Method* (FEM) guna memprediksi perilaku mekanik dan termal lapisan selama masa pakainya.

Proses produksi pipa baja berlapis kuningan dengan metode *hot centrifugal coating* sangat dipengaruhi oleh beberapa aspek utama yakni:

a. kecepatan putar pipa

Kecepatan rotasi pipa menentukan gaya sentrifugal yang memaksa logam cair menyebar merata ke seluruh permukaan dalam pipa. Kecepatan yang terlalu rendah dapat menyebabkan lapisan tidak merata, sedangkan terlalu tinggi bisa mempengaruhi ketebalan lapisan

b. durasi rotasi saat *coating*

Waktu rotasi saat logam cair dituangkan sangat memengaruhi ketebalan lapisan yang terbentuk pada pipa baja berlapis kuningan. Durasi *coating* yang tepat memungkinkan logam cair untuk terdistribusi secara optimal dan mengalami pengendapan yang cukup untuk membentuk lapisan pelindung yang homogen dan padat. Jika durasi rotasi terlalu singkat, logam cair mungkin belum sepenuhnya menutupi permukaan pipa sehingga menyebabkan ketebalan lapisan yang tidak merata dan rentan terhadap kerusakan. Sebaliknya, durasi yang terlalu panjang dapat menyebabkan kelebihan penumpukan lapisan yang justru mengakibatkan pemborosan bahan dan potensi masalah *stress* internal pada lapisan, yang bisa menurunkan kualitas dan daya tahan pipa. Oleh karena itu,

pengaturan durasi *coating* yang optimal sangat penting untuk menghasilkan lapisan yang cukup tebal, kohesif, dan tahan lama, sekaligus efisien dari sisi penggunaan material.

c. suhu pemanasan pipa

Pipa harus dipanaskan hingga mencapai suhu tertentu yang optimal agar logam cair kuningan dapat melekat dengan sempurna pada permukaan baja. Pemanasan ini penting untuk mengurangi tegangan termal dan memastikan ikatan metalurgi yang kuat antara lapisan kuningan dan substrat baja. Namun, suhu tersebut harus dikontrol secara ketat karena jika terlalu tinggi dapat menyebabkan deformasi termal pada pipa, merusak struktur mikro baja, atau mengurangi kekuatan mekaniknya. Sebaliknya, jika suhu terlalu rendah, logam cair tidak akan dapat menempel dengan baik, sehingga lapisan yang dihasilkan menjadi tidak merata dan mudah terkelupas. sifat fisik logam cair seperti viskositas dan komposisi kimia kuningan.

Karakteristik seperti viskositas dan komposisi kimia logam kuningan sangat mempengaruhi bagaimana logam cair mengalir dan mengeras saat *coating*.

Selain itu, pembersihan permukaan pipa sebelum proses *coating* juga sangat penting untuk memastikan adhesi lapisan. Parameter-parameter ini menentukan distribusi logam cair secara merata dan ketebalan lapisan yang terbentuk. Faktor pengendalian pendinginan lapisan setelah *coating* juga berperan dalam mencegah retak akibat perbedaan ekspansi termal antara pipa dan lapisan kuningan. Semua aspek ini menjadi *input* penting dalam simulasi metode elemen hingga (FEM) untuk memprediksi performa mekanik dan termal pipa selama pemakaian.

2.6 Tegangan Radial dan Tegangan *Hoop* Pipa Baja Berlapis Kuningan

Dalam struktur silinder berlapis seperti pipa baja berlapis kuningan yang diproduksi dengan metode *hot centrifugal coating*, distribusi tegangan

internal sangat dipengaruhi oleh perbedaan sifat material, tekanan kerja, serta tegangan sisa akibat proses manufaktur. Tegangan-tegangan utama yang muncul dalam kondisi tekanan internal adalah tegangan radial (σ_r) dan tegangan *hoop* (σ_h), yang keduanya kritis dalam menentukan kekuatan struktural dan ketahanan terhadap kegagalan *fatigue* atau deformasi plastis.

Tegangan radial (σ_r) adalah komponen tegangan yang bekerja dalam arah radial menuju atau menjauhi sumbu silinder. Pada dinding dalam silinder, tegangan radial bernilai negatif (tekan) karena tekanan internal, dan bernilai nol pada dinding luar jika tidak ada tekanan luar. Dalam konteks pipa berlapis, nilai σ_r juga dipengaruhi oleh ikatan antar-material akibat proses pendinginan diferensial selama *hot centrifugal coating*. Tegangan ini umumnya lebih kecil dibandingkan tegangan *hoop*, namun penting dalam konteks kegagalan *delaminasi* antar-lapisan, terutama jika ikatan *interfacial* lemah (Heydarpour et al., 2020).

Tegangan *hoop* (σ_h), atau tegangan *tangensial*, adalah tegangan yang bekerja mengelilingi dinding silinder secara melingkar. Tegangan ini merupakan komponen paling kritis karena bernilai dua kali lipat lebih besar dibandingkan tegangan *aksial* dalam kondisi tekanan internal, dan menjadi penyebab utama kegagalan *burst* (pecah) pada pipa bertekanan. Pada pipa berlapis, distribusi σ_h tidak homogen karena perbedaan *modulus* elastis antara baja (sekitar 200 GPa) dan kuningan (sekitar 99,95 GPa). Lapisan kuningan cenderung mengalami tegangan *hoop* yang lebih tinggi dibandingkan baja pada tekanan internal yang sama, sehingga menjadi lokasi kritis potensial untuk inisiasi retak.

Analisis elemen hingga (FEM) menunjukkan bahwa pada tekanan internal, tegangan *hoop* maksimum terjadi di dinding dalam lapisan kuningan, sementara tegangan radial berkurang secara bertahap menuju lapisan baja, menunjukkan *redistribusi* beban yang efektif akibat ikatan *interfacial* yang kuat. Distribusi ini selaras dengan solusi *Lamé* untuk silinder tebal berlapis, di mana untuk tegangan *hoop* pada persamaan (2-6) berikut:

$$\sigma_r(r) = \frac{p_i r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right) \quad (2-6)$$

di mana,

$\sigma_r(r)$ = Tegangan radial pada jari-jari (MPa)

p_i = Tekanan internal (MPa)

r_i = Jari-jari dalam silinder (bagian yang terkena tekanan)

r_0 = Jari-jari silinder luar

r = Jari-jari posisi radial (dengan $r_i \leq r \leq r_0$)

dan persamaan (2-7) tegangan radial:

$$\sigma_h(r) = \frac{p_i r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right) \quad (2-7)$$

di mana,

$\sigma_h(r)$ = Tegangan Hoop pada jari-jari (MPa)

p_i = Tekanan internal (MPa)

r_i = Jari-jari dalam silinder (bagian yang terkena tekanan)

r_0 = Jari-jari silinder luar

r = Jari-jari posisi radial (dengan $r_i \leq r \leq r_0$)

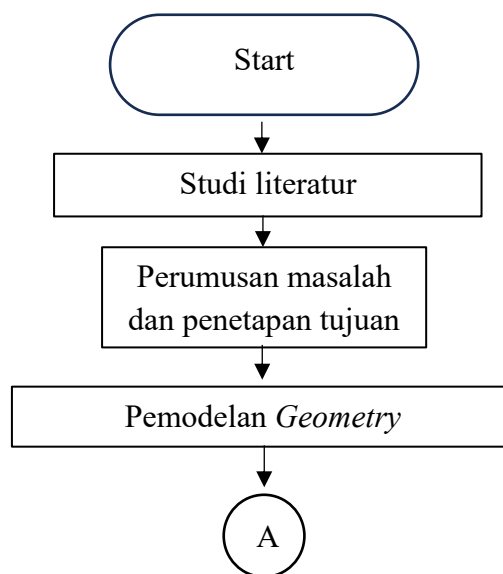
Berdasarkan penelitian (Heydarpour et al., 2020) pada *functionally graded cylinders* radien material terbukti secara signifikan menurunkan konsentrasi tegangan yang terjadi di daerah antarmuka antar lapisan, yang relevan dengan kondisi transisi tegangan antara baja dan kuningan. Meskipun demikian, ikatan mekanis yang kuat melalui *centrifugal coating* dapat meningkatkan kestabilan antarmuka meskipun terdapat perbedaan material pada pipa.

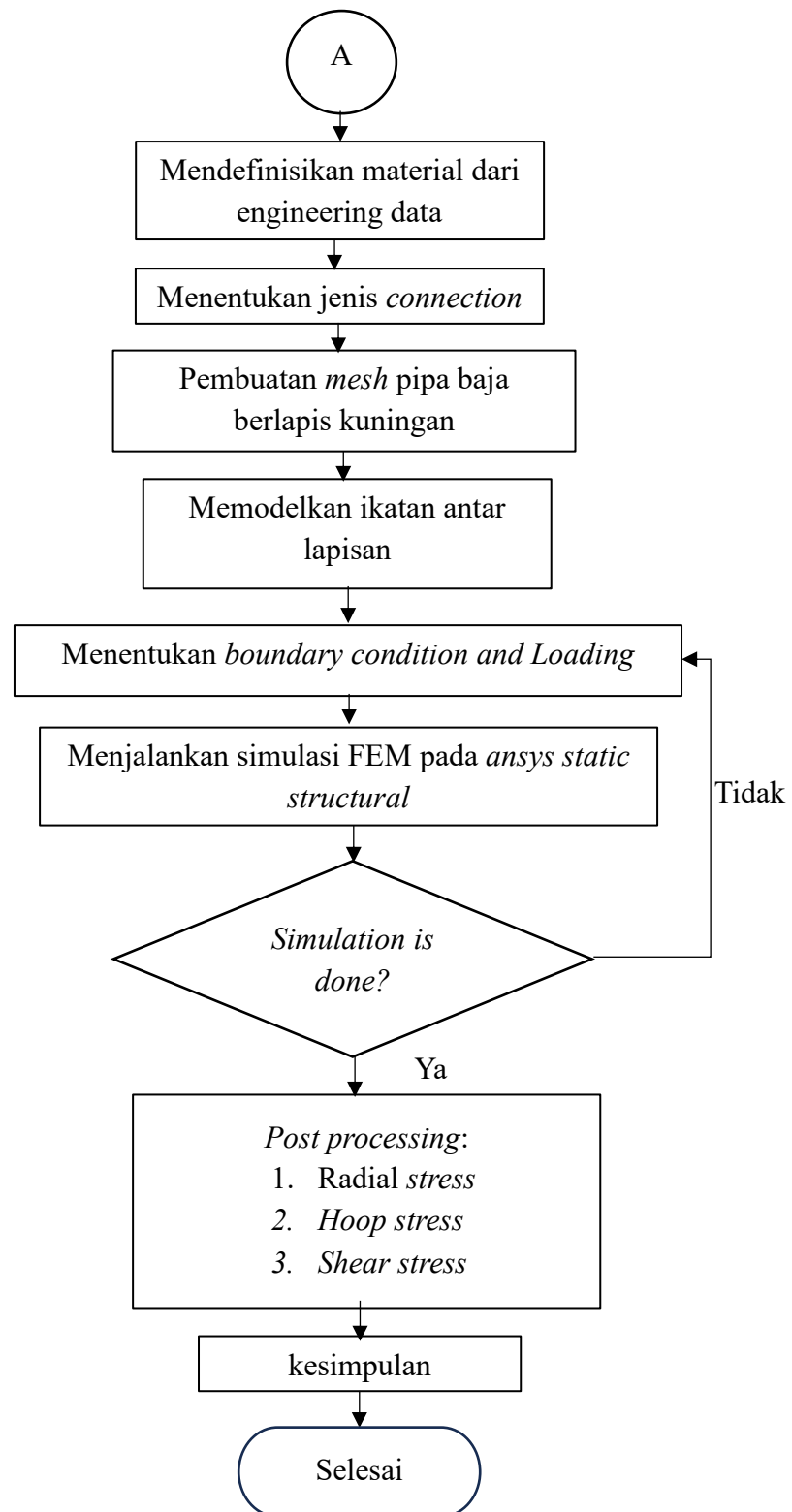
III. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dan simulasi numerik untuk memahami proses produksi pipa baja berlapis kuningan dengan teknik *hot centrifugal coating* sekaligus melakukan analisis perilaku mekanik dan termal lapisan menggunakan metode elemen hingga (FEM). Tahapan penelitian mencakup proses *coating* di laboratorium dan pemodelan simulasi komputer yang saling melengkapi.

3.1 Diagram Alir Penelitian

Adapun alur penelitian yang dilakukan digambarkan dalam bentuk diagram alir pada Gambar 3.1 sebagai berikut:





Gambar 3. 1 Diagram Alir.

3.2 Rancangan Penelitian

Penelitian ini dirancang dengan pendekatan kombinasi eksperimen dan simulasi numerik untuk mendapatkan pemahaman menyeluruh tentang proses produksi dan karakteristik mekanik pipa baja berlapis kuningan. Rancangan ini mencakup beberapa tahap utama yang saling berkaitan dan saling mendukung, yaitu proses *coating* secara praktis di laboratorium dan analisis FEM sebagai metode simulasi untuk memprediksi perilaku material melalui simulasi tekanan internal pada pipa baja berlapis kuningan.

3.3 Langkah-langkah Penelitian

Adapun Langkah-langkah penelitian yang akan dilakukan dibagi menjadi beberapa tahapan yaitu :

1. Studi Literatur
2. Perumusan masalah dan tujuan penelitian
3. Pemodelan Geometry
4. Mendefinisikan material dari *engineering* data
5. Menentukan jenis *connection*
6. *Pre-Processing*
7. *Solution Processing*
8. *Post Processing*
9. Kesimpulan

3.3.1 Studi Literatur

- a. Metode *hot centrifugal coating* menggunakan rotasi pipa untuk melapisi permukaannya dengan logam cair secara merata.
- b. Parameter utama yang memengaruhi hasil adalah suhu, kecepatan rotasi, dan durasi. Pemilihan material didasarkan pada sifat mekanik dan ketahanan korosi.

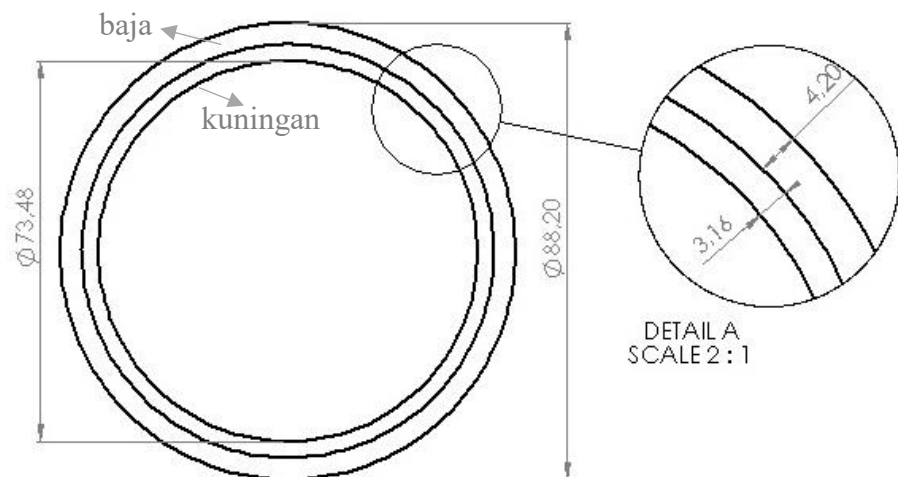
- c. Karakterisasi lapisan meliputi pengukuran ketebalan dan uji kekerasan. Simulasi FEM digunakan untuk memprediksi perilaku lapisan. Teknik ini telah terbukti efektif meningkatkan umur dan ketahanan pipa

3.3.2 Perumusan Masalah dan Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan mengatasi masalah optimasi proses pelapisan pipa baja dengan logam kuningan menggunakan metode *hot centrifugal coating*. Fokus utama adalah mengatur parameter seperti suhu, kecepatan rotasi, durasi *coating*, dan kondisi lelehan kuningan agar lapisan yang dihasilkan seragam, kuat, dan tahan korosi. Selain itu, simulasi numerik FEM digunakan untuk memprediksi perilaku mekanik dan termal lapisan sebagai pendukung hasil eksperimen. Tujuan penelitian mencakup penentuan parameter optimal, karakterisasi lapisan, analisis simulasi FEM, dan integrasi hasil guna meningkatkan kualitas dan proses produksi pipa berlapis kuningan.

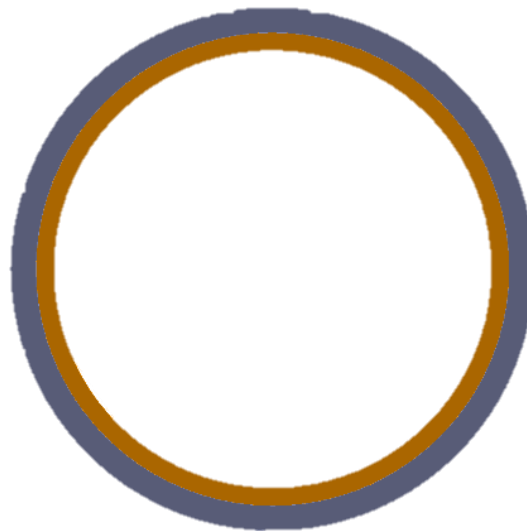
3.3.3 Pemodelan *Geometry*

Bagian ini menjelaskan mengenai pembuatan desain gambar geometri pipa baja yang akan dilapisi kuningan. Desain ini dirancang atau didesain menggunakan perangkat lunak *ansys workbench* 2021. *Geometry* digambar di *spaceclaim* pada *ansys static structural*. Mengapa *spaceclaim*, karena dengan menggunakan *spaceclaim* ini menggambar desain lebih praktis dibandingkan *designmodeler*. Pada Gambar 3.2 dapat dilihat dimensi *geometry* pipa baja kuningan:



Gambar 3. 2 Dimensi pipa baja berlapis kuningan.

Pada simulasi FEM ini difokuskan pada internal *pressure* untuk mensimulasikan tegangan (radial, *hoop*, geser) pada pipa baja kuningan produksi *hot centrifugal coating* seperti pada Gambar 3.3.



Gambar 3. 3 Desain *geometry* pipa baja berlapis kuningan.

3.3.4 *Pre-processing*

- Mengatur 2D *Behavior geometry* menggunakan *plane stress*.
- Kemudian mendefinisikan material pada *engineering data* untuk baja dan kuningan untuk memodelkan ikatan antara permukaan baja dan kuningan yang terpengaruhi oleh delaminasi. Dapat

dilihat pada Tabel 3.1 properti yang menggambarkan perilaku material.

Tabel 3. 1 *Engineering* data baja dan kuningan.

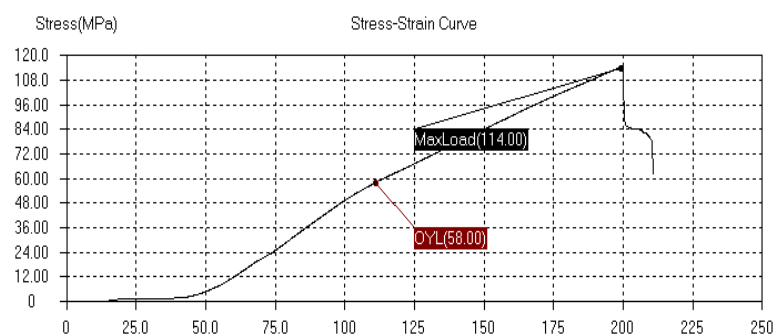
Properti	Baja	Kuningan
E	200 GPa	99,95 GPa
ν	0,3	0,345
ρ	7,85E-06 kg.mm ³	8,267E-06 kg.mm ³
σ_y	250 MPa	367,4 MPa
σ_U	460 MPa	502 MPa

Pada Gambar 3.4 didapatkan dari hasil eksperimen uji tarik *pull of test* yang dilakukan pada pipa baja berlapis kuningan yang telah dilaksanakan sebelumnya.

Uji Tarik

Sampel Pipa Berlapis (Baja-Kuningan)

SampleID	PipaS6.3	TestDate	10/2/2025
Operator	Selviana	Width(mm)	12.5
Thickness(mm)	6	So(mm)	75.00
Lo(mm)	2	Lu(mm)	
Speed(mm/min)	1	A(%)	/
Set Strain x(%)		Strain→Force(kN)	
Strain→Stress(MPa)	/	MaxLoad(kN)	8.550
UTS(MPa)	114.00	Em(mm)	3.984
Elongg(x(%))	199.2	YL(kN)	8.550
YS(MPa)	114.00	EL ₁ (mm)	3.98
EL ₁ (%)	199.0	BL(kN)	4.612
BS(MPa)	61.49	Elongg(mm)	4.2
Elongg(%)	210.0	OYL(kN)	4.350
OYS(MPa)	58.000	ElasticMod(MPa)	84.55
Energy(J)	15.933	PoissonRatio	0.00



Gambar 3. 4 Hasil eksperimen uji *pull of test* pipa baja berlapis kuningan.

Dapat dilihat dari Gambar 3.4 didapatkan data untuk mendapatkan tegangan kontak maksimum dan energi retak kritis sebagai properti material untuk memodelkan ikatan antar lapisan menggunakan CZM *Fracture* mode I sebagai pemodelan dari hasil eksperimen uji tarik sebelumnya. Berikut adalah perhitungan untuk mendapatkan tegangan normal maksimum dan energi retak.

Tegangan normal maksimum,

$$\sigma_{n,nom} = \frac{P_{max}}{A} = \frac{8,550 \text{ N}}{7.5 \times 10^{-5}} \approx 114 \text{ MPa} \quad (3.1)$$

Energi retak kritis,

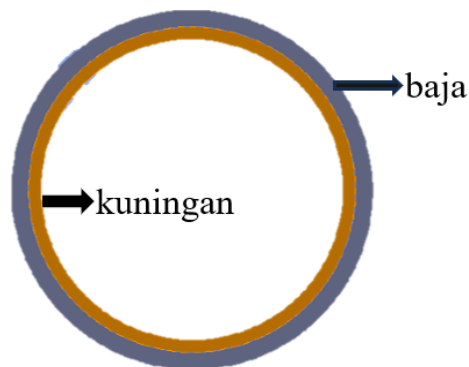
$$G_c = \frac{W}{A} = \frac{15.933 \text{ J}}{7.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2} \approx 1,19 \text{ J/m}^2 \text{ (119 mJ/mm}^2\text{)} \quad (3.2)$$

Dari perhitungan di atas didapatkan properti yang menggambarkan perilaku material CZM *Fracture* yang ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3. 2 *Engineering data CZM Fracture.*

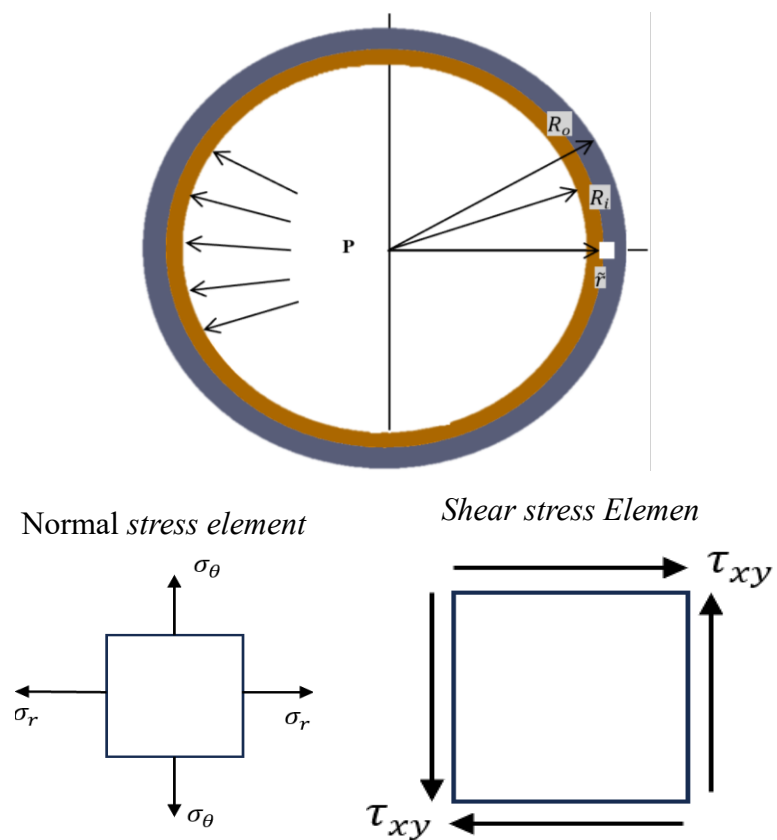
Properti	Nilai
Tegangan kontak normal maksimum	114 MPa
Energi retak kritis untuk pemisahan normal	119 mJ.mm ²

- c. Pada Gambar 3. 5 untuk baja dengan kode *structural steel* pada antarmuka yang luar berwarna abu-abu dan kuningan dengan kode *brass C37700* pada antarmuka yang berwarna *orange*.



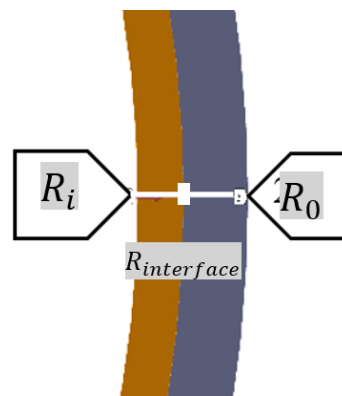
Gambar 3. 5 Penginputan material.

- d. Pada Gambar 3.6 dapat dilihat perbandingan visual antara dua jenis tegangan dasar dalam konteks pipa berlapis yang mengalami tekanan internal. Bagian atas mengilustrasikan skenario fisiknya: sebuah pipa (R_i , R_o) mengalami tekanan internal (P), dan sebuah elemen material kecil ($\tilde{r}$) dipilih untuk dianalisis. Di bawahnya, gambar ini membedah apa yang terjadi pada elemen tersebut. Di sebelah kiri, normal *stress element* menunjukkan tegangan normal (σ_r dan σ_θ) yang dijelaskan oleh persamaan *lame* yaitu gaya yang bekerja tegak lurus terhadap permukaan, mencoba menarik (*hoop*) atau menekan (*radial*) material. Sebagai kontras, di sebelah kanan, *shear stress element* mendefinisikan tegangan geser (τ_{xy}), yaitu gaya yang bekerja sejajar dengan permukaan, mencoba menggeser atau mengubah bentuk material, yang biasanya terkait dengan beban puntir (*torsi*).



Gambar 3. 6 Diagram elemen tegangan normal dan tegangan geser.

- e. Simulasi ini menggunakan jalur radial untuk mendefinisikan distribusi tegangan dari diameter dalam ke diameter luar pipa. Dapat dilihat Gambar 3.7, jalur analisis (*Path*) radial pada simulasi. Jalur ini dikonfigurasi sebagai garis yang menghubungkan dua titik (*Path Type: Two Points*) yang dapat dilihat pada Gambar 3.7 titik awal ditandai dengan R_i , kemudian titik *interface* ditandai dengan $R_{interface}$ titik akhir pada R_0 dengan menggunakan referensi sistem koordinat *cylindrical*.



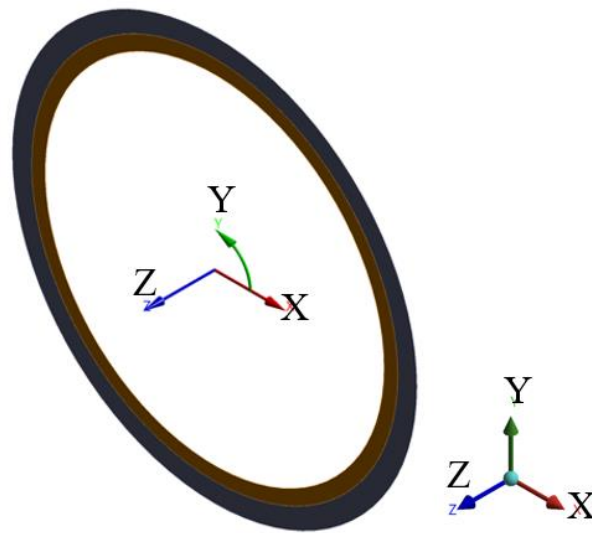
Gambar 3. 7 Radial *path*.

Titik awal (R_i) ditetapkan pada ($X = 36,84 \text{ mm}$, $Y = 0 \text{ mm}$) maka $r/R_0 = 36,84/44,2 = 0,8$ dari titik 0, Titik $R_{interface}$ ditetapkan pada ($X = 40 \text{ mm}$, $Y = 0 \text{ mm}$, maka $r/R_0 = 40/44,2 = 0,9$) dari titik 0. Sementara titik akhir (R_0) berada pada koordinat ($X = 44,2 \text{ mm}$, $Y = 0 \text{ mm}$, maka $r/R_0 = 44,2/44,2 = 1$) dari titik 0. Dengan demikian, jalur ini secara efektif membentuk sebuah garis horizontal yang sejajar dengan sumbu X, membentang dari posisi $X = 36,84 \text{ mm}$ hingga $X = 44,2 \text{ mm}$ pada bidang $Y = 0$, yang mendefinisikan tebal dari pipa tersebut yakni $7,36 \text{ mm}$. Berikut definisi lengkap dari radial *path* yang dapat dilihat pada Tabel 3.3.

Tabel 3. 3 Definisi Radial Path.

Property	Radius Ratio
<i>inner radius</i>	0,8
<i>Interface radius</i>	0,9
Outter radius	1

- f. Analisis ini menggunakan konfigurasi sistem koordinat silinder, di mana sistem koordinat dikendalikan oleh program dengan *origin* yang didefinisikan pada *geometry selection* yakni permukaan baja yang berwarna abu-bau dan kuningan yang berwarna *orange* yang dapat dilihat pada Gambar 3.8.



Gambar 3. 8 Gemoetry selection pada pengaturan sistem koordinat.

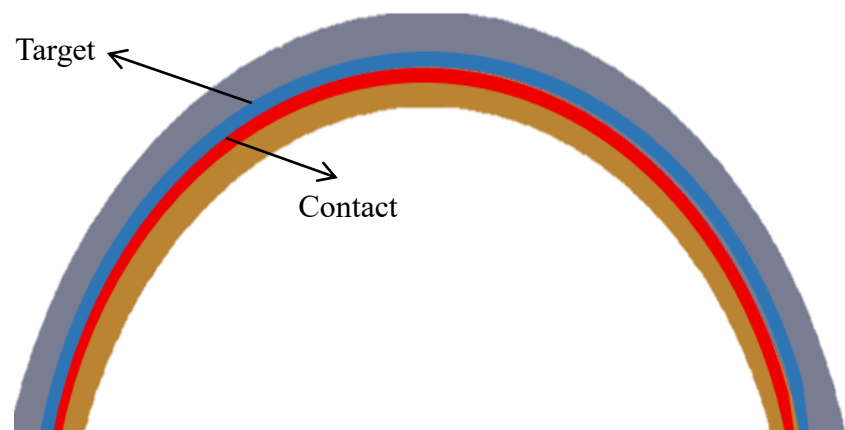
Pada Gambar 3.7 ditunjukkan sumbu utama koordinat *cylindrical (Principal Axis)* ditetapkan sesuai dengan sumbu global Z (biru) mengarah ke *aksial* (sepanjang pipa), sementara orientasi terhadap sumbu utama diatur sesuai dengan sumbu global X (merah) mengarah radial (keluar dari pusat), dan sumbu Y (hijau) mengarah ke *tangensial* (mengelilingi pipa) yang ditetapkan sesuai dengan sumbu global Y. Konfigurasi ini penting untuk menentukan referensi kerangka kerja dalam pemodelan dan analisis numerik berorientasi sumbu silinder

pada penelitian ini. Pada Tabel 3.4 dapat dilihat pengaturan definisi sistem koordinat *cylindrical* pada *ansys static structural*.

Tabel 3. 4 Definisi koordinat *cylindrical*.

Property	Definisi
Tipe	<i>Cylindrical</i>
Terdefinisi oleh	Global koordinat
Sumbu utama	Sumbu z lokal searah dengan z global
Orientasi sekunder	Sumbu x lokal searah dengan x global

- g. Pemodelan interaksi antarmuka pipa baja berlapis dikonfigurasi menggunakan kontak tipe *bonded*. Pada Gambar 3.9 ditetapkan tepian luar kuningan sebagai *contact bodies* (merah) dan tepian dalam baja sebagai target *bodies* (biru).



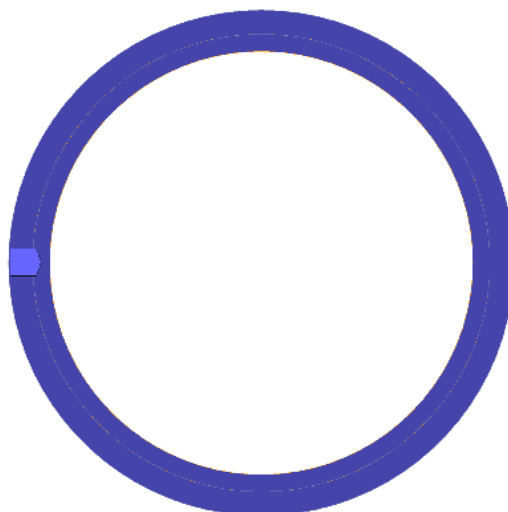
Gambar 3. 9 Daerah Kontak.

Tipe *bonded* mengasumsikan kedua permukaan menyatu secara permanen, sehingga mencegah terjadinya celah atau pergeseran relatif di antara keduanya. Solusi numerik untuk kontak ini menggunakan formulasi *augmented lagrange* dan metode deteksi menggunakan *on gauss.point*. Untuk pengaturan kontak ini dapat dilihat pada definisi pengaturan daerah kontak pada Tabel 3.6.

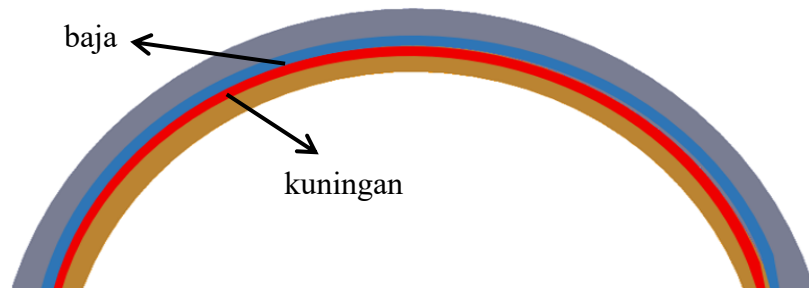
Tabel 3. 5 Definisi Kontak.

Property	Definisi
Metode lingkup :	Kontak : tepian luar kuningan
Berdasarkan geometri	Target : Tepian luar baja
Tipe	<i>Bonded</i>
Formula solusi numerik	<i>Augmented lagrange</i>
Metode deteksi	<i>On Gauss Point</i>

- h. Pengaturan parameter-parameter *meshing* yang digunakan dalam proses pemodelan numerik ini menggunakan elemen *plane 183 high order 8 node*. Elemen ini mempunyai *displacement quadratic* dengan 2 DOF (*degree of freedom*), yaitu translasi pada arah X (radial) dan Y. Dapat dilihat pada Gambar 3.10 kedua permukaan *Mesh* dipilih dengan ditunjukkan dengan permukaan berwarna biru dan diatur dengan ukuran elemen sebesar 0,4 mm. Simulasi ini menggunakan metode *meshing multizone Quad/Tri* yang diterapkan pada permukaan baja dan juga permukaan kuningan. *Multizone* ini merupakan metode yang bisa digunakan dalam *ansys static structural* untuk menyempurnakan distribusi tegangan di sepanjang pipa.

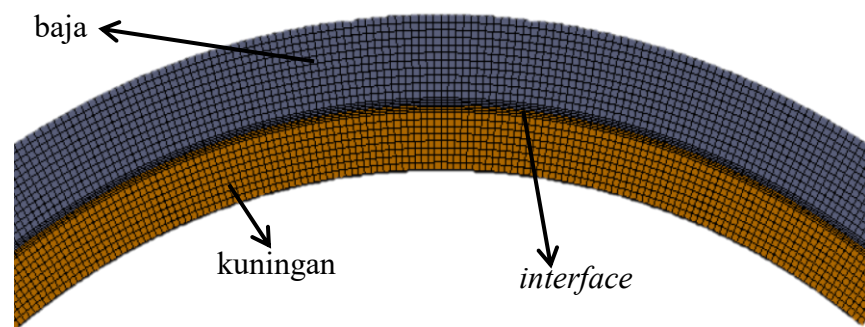
Gambar 3. 10 Metode *multizone quad/tri*.

Metode *multizone* pada Gambar 3. 10 dikontrol menggunakan inflasi untuk meningkatkan keakuratan pada area kritis. Pada simulasi ini area kritis terjadi di antara tepian luar kuningan dan tepian dalam baja. Maka, proses *meshing* menggunakan 2 inflasi masing-masing pada tepian luar kuningan (merah) dan tepian dalam baja (biru) dapat dilihat pada Gambar 3.11.



Gambar 3. 11 Inflasi.

Kedua kontrol inflasi tersebut diatur dengan 3 lapisan, tebal lapisan pertama (*first layer thickness*) adalah 0,1 mm, lapisan maksimum sebanyak 3 lapisan dan *growth rate* sebesar 1,1 yang menghasilkan *meshing* yang ditunjukkan pada Gambar 3. 12.



Gambar 3. 12 Hasil *meshing*.

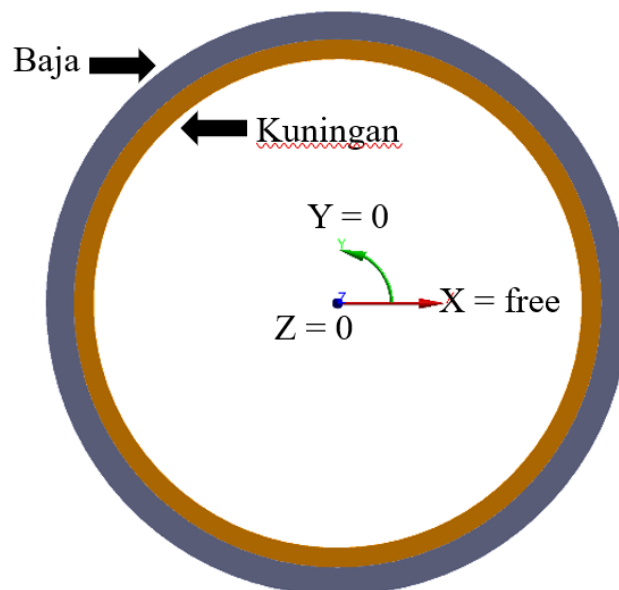
Pada pengaturan lanjutan, simulasi ini dijalankan dengan menggunakan 4 CPU, elemen menggunakan perilaku *rigid body* yang direduksi secara dimensi, serta pengecekan *topologi* diaktifkan untuk menjaga keutuhan *mesh*. Statistik akhir menunjukkan jumlah *node* sebanyak 55,300 dan elemen sejumlah 7,500 yang mencerminkan detail *mesh* yang cukup halus untuk analisis.

3.3.5 Pengaturan pemodelan antar muka

Pemodelan antar muka menggunakan CZM dilakukan pada daerah kontak yang sebagaimana yang telah didefinisikan pada kontak. Pada Gambar 3.9 dapat dilihat untuk daerah kontak yang diterapkan pada tepian luar kuningan (merah) dan target pada tepian dalam baja (biru).

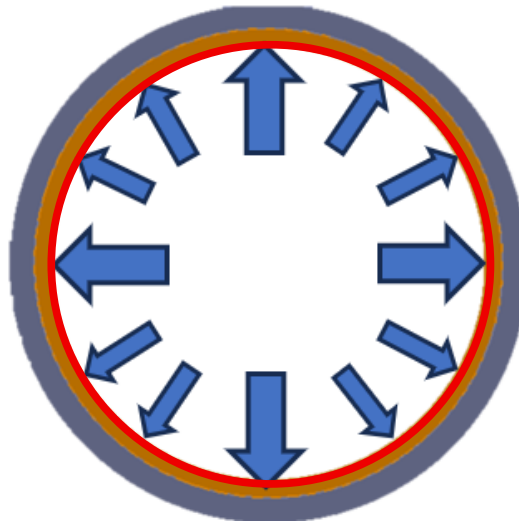
3.3.6 Kondisi batas dan Pembebanan

- a. Pengaturan kondisi batas *displacement* dalam model simulasi menggunakan metode *scoping* (penentuan area secara manual yang akan dianalisis) yang area dipilih berdasarkan *geometry selection* (menyeleksi bagian-bagian dari model 3D (geometri) yang akan digunakan dalam analisis) yang diterapkan pada 2 *Faces* atau permukaan baja (abu-abu) dan permukaan kuningan (*orange*) pada Gambar 3.13. Definisi perpindahan (*displacement*) diatur berdasarkan *components* (sesuai arah sumbu sistem koordinat) yang didefinisikan oleh sistem koordinat *cylindrical*. Komponen pada sumbu X (*radial*) dibiarkan *Free* (bebas bergerak), sedangkan komponen pada sumbu Y (*tangensial*) ditetapkan sebesar 0 mm (*fixed*).



Gambar 3. 13 *Displacement*.

- b. Pengaturan *pressure* metode *scoping* yang digunakan adalah *Geometry Selection* yang diterapkan pada 1 *Edge* atau tepian dalam kuningan yang ditunjukkan garis merah pada Gambar 3.14. Metode pengaplikasian tekanan yang digunakan adalah *define by : normal to*. Besar tekanan (*pressure magnitude*) yang diberikan adalah 120 MPa. Pengaturan analisis (*Analysis Settings*) diatur untuk diselesaikan dalam 1 step, yang dibagi lagi menjadi 120 *substep*.



Gambar 3. 14 *Pressure*.

3.3.7 *Solution and Post processing*

a. Solusi

Setelah proses *preprocessing*, penentuan kondisi batas dan pembebanan telah dilakukan, kemudian dilanjutkan dengan solusi

b. *Post processing*

1. Hasil pertama yakni berupa *contour*, grafik riwayat tegangan geser, dan *path* tegangan normal (radial) berdasarkan sumbu koordinat x *axis* dengan koordinat *system* silinder.
2. Hasil kedua adalah berupa *contour*, *isoline*, dan *path* tegangan normal (*hoop*) berdasarkan sumbu koordinat y *axis* dengan koordinat *system* silinder.

3. Hasil ketiga adalah berupa *contour*, *isoline*, dan *path* tegangan geser berdasarkan sumbu xy dengan koordinat system silinder.

3.4 Alat dan Bahan

3.4.1 Laptop

Laptop berfungsi sebagai media untuk menjalankan perangkat lunak (*Software Solidworks*) sehingga dapat digunakan dalam pemodelan dan perangkat lunak (ANSYS) yang digunakan dalam proses simulasi. Adapun spesifikasi laptop yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Merek : Asus Vivobook Pro 14 OLED
- b. *Processor* : AMD Ryzen 5 5600H
- c. RAM : 16 GB DDR4
- d. *System type* : Windows 11 Home
- e. *Disk* : SSD NVMe PCIe Gen4 512GB
- f. *Graphics Card* : AMD Radeon(TM) Graphic

3.4.2 Software Ansys 2021

Software Ansys 2021 dipakai untuk mensimulasi dan menganalisa model pipa baja berlapis kuningan untuk menentukan model *geometry*, proses *meshing*, sampai dengan menjalankan simulasi FEM, dan mendapatkan jumlah tekanan internal dan total deformasi.

3.5 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Agustus 2025 sampai dengan bulan November 2025. Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Mekanika Struktur Teknik Mesin Universitas Lampung.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang didapatkan dari hasil simulasi elemen hingga pembebanan internal *pressure* dari pipa baja berlapis kuningan hasil produksi dari *hot centrifugal coating* adalah sebagai berikut:

1. Pemodelan FEM tegangan (radial, hoop, Geser) pemodelan 2D FEM menggunakan elemen *Plane 183 high order 8 node* untuk menangkap gradien tegangan yang kompleks. Untuk memprediksi potensi kegagalan ikatan, antarmuka baja-kuningan dimodelkan secara spesifik menggunakan *Cohesive Zone Method* (CZM). Metode ini digunakan untuk mendefinisikan perilaku delaminasi berdasarkan parameter kekuatan ikatan (seperti *tegangan kontak normal maksimum* dan *energi retak kritis*) yang diperoleh dari data eksperimen.
2. Akurasi FEM di Zona Antarmuka dengan analisis konvergensi *mesh* berhasil membuktikan bahwa ukuran elemen sudah optimal dan memberikan solusi tegangan yang stabil dan akurat (perubahan *Hoop Stress* tidak signifikan dibandingkan ukuran). Selain itu, kualitas *mesh* yang sangat tinggi (nilai *Orthogonal Quality* rata-rata) menjamin akurasi hasil di zona antarmuka.
3. Distribusi Tegangan Akibat Tekanan Internal:
 - a. Tegangan *Hoop* (σ_θ), yang merupakan tegangan tarik utama yang menahan pipa agar tidak pecah, terdistribusi tidak merata dan sangat bergantung pada kekakuan material. Baja yang memiliki *Modulus Elastisitas* lebih tinggi (lebih kaku) menanggung beban yang jauh

lebih besar, mencapai nilai maksimum 812,49 MPa. Sebaliknya, lapisan kuningan yang lebih fleksibel menanggung tegangan yang lebih rendah, yaitu 390,39 MPa. Fenomena ini disebabkan oleh prinsip mekanika komposit, di mana material yang lebih kaku akan secara alami menanggung porsi gaya yang lebih besar agar kedua material dapat mengalami regangan (deformasi) yang sama.

- b. Tegangan Radial (σ_r) adalah tegangan tekan yang dihasilkan oleh material untuk melawan tekanan internal. Hasil simulasi menunjukkan nilai tekan tertinggi sebesar -119,84 MPa tepat di permukaan dalam kuningan. Nilai ini hampir identik dengan tekanan yang diberikan (120 MPa), yang membuktikan akurasi pembebanan dalam model. Tegangan ini berperan vital dalam menjaga integritas ketebalan pipa.
- c. Tegangan Geser (τ_{xy}) mencapai konsentrasi tertinggi di antarmuka (batas) antara lapisan baja dan kuningan, dengan nilai absolut maksimum sebesar -1,5667 MPa. Konsentrasi geser di lokasi ini adalah hasil dari upaya penyesuaian yang saling tarik-menarik (*shear lag*) antara dua material dengan kekakuan yang berbeda yang dipaksa meregang bersama. Nilai ini sangat penting karena menunjukkan bahwa antarmuka material adalah zona yang paling rentan terhadap potensi kegagalan geser atau delaminasi (pengelupasan lapisan), dan karenanya harus menjadi fokus utama dalam evaluasi kekuatan produk.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan dari hasil simulasi elemen hingga pembebanan internal *pressure* pada pipa baja berlapis kuningan hasil produksi dari *hot centrifugal coating* adalah sebagai berikut:

1. Memperluas simulasi ke analisis *termomekanik* dengan memasukkan beban termal dan tegangan sisa yang timbul dari proses *hot centrifugal*

casting (HCC). Tegangan sisa, akibat perbedaan koefisien ekspansi termal antara baja dan kuningan, sangat penting untuk diprediksi karena dapat menyamakan posisinya dengan tegangan operasional dan meningkatkan risiko kegagalan *delaminasi*.

2. Mengingat tegangan geser tertinggi terpusat di antarmuka material, disarankan untuk melakukan analisis kelelahan (*fatigue*) terhadap pembebanan siklik. Analisis ini akan memberikan prediksi yang lebih akurat mengenai umur pakai pipa dalam kondisi operasional yang realistis
3. Melakukan simulasi pada kondisi non-linier (elastis-plastis). Simulasi linier elastis yang digunakan saat ini hanya valid hingga batas luluh material; analisis non-linier diperlukan untuk memprediksi perilaku pipa jika tekanan internal melebihi batas elastisitasnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Adamiak, M., Appiah, A. N. S., Żelazny, R., Batalha, G. F., & Czupryński, A. (2023). Experimental Comparison of Laser Cladding and Powder Plasma Transferred Arc Welding Methods for Depositing Wear-Resistant NiSiB + 60% WC Composite on a Structural-Steel Substrate. *Materials*, 16(11). <https://doi.org/10.3390/ma16113912>
- Badalan, M., Bottausci, F., Ghigliotti, G., Achard, J. L., & Balarac, G. (2022). Three-dimensional phase diagram for the centrifugal calcium-alginate microcapsules production technology. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 635. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127907>
- Bohacek, J., Kharicha, A., Ludwig, A., & Wu, M. (2014). Simulation of horizontal centrifugal casting: Mold filling and solidification. *ISIJ International*, 54(2), 266–274. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.266>
- Chen, G., Ohnishi, Y., Zheng, L., & Sasaki, T. (2013). Frontiers of discontinuous numerical methods and practical simulations in engineering and disaster prevention. In *Frontiers of Discontinuous Numerical Methods and Practical Simulations in Engineering and Disaster Prevention*. <https://doi.org/10.1201/b15791>
- Das, S. (2023). Weld Cladding, ATIG Welding and Wire Arc Additive Manufacturing: Some Emerging Areas of Welding Research. *Indian Science Cruiser, January*, 36–45. <https://doi.org/10.24906/isc/2023/v37/i3/223656>
- Ding, Y., Gui, W., Nie, B., Bi, W., Zhong, C., Xue, Y., & Luan, B. (2023). Elimination of elemental segregation by high-speed laser remelting for ultra-

- high-speed laser cladding Inconel 625 coatings. *Journal of Materials Research and Technology*, 24(October), 4118–4129. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.028>
- Dong, Z., Xu, Z., Wang, W., Bi, Z., & Zhang, J. (2020). *Numerical Simulation and Experimental Confirmation of a Bimetallic Pipe Forming Process*. 1–18.
- Fitri, S. N., Utami, T. B., & Kurniawati, W. (2024). Analisis Penerapan Gaya Gesek Pada Kehidupan Manusia. *Jurnal Ilmiah Multidisiplin*, 1(3), 97–100. <https://doi.org/10.62017/merdeka>
- Giguère, J., Lamarre, J. M., Bernier, F., Nascimento, A., Lacroix, C., Ménard, D., & Sirois, F. (2025). Cold Spray Additive Manufacturing of SmCo-Al Permanent Magnets. *Journal of Thermal Spray Technology*, 34(1), 120–128. <https://doi.org/10.1007/s11666-024-01923-z>
- Gildersleeve, E. J., & Vaßen, R. (2023). Thermally Sprayed Functional Coatings and Multilayers: A Selection of Historical Applications and Potential Pathways for Future Innovation. *Journal of Thermal Spray Technology*, 32(4), 778–817. <https://doi.org/10.1007/s11666-023-01587-1>
- Gong, J., Wei, H., Hao, P., Li, S., Zhao, X., Tang, Y., & Zuo, Y. (2024). Study on the Influence of Metal Substrates on Protective Performance of the Coating by EIS. *Materials*, 17(2). <https://doi.org/10.3390/ma17020378>
- Habbar, G., Hocine, A., Maizia, A., Bezazi, A., Ribeiro, J., Houcine Dhaou, M., & Bouledroua, O. (2023). Failure analysis of biocomposite sandwich pipe under internal pressure – Application for high pressure gas transportation pipelines MEDGAZ. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 202(January). <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2023.104891>
- Hamdani, H., & Turmizi, T. (2022). Residual Stress Analysis in Pipe Welding ASTM A106 Grade B Using FEM Simulation. *Journal of Welding Technology*, 4(2), 55–59. <https://doi.org/10.30811/jowt.v4i2.3507>
- Heydarpour, Y., Malekzadeh, P., Dimitri, R., & Tornabene, F. (2020). Thermoelastic analysis of functionally graded cylindrical panels with

- piezoelectric layers. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(4).
<https://doi.org/10.3390/app10041397>
- Lee, U. G., Kim, W. B., Han, D. H., & Chung, H. S. (2019). A modified equation for thickness of the film fabricated by spin coating. *Symmetry*, 11(9), 1–20.
<https://doi.org/10.3390/sym11091183>
- Linke, M., & Lammering, R. (2023). On the calibration of the cohesive strength for cohesive zone models in finite element analyses. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 124. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103733>
- Mackerle, J., Omar, O. K., Al-huniti, N. S. N., Al-jeradat, A. G., Al-ramahi, N. J., Joffe, R., & Varna, J. (2019). *Stress Analysis of a Cylinder Subjected to Thermo-mechanical Loads by Using FEM Stress Analysis of a Cylinder Subjected to Thermo-mechanical Loads by Using FEM*.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/438/1/012036>
- Makhlouf, A. S. H., & Tiginyanu., I. (2011). Current and advanced coating technologies for industrial applications. In A. S. H. Makhlouf & I. Tiginyanu (Eds.), *In Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering, Nanocoatings and Ultra-Thin Films*, Woodhead Publishing, (pp. 3–23).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9780857094902.1.3>.
- Maqableh, A. M., & Hatamleh, M. M. (2023). Cohesive Zone Modeling of Pull-Out Test for Dental Fiber–Silicone Polymer. *Polymers*, 15(18).
<https://doi.org/10.3390/polym15183668>
- Mirone, G., Barbagallo, R., Bua, G., & La Rosa, G. (2023). Finite Element Simulation and Sensitivity Analysis of the Cohesive Parameters for Delamination Modeling in Power Electronics Packages. *Materials*, 16(13).
<https://doi.org/10.3390/ma16134808>
- Mohanty, S., & Gokuldoss Prashanth, K. (2023). Metallic Coatings through Additive Manufacturing: A Review. *Materials*, 16(6).
<https://doi.org/10.3390/ma16062325>
- Molina, M. T., Cano, E., & Ramírez-Barat, B. (2023). Protective coatings for

- metallic heritage conservation: A review. *Journal of Cultural Heritage*, 62, 99–113. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.05.019>
- Müzel, S. D. (2020). Application of the Finite Element Method in the Analysis of Composite Materials: A Review. *Polymers*, 12. <https://doi.org/10.3390/polym12040818>
- Nurhadiyanto, D., Mujiyono, M., & Ristadi, F. A. (2017). *The Characteristics of Aluminum Casting Product Using Centrifugal Casting Machine*. 102(Ictvt), 153–158. <https://doi.org/10.2991/ictvt-17.2017.27>
- Paramaguru, G., V, J. G., Moorthi, V., Kandasamy, V., Veerappan, D., Rajendran, S., & Pant, R. (2025). *Stress Analysis Of An Open-Ended Thick-Walled Cylinder*. 11(21), 1806–1818.
- Patil, H., & Jeyakarthikeyan, P. V. (2018). Mesh convergence study and estimation of discretization error of hub in clutch disc with integration of ANSYS. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 402(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/402/1/012065>
- Phalguna, B. N. (2017). *Stress and Failure Analysis of Thick Walled Cylinder with Oblique Hole*. 6(08), 36–45.
- Sülü, İ. Y. (2017). Stress Analysis of Multi-Layered Hybrid Composite Pipes Subjected to Internal Pressure. *International Journal of Engineering & Applied Sciences (IJEAS)*, February. <https://doi.org/10.24107/ijeas.278872>
- Swales, G. L. (2023). *Application of centrifugal-cast-alloy piping and pipe fittings in onshore and offshore oil and gas production*. 1–16.
- Tran, P.-N., Ba-Duc, T., Duy-Cuong, N., Thi-Lan, N., Van-Dang, T., & Thanh-Tung, D. (2022). *A Facile Centrifuge Coating Method for High-Performance CsPbBr₃ Compact and Crack-Free Nanocrystal Thin Film Photodetector*. 12,587, 1–10. <https://doi.org/10.3390/cryst12050587>
- Yahya, N. (2023). *Finite Element Analysis of Bonded Steel Pipeline Finite Element Analysis of Bonded Steel Pipeline*. May.

- Yimyai, T., Crespy, D., & Rohweder, M. (2023). *ACorrosion-Responsive Self-Healing Coatings* (pp. 1–24). Wiley-VCH GmbH. <https://doi.org/10.1002/adma.202300101>
- Yusup, E. M., Azahari, H., Saiful, S., Mansor, F., & Hidayat, M. N. (2024). *A Mesh Convergence Study for 2D Axisymmetric Pipe Wall Thickness Journal of Advanced Research in Micro and Nano Engineering A Mesh Convergence Study for 2D Axisymmetric Pipe Wall Thickness. September.*
- Zhang, C., Li, Y., Xu, X., Zhang, M., Leng, H., & Sun, B. (2023). Optimization of Plating Process on Inner Wall of Metal Pipe and Research on Coating Performance. *Materials*, 16(7). <https://doi.org/10.3390/ma16072800>
- Zhang, P., Wang, W., Wang, T., Wu, T., Ren, Z., Han, J., & Zhao, C. (2025). Research on interfacial bonding mechanism and mechanical properties of TA1/45 carbon steel composite tubes by hot power spinning. *Journal of Materials Research and Technology*, 35(September 2024), 5894–5907. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.12.210>
- Zhang, W., & Xu, J. (2022). Advanced lightweight materials for Automobiles: A review. *Materials and Design*, 221, 110994. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110994>