

Analisis Ketebalan dan Kualitas Pelapisan Struktur Baja di Area Tambang

Toni Okviyanto¹, Dibyo Setiawan², Hanni Maksum Ardi², Agus Subeno³, Angga Setiawan³, Cahyo Wibowo⁴

¹Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Sriwijaya

²Prodi Proses Manufaktur, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung

³Jurusan Teknik Mesin, Institut Sains dan Teknologi Al-kamal, Jakarta

⁴Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mpu Tantular Jakarta

e-mail : toni.okviyanto@polsri.co.id

Received 29 Juli 2025 | Revised 3 September 2025 | Accepted 1 Juni 2026

ABSTRAK

Integritas struktur baja di lingkungan pertambangan tropis mempengaruhi kualitas sistem pelapisan pelindung proses konstruksi membuat sangat rentan terhadap korosi. Pelapisan permukaan baja merupakan metode mitigasi yang efektif digunakan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi ketebalan dan kualitas pelapisan struktur baja piperack 3115 di area tambang terbuka, melalui pendekatan studi kasus lapangan. Proses pelapisan dilakukan secara manual menggunakan kuas dan roller, dengan metode persiapan permukaan berdasarkan standar SSPC-SP2 dan SSPC-SP3. Masalah yang diangkat dalam studi ini adalah adanya deviasi ketebalan pelapisan yang signifikan dari spesifikasi teknis, yang berpotensi mempengaruhi performa dan daya tahan sistem pelindung. Hasil pengukuran ketebalan lapisan kering (DFT) menunjukkan nilai existing coat sebesar 674 μm , lapisan primer 926 μm (spesifikasi 150 μm), dan top coat 1038 μm (spesifikasi 75 μm). Meskipun pelapisan dilakukan dalam kondisi lingkungan yang relatif stabil dan sesuai standar (suhu 29–33 °C, kelembaban 70–85%), kelebihan ketebalan berisiko menimbulkan retak atau delaminasi akibat tegangan internal. Penelitian ini menunjukkan perlunya peningkatan pengawasan mutu dan pelatihan aplikator di lapangan agar hasil pelapisan lebih seragam, aman, dan sesuai spesifikasi kondisi ekstrem di lingkungan pertambangan. Rekomendasi diberikan untuk peningkatan pemantauan proses dan pelatihan tenaga kerja untuk meminimalkan deviasi selama aplikasi pelapisan secara manual di proyek-proyek industri serupa.

Kata kunci: Pelapisan, struktur baja, ketebalan lapisan kering, perlindungan korosi, infrastruktur tambang

ABSTRACT

The integrity of steel structures in tropical mining environments significantly affects the quality and durability of protective coating systems, making them highly susceptible to corrosion during the construction process. Surface coating is one of the most commonly used and effective methods of corrosion mitigation. This study aims to evaluate the thickness and quality of protective coatings applied to the steel structure of Piperack 3115 in an open-pit mining area through a field case study approach. The coating process was carried out manually using brushes and rollers, with surface preparation methods based on SSPC-SP2 and SSPC-SP3 standards. The primary issue identified in this study is the significant deviation in coating thickness from technical specifications, which may impact the performance and durability of the protective system. Measurements of dry film thickness (DFT) revealed values of 674 μm for the existing coat, 926 μm for the primer layer (specified at 150 μm), and 1038 μm for the top coat (specified at 75 μm). Although the coating application was conducted under relatively stable and standard environmental conditions (29–33 °C temperature, 70–85% humidity), excessive thickness poses a risk of cracking or delamination due to internal stress. This study highlights the need for improved quality control and field applicator training to ensure coating results are uniform, safe, and compliant with specifications under extreme mining conditions. Recommendations are proposed to enhance process monitoring and workforce training to minimize deviations in manual coating applications on similar industrial projects.

Keywords: Coating, steel structure, dry film thickness, corrosion protection, mining infrastructure

1. Pendahuluan

Struktur baja pada industri pertambangan modern, seperti *piperack*, tangki, *conveyor support*, dan struktur penyangga lainnya, memiliki peran vital dalam menunjang sistem transportasi material, utilitas, serta jalur pipa bertekanan tinggi yang beroperasi dalam kondisi ekstrem [1]. Keandalan struktur-struktur ini sangat ditentukan oleh kemampuannya dalam menghadapi beban mekanis dan lingkungan yang agresif, seperti kelembaban tinggi, paparan sinar ultraviolet, kabut garam dari atmosfer laut, serta partikel abrasif akibat aktivitas tambang terbuka. Salah satu tantangan paling kritis yang mengancam keberlanjutan fungsi dan keselamatan struktur baja tersebut adalah korosi [2]. Korosi bukan hanya menyebabkan penurunan kekuatan struktural secara bertahap, tetapi juga memicu peningkatan biaya pemeliharaan dan risiko terjadinya kegagalan sistem yang dapat menghentikan produksi dan membahayakan keselamatan kerja [3]. Oleh karena itu, perlindungan terhadap korosi menjadi isu sentral dalam pengelolaan infrastruktur baja di lingkungan tambang yang keras dan menuntut pendekatan mitigasi yang sistematis dan berkelanjutan [4].

Korosi pada baja karbon yang terpapar larutan NaCl dapat menurunkan kekuatan struktural secara signifikan, bahkan hingga lebih dari 70% bila tidak diberikan perlindungan yang tepat [5]. Korosi dapat mengakibatkan pelubangan, retak, pengelupasan, hingga kegagalan total suatu sistem penyangga [6]. Oleh sebab itu, strategi mitigasi korosi yang sistematis, ekonomis, dan berkelanjutan menjadi keharusan dalam manajemen infrastruktur pertambangan [7], [8].

Penerapan sistem pelapisan pelindung atau cat industri pada permukaan baja menjadi salah satu metode banyak digunakan dan efektif untuk mengatasi korosi dalam jangka panjang [9-12]. Cat pelindung berperan sebagai penghalang antara baja dan lingkungan eksternal, mencegah terjadinya reaksi elektrokimia yang menyebabkan degradasi material [13]. Namun, efektivitas sistem pelapisan ini sangat dipengaruhi oleh proses persiapan permukaan, teknik aplikasi, pemilihan jenis cat, serta pengawasan mutu selama pelaksanaan pekerjaan di lapangan [14], [15]. Dalam proyek-proyek berskala besar seperti di industri pertambangan, tantangan tambahan muncul karena kondisi kerja yang tidak selalu ideal, keterbatasan akses terhadap bagian struktur tertentu, serta fluktuasi cuaca yang mempengaruhi curing time dan hasil akhir lapisan pelindung [16].

Pelaksanaan pelapisan dilapangan sering mengalami kendala seperti kondisi cuaca yang tidak menentu, keterbatasan akses ke bagian struktur tertentu, serta keterbatasan kompetensi tenaga kerja. Proyek pengecatan ulang struktur baja memiliki ketentuan teknis pelapisan mewajibkan penggunaan sistem pelapisan dengan ketebalan dan jenis material tertentu, serta pengawasan mutu yang ketat [17]. Secara teknis, keberhasilan suatu sistem pelapisan pelindung tidak hanya ditentukan oleh ketebalan lapisan cat (DFT) yang dihasilkan, tetapi juga oleh kualitas adhesi antara substrat dan lapisan cat, homogenitas distribusi lapisan, serta ketahanan terhadap retak dan pengelupasan dalam jangka panjang [18-20]. Pelapis tahan api pada struktur baja tebal menunjukkan bahwa salah satu penyebab utama kegagalan pelapisan adalah ketidakseimbangan antara kekakuan lapisan dan deformasi struktur akibat beban dinamis [21]. Pengujian terhadap sistem pelapisan tebal berbasis semen menunjukkan bahwa formulasi resin, distribusi partikel, dan metode aplikasi mempengaruhi ketahanan retak secara signifikan dalam kondisi getaran atau beban siklik tinggi [22].

Zhang et al. dalam publikasi yang sama menekankan pentingnya pengujian ketahanan retak dan adhesi dari pelapis baja struktural, terutama pada fasilitas kesehatan bertingkat tinggi yang menggunakan baja sebagai komponen utama. Mereka menyimpulkan bahwa sistem pelapis yang optimal harus mempertimbangkan tidak hanya perlindungan terhadap api atau panas, tetapi juga terhadap beban siklik dan degradasi kelembaban jangka panjang. Hasil-hasil ini relevan dan dapat diadaptasi untuk lingkungan pertambangan, di mana beban dinamis dari aktivitas alat berat dan paparan kelembaban tinggi juga merupakan hal umum [23].

Pengujian performa pelapisan untuk substrat baja, Bhoi et al. melakukan studi komparatif terhadap berbagai bahan pelapis mikro pada substrat baja kecepatan tinggi untuk aplikasi mikro-milling. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa pemilihan bahan pelapis (seperti TiN, DLC, AlTiN, TiSiN) sangat menentukan dalam mengurangi deformasi plastik substrat dan menjaga kekuatan lapisan pelindung. Meskipun studi tersebut berfokus pada aplikasi manufaktur presisi, temuan mengenai efek bahan pelapis dan metode aplikasi terhadap performa jangka panjang tetap relevan untuk aplikasi lapangan yang lebih besar seperti *pipelack* [24].

Sam et al. menambahkan perspektif mengenai performa pelapis pelindung pasca paparan suhu tinggi pada struktur baja ringan bentuk dingin. Penelitian ini menggarisbawahi pentingnya jenis pelapis seperti perlite dan gypsum dalam mempertahankan kekuatan tekan axial pasca kebakaran [25]. Temuan ini menunjukkan bahwa pemilihan bahan pelapis dan metode pendinginan setelah paparan termal memainkan peran penting dalam mempertahankan kapasitas struktural baja. Informasi yang sangat bermanfaat bagi perencanaan pelapisan di fasilitas yang berpotensi terpapar panas atau percikan api, termasuk area pertambangan dan pemrosesan mineral [26].

Makhlouf dalam *Handbook of Smart Coatings* menyajikan pendekatan strategis dalam perancangan pelapis pelindung berbasis teknologi pintar seperti pelapis *self-healing*, pelapis dengan sistem sensorik, dan pelapis dengan pelepasan inhibitor korosi terkontrol. Meskipun sebagian besar aplikasi ini masih dalam tahap pengembangan untuk sektor otomotif dan militer, relevansi pendekatan ini bagi industri pertambangan menjadi penting terutama dalam konteks pemantauan performa pelapis secara waktu nyata dan perbaikan dini tanpa perlu pembongkaran struktur [27-29].

Touati et al. menggabungkan metode statistik dan kecerdasan buatan dalam penggilingan baja W18CR4V untuk menentukan parameter terbaik terkait hasil akhir permukaan dan efisiensi waktu. Pendekatan serupa dapat diterapkan dalam konteks pelapisan struktur, yaitu dengan mengintegrasikan sistem pemantauan kondisi lingkungan selama pengecatan dan parameter ketebalan serta waktu pengeringan, guna memperoleh hasil pelapisan yang optimal dari segi teknis dan biaya [30].

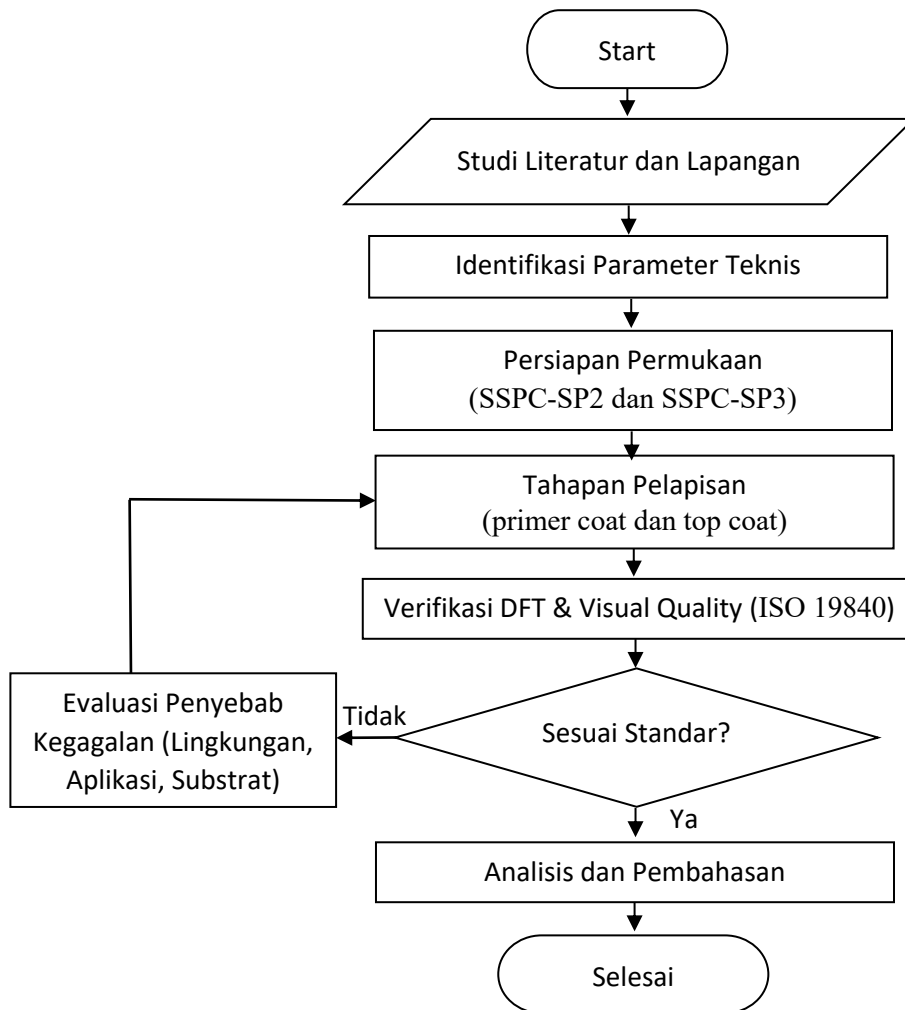
Penelitian oleh Szalai dalam konteks industri kereta api dan otomotif menekankan pentingnya optimasi tahapan persiapan permukaan, pengecatan, dan pengeringan untuk menghasilkan pola spekel yang tepat dalam pengujian deformasi dengan metode DIC (*Digital Image Correlation*). Mereka menunjukkan bahwa kualitas permukaan cat secara langsung mempengaruhi validitas hasil pengujian deformasi [31]. Hal ini menunjukkan pentingnya kualitas pelapisan tidak hanya untuk perlindungan terhadap korosi, tetapi juga sebagai komponen dalam sistem inspeksi dan monitoring struktural [32].

Proyek pengecatan *pipelack* 3115 merupakan penerapan sistem pelapisan pada struktur baja di lingkungan pertambangan tropis. metode persiapan permukaan menggunakan standar SSPC-SP2 (hand tool cleaning) [33] dan SSPC-SP3 (power tool cleaning) [34], kemudian diikuti dengan aplikasi *primer Epoxy hi build* dan *top coat Aliphatic Polyurethane*. Pemilihan metode ini didasarkan pada pertimbangan teknis dan aksesibilitas lapangan, yang sering kali tidak memungkinkan penggunaan metode abrasive blasting konvensional [35].

Studi ini bertujuan untuk memberikan penilaian teknis yang komprehensif terhadap hasil pelapisan pada struktur baja di lingkungan pertambangan, menggunakan studi kasus *pipelack* 3115. Penilaian ini mencakup evaluasi parameter teknis (DFT, metode aplikasi, jenis cat), aspek lingkungan saat aplikasi (suhu, kelembaban, kecepatan angin), serta studi literatur yang mendukung prinsip-prinsip pelapisan yang efektif dan berkelanjutan. Hasil studi ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi yang aplikatif untuk peningkatan kualitas dan durabilitas pelapisan struktur baja di industri pertambangan, serta berkontribusi terhadap pembentukan standar pelapisan struktural yang berbasis bukti empiris dan praktik terbaik global.

2. Metodologi

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kasus lapangan untuk mengevaluasi kinerja sistem pelapisan cat pada struktur baja dalam proyek *piperack* 3115 yang berlokasi di area tambang. Fokus utama terletak pada tahapan persiapan permukaan, aplikasi sistem pelapisan, dan verifikasi hasil melalui pengukuran ketebalan lapisan cat kering (*Dry Film Thickness/DFT*) dan inspeksi visual, serta kondisi lingkungan saat aplikasi. Diagram alir penelitian ini ditunjukkan pada gambar 1 berikut ini :



Gambar 1. Flowchart Penelitian

Proses dimulai dengan penetapan fokus studi kasus pada proyek pengecatan struktur baja *piperack* 3115 yang berlokasi di area. Penelitian ini menggunakan pendekatan studi lapangan, sehingga langkah pertama yang dilakukan adalah pengumpulan data aktual dan kondisi lapangan. Data yang dikumpulkan mencakup lokasi, jenis substrat (baja karbon struktural), jenis cat yang digunakan, metode *coating*, metode persiapan permukaan (SSPC-SP2 dan SSPC-SP3), dan kondisi lingkungan saat aplikasi seperti suhu, kelembaban, serta titik embun. Struktur baja *piperack* ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 2. Strudur baja *piperack*.

Setelah data dikumpulkan, langkah berikutnya adalah mengidentifikasi dan mengklasifikasikan parameter teknis yang mempengaruhi kualitas pelapisan. Parameter ini terdiri dari jenis substrat, tingkat persiapan permukaan, jenis cat, dan metode aplikasi. Tahap ini penting untuk memastikan bahwa seluruh proses lapangan sesuai dengan standar industri, seperti SSPC (*the society for protective coatings*).

Tahap persiapan permukaan dilakukan menggunakan metode pembersihan manual (*hand tool cleaning* – SSPC-SP2) dan alat listrik (*power tool cleaning* – SSPC-SP3) untuk menghilangkan karat, cat lama, dan kontaminan. Dua standar yang umum digunakan dalam pekerjaan lapangan adalah SSPC-SP2 dan SSPC-SP3. Keduanya dikeluarkan oleh *society for protective coatings* (SSPC) dan mengatur metode pembersihan permukaan logam dengan pendekatan berbeda berdasarkan ketersediaan alat dan kondisi lingkungan kerja. SSPC-SP2 dikenal sebagai metode *hand tool cleaning*, yaitu pembersihan menggunakan alat manual tanpa mesin, sedangkan SSPC-SP3 adalah *power tool cleaning* yang menggunakan alat mekanis bertenaga listrik atau pneumatik. Kedua metode ini sangat sesuai diterapkan dalam proyek pelapisan struktur baja di area tambang, yang umumnya memiliki keterbatasan akses terhadap peralatan blasting. Metode NACE SP0178 digunakan juga menghilangkan cacat permukaan seperti tajam, undercut, porositas terbuka, dan percikan las, yang dapat mengganggu adhesi dan efektivitas sistem pelapisan [36]. Seluruh panduan ini sangat penting untuk menjamin substrat dalam kondisi optimal sebelum pengecatan, sehingga meningkatkan daya tahan pelapisan terhadap korosi dalam kondisi ekstrem.

Aplikasi sistem pelapisan pada struktur baja *piperack* 3115 dilakukan melalui dua tahap utama, yakni primer coat dan top coat, dengan menggunakan cat *epoxy mastic* 331 Pine Green sebagai lapisan dasar dan *polyurethane* 933 HB Grey sebagai lapisan akhir. Cat primer *epoxy* diaplikasikan menggunakan metode, dengan ketebalan target antara 35–75 μm . Setelah lapisan dasar mengering sempurna, aplikasi top coat dilanjutkan menggunakan cat *polyurethane* berbasis *Aliphatic Polyurethane*, aplikasi top coat dengan target ketebalan 50–75 μm . Metode pengecatan secara manual manual dengan kuas dan *roller* dipilih karena kondisi lapangan yang tidak memungkinkan penerapan sistem semprot secara merata pada seluruh bagian struktur, terutama di area sempit dan sudut *piperack*.

Langkah berikutnya adalah melakukan verifikasi hasil pekerjaan melalui pengukuran ketebalan lapisan menggunakan alat DFT *gauge* serta pemeriksaan visual permukaan. Pengukuran ketebalan lapisan dilakukan menggunakan *Thickness Gauge Elcometer tipe A456CFBS/RL 21510* yang telah tersertifikasi melalui kalibrasi. Alat ini memiliki rentang pengukuran dengan ketelitian hingga 0,1 μm dan akurasi tinggi dengan koreksi sangat kecil, yaitu antara $-0,1 \mu\text{m}$ hingga $+5,1 \mu\text{m}$. Kalibrasi dilakukan dengan metode perbandingan langsung terhadap standar ketebalan film, sehingga menjamin presisi sesuai standar internasional [37], [38]. Jika pada tahap verifikasi ditemukan bahwa hasil pelapisan tidak sesuai dengan spesifikasi teknis atau terdapat cacat visual, maka hasil coating terdeteksi kegagalan berdasarkan hasil pengukuran DFT atau inspeksi visual dengan menggunakan standar ISO 19840. Setelah itu, dilakukan analisis akar penyebab kegagalan dengan memeriksa faktor-faktor seperti kondisi lingkungan saat aplikasi (kelembaban tinggi, suhu rendah), kesalahan metode aplikasi, atau kondisi substrat yang tidak ideal. Jika ditemukan penyimpangan, maka tindakan korektif segera diambil, seperti pengulangan persiapan permukaan, pengamplasan area bermasalah, dan pengaplikasian ulang (*recoating*) sesuai prosedur. Tindakan ini harus dilakukan dalam kondisi lingkungan yang terkendali dan diawasi oleh tim QC. Setelah tindakan korektif dilakukan dan semua hasil telah memenuhi standar, maka proses dinyatakan selesai dan pekerjaan dapat dianggap berhasil. Metode ISO 19840 adalah standar internasional yang digunakan untuk mengukur dan mengevaluasi ketebalan lapisan kering (*dry film thickness/DFT*) dari sistem cat pelindung pada struktur baja. Standar ini menetapkan prosedur pengukuran menggunakan alat nondestruktif serta kriteria penerimaan hasil pengukuran dibandingkan dengan nilai nominal yang ditentukan dalam spesifikasi teknis [39].

Tahap akhir dari alur utama adalah analisis pembahasan hasil. Data lapangan dikorelasikan dengan studi ilmiah dan standar internasional, untuk memahami faktor keberhasilan sistem pelapisan serta potensi perbaikannya. Hasil analisis ini kemudian digunakan sebagai dasar penyusunan rekomendasi teknis untuk meningkatkan efektivitas pelapisan baja di lingkungan tambang tropis yang lembab dan ekstrem.

Setiap tahapan dalam proses pelapisan, mulai dari persiapan permukaan hingga aplikasi akhir top coat, dievaluasi secara menyeluruh dan dibandingkan dengan standar industri yang diakui secara internasional seperti SSPC (Society for Protective Coatings), NACE (National Association of Corrosion Engineers), dan ISO (International Organization for Standardization), untuk memastikan bahwa hasil pekerjaan memenuhi kriteria kualitas yang ketat. Evaluasi dilakukan melalui inspeksi visual, pengukuran ketebalan lapisan kering (DFT), serta verifikasi kesesuaian metode aplikasi terhadap spesifikasi teknis dan prosedur pelaksanaan. Standar SSPC-SP2 dan SP3 dijadikan acuan dalam menilai efektivitas pembersihan permukaan baja, sedangkan nilai ketebalan pelapisan dibandingkan dengan toleransi ISO 19840 dan panduan teknis NACE SP0178. Pendekatan ini tidak hanya menjamin bahwa hasil pelapisan mampu memberikan proteksi maksimal terhadap korosi, tetapi juga memberikan landasan objektif dalam menilai keberhasilan pelaksanaan di lapangan. Dengan perbandingan terhadap standar internasional, kualitas pekerjaan dapat dikalibrasi secara profesional, sekaligus mendorong tercapainya kinerja pelapisan yang tidak hanya memenuhi ekspektasi proyek, tetapi juga tahan dalam jangka panjang.

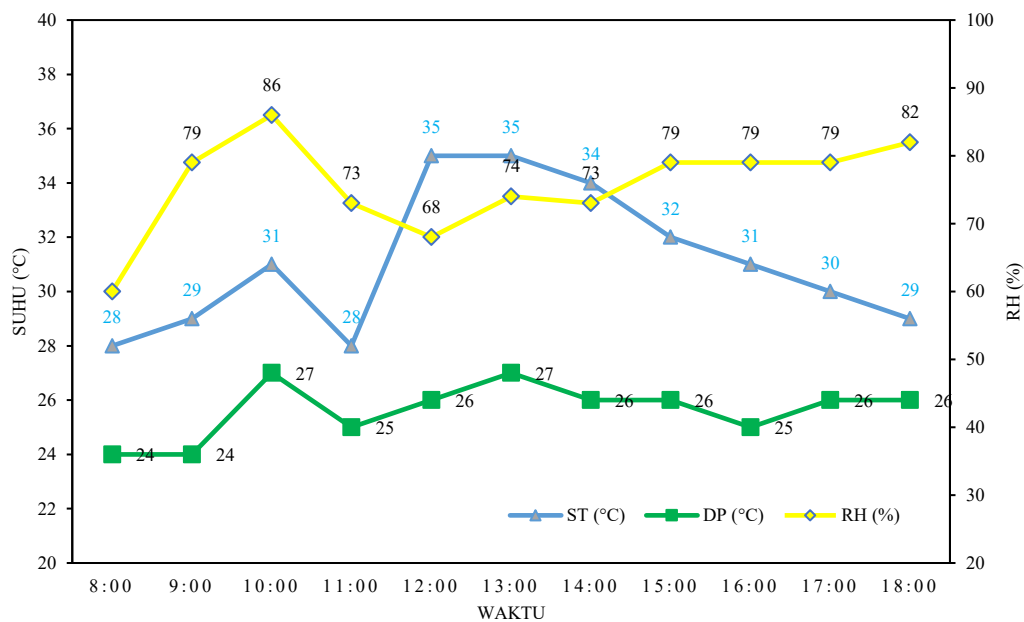
3. Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini dilakukan berdasarkan alur sistematis yang dimulai dari pengumpulan data teknis lapangan, identifikasi parameter pelapisan, analisis tahapan pekerjaan, verifikasi hasil pelapisan, dan evaluasi terhadap standar yang relevan. Hasil dari setiap tahapan dalam flowchart dievaluasi dan dibandingkan dengan standar industri seperti SSPC, NACE, dan ISO untuk memberikan gambaran objektif mengenai kualitas pelapisan yang telah dilakukan.

3.1. Hasil Pengumpulan Data Lapangan

Data lapangan menunjukkan bahwa pekerjaan pelapisan pada struktur baja *pipelack* 3115 dilaksanakan dengan pendekatan metode non-abrasive, yaitu pembersihan manual dan mekanik ringan (SSPC-SP2 dan SSPC-SP3). Sistem cat yang digunakan adalah dua lapisan, yakni primer Admiral Zinc Chromate Yellow Primer dan top coat Admiral Gloss Synthetic Enamel. Aplikasi cat dilakukan menggunakan metode manual dengan kuas dan roller, menyesuaikan kondisi akses lapangan dan keselamatan kerja. Cat diaplikasikan dalam dua tahap dengan interval pengeringan sesuai spesifikasi teknis produk.

Pekerjaan dilakukan dalam kondisi cuaca terbuka dengan suhu berkisar antara 29–33 °C dan kelembaban relatif antara 70–85%. Tidak ditemukan gangguan hujan selama periode pelapisan, dan kondisi angin diukur berada di bawah 10 km/jam, sehingga masih dalam batas aman menurut pedoman ASTM D3276 untuk aplikasi cat berbasis pelarut.



Gambar 3. Grafik *ambient chart*

Gambar 3 merupakan *ambient chart* yang menggambarkan perubahan tiga parameter lingkungan penting selama proses pengecatan, yaitu Suhu Permukaan (ST), Titik Embun (DP), dan Kelembaban Relatif (RH) dari pukul 08:00 hingga 18:00. Garis biru (ST) menunjukkan fluktuasi suhu permukaan dari 28°C pada pukul 08:00, meningkat secara bertahap hingga mencapai puncaknya di 35°C pada pukul 12:00–13:00, kemudian menurun perlahan hingga 29°C pada pukul 18:00. Garis ungu (DP) menunjukkan titik embun yang relatif stabil antara 24°C hingga 27°C, yang menunjukkan bahwa tidak ada risiko kondensasi karena perbedaan suhu permukaan dengan titik embun tetap berada di atas batas minimal 3°C.

Sementara itu, garis kuning (RH) yang merepresentasikan kelembaban relatif menunjukkan variasi yang cukup mencolok, dengan lonjakan signifikan dari 25% pada pukul 08:00 menjadi 79% pada pukul 09:00, lalu mencapai puncaknya di 86% pada pukul 10:00. Setelah itu, nilai RH menurun hingga titik terendah 68% pada pukul 12:00, dan kembali meningkat secara perlahan hingga 82% pada pukul 18:00. Dari grafik ini dapat disimpulkan bahwa meskipun sempat terjadi lonjakan kelembaban pada pagi hari, kondisi lingkungan secara keseluruhan tetap berada dalam rentang yang dapat diterima untuk pekerjaan pengecatan, karena suhu permukaan tetap cukup tinggi dan selisihnya dengan titik embun memadai. Hal ini memastikan bahwa proses pengecatan dilakukan dalam kondisi lingkungan yang aman dan sesuai standar mutu.

3.2. Hasil Pengukuran Ketebalan Lapisan Cat (Dry Film Thickness/DFT)

Pengukuran ketebalan lapisan cat kering atau Dry Film Thickness (DFT) merupakan salah satu parameter kritis dalam menentukan keberhasilan sistem pelapisan. DFT menjadi indikator utama efektivitas proteksi terhadap korosi, ketahanan mekanis, serta umur panjang dari sistem pelapisan yang diaplikasikan. Pengukuran ketebalan lapisan di tunjukkan pada gambar 4 *primer coat* dan gambar 5 *top coat*.

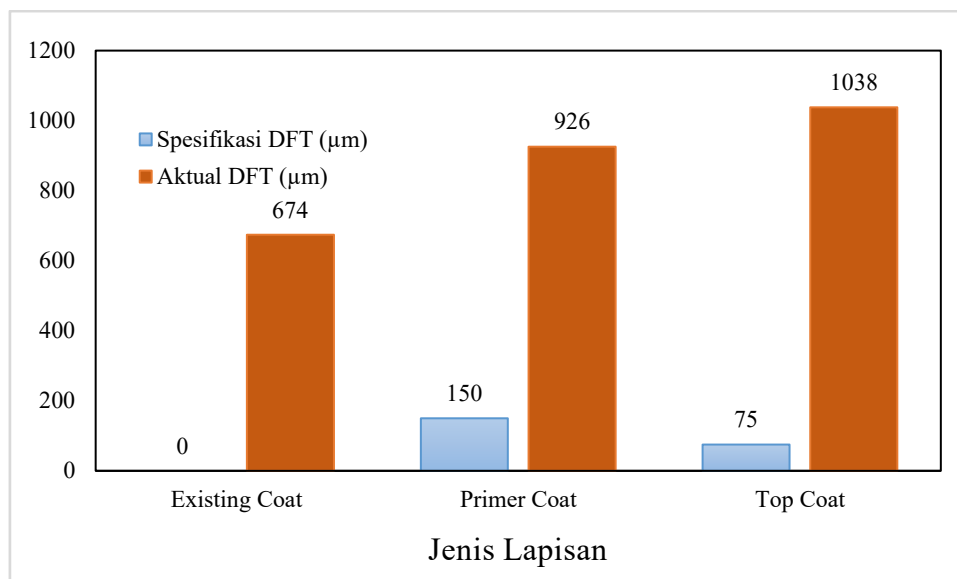


Gambar 4. Pengukuran ketebelaan lapisan *Primer coat*.



Gambar 5. Pengukuran ketebelaan lapisan *Top coat*.

Dalam proyek pelapisan struktur *pipelack* 3115, pengukuran DFT dilakukan pada tiga tahapan utama, yakni lapisan *existing* (sebelum pekerjaan pelapisan dimulai), lapisan primer, dan lapisan akhir atau *top coat*. Data hasil pengukuran ini diperoleh dari laporan akhir inspeksi pada gambar 6.



Gambar 6. Grafik Perbandingan Spesifikasi dan DFT

Gambar 6 menunjukkan bahwa ketebalan aktual lapisan cat kering pada seluruh jenis lapisan jauh melebihi nilai spesifikasi teknis yang telah ditentukan. Nilai spesifikasi *existing coat* ditetapkan 0 μm karena sistem pelapisan baru tidak menghitung lapisan lama sebagai bagian dari desain, melainkan hanya mencatatnya sebagai kondisi awal. Ketebalan aktual rata-rata *existing coat* tercatat sebesar 674 μm. Pada lapisan Primer Coat, terdapat perbedaan yang sangat signifikan, di mana spesifikasi awal hanya menetapkan ketebalan 150 μm, sedangkan hasil aktual mencapai 926 μm, atau lebih dari enam kali lipat ketebalan yang disyaratkan. Target ketebalan top coat sebesar 75 μm ditentukan mengacu pada standar industri ISO 19840 kisaran optimal 50–75 μm untuk lapisan *polyurethane* agar memberikan ketahanan UV, fleksibilitas, dan estetika tanpa risiko cacat film. Variasi ketebalan lapisan yang terjadi di lapangan disebabkan oleh metode aplikasi manual dengan kuas dan *roller*, kondisi lingkungan tropis (suhu 29–33 °C, kelembaban 70–85%), serta geometri substrat yang kompleks, sehingga distribusi ketebalan menjadi tidak seragam. Pada kondisi aktual, ketebalan *top coat* mencapai 1038 μm, jauh melebihi spesifikasi. Ketebalan ini meningkatkan perlindungan korosi, tetapi kelebihan ketebalan dari standar yang sangat tinggi berpotensi menimbulkan masalah seperti *solvent entrapment*, *cracking*, *blistering*, hingga delaminasi akibat hilangnya elastisitas lapisan. Dengan demikian, pengendalian ketebalan sesuai standar menjadi kunci dalam memastikan daya tahan sistem pelapisan baja di lingkungan tambang yang agresif.

Meskipun demikian, kelebihan ketebalan ini perlu disikapi secara cermat karena berpotensi menimbulkan risiko teknis seperti retak, pengelupasan, atau delaminasi akibat tegangan internal dalam lapisan cat. Oleh karena itu, kondisi ini harus dipandang sebagai peluang sekaligus tantangan dalam manajemen mutu pelapisan. Di satu sisi, ketebalan berlebih dapat diinterpretasikan sebagai bentuk kehati-hatian dan usaha protektif yang tinggi terhadap infrastruktur baja di lingkungan ekstrem. Namun, di sisi lain, deviasi ini juga menjadi sinyal perlunya peningkatan pengawasan terhadap teknik aplikasi, metode pengukuran, serta kontrol pelaksanaan pekerjaan di lapangan. Dengan evaluasi yang tepat dan perbaikan pada sistem manajemen mutu, pencapaian ini dapat menjadi dasar bagi pengembangan standar pelapisan yang lebih adaptif terhadap kebutuhan proteksi jangka panjang.

Keberhasilan sistem pelapisan tidak hanya ditentukan oleh tingkat tebalan lapisan, melainkan juga oleh keseragaman distribusi dan kualitas persiapan permukaan. Studi oleh Ahsan Waqas et al. 2024 membuktikan bahwa tiga lapisan epoxy dengan ketebalan merata mampu menghasilkan laju korosi terendah dibandingkan satu lapisan tipis zinc chromate, sehingga konsistensi dalam ketebalan menjadi faktor utama keberhasilan pelapisan [40], [41]. Penelitian oleh Ahsan Waqas et al 2023 juga menegaskan bahwa peningkatan ketebalan memang dapat menekan laju korosi, tetapi bila melampaui batas optimum justru menimbulkan masalah adhesi antar lapisan [42], [43]. Pada saat pelapisan pentingnya mengikuti panduan pabrikan terkait ketebalan minimum, waktu pengeringan, serta parameter lingkungan aplikasi, karena kegagalan dalam mematuhi tahapan tersebut dapat memicu cacat film seperti *blistering* atau *premature failure*. Dengan demikian, perbedaan antara hasil aktual dan spesifikasi standar dalam penelitian ini mengindikasikan perlunya sistem kontrol mutu yang lebih ketat melalui inspeksi antar lapisan, pengukuran DFT sesuai ISO 19840, serta penerapan *stripe coat* pada area kritis agar performa pelapisan tidak hanya tebal, tetapi juga optimal dalam perlindungan jangka panjang.

4. Kesimpulan

Penelitian pada struktur baja *pipelack* 3115 menunjukkan bahwa sistem pelapisan dengan metode persiapan permukaan SSPC-SP2 dan SSPC-SP3 serta aplikasi manual menggunakan primer *coat Epoxy high build* dan *top coat Aliphatic Polyurethane* berhasil dilaksanakan dalam kondisi lingkungan terbuka dengan suhu 29–33°C dan kelembaban 70–85%, tanpa gangguan hujan maupun risiko kondensasi.

Pengukuran ketebalan cat (DFT) menunjukkan deviasi signifikan dari spesifikasi: existing coat 674 μm , primer coat mencapai 926 μm (dari spesifikasi 150 μm), dan top coat sebesar 1038 μm (spesifikasi 75 μm). Ketebalan berlebih ini menunjukkan adanya kelebihan proteksi, tetapi juga menimbulkan risiko teknis seperti delaminasi akibat tegangan internal. Oleh karena itu, diperlukan peningkatan pengawasan mutu dan kompetensi tenaga aplikator di lapangan agar hasil pelapisan tidak hanya memenuhi standar teknis, tetapi juga aman dan seragam. Evaluasi terhadap standar internasional seperti SSPC, NACE, dan ISO menunjukkan bahwa sistem pelapisan perlu disesuaikan dengan kondisi ekstrem pertambangan. Hasil ini dapat dijadikan acuan untuk perbaikan praktik pelapisan di lingkungan tambang tropis serta mendorong penelitian lanjutan terkait performa lapisan dalam jangka panjang dan pengaruh beban dinamis serta iklim ekstrem.

5. Daftar Pustaka

- [1] H. Nie *et al.*, 2023, “Service Reliability Test Method for Anticorrosion Coatings on the Compressor Outlet Pipelines of Natural Gas Stations,” *ACS Omega*, vol. 8, no. 7, pp. 6402–6410, doi: 10.1021/acsomega.2c06648.
- [2] L. Fan, S. T. Reis, G. Chen, and M. L. Koenigstein, 2018, “Corrosion resistance of pipeline steel with damaged enamel coating and cathodic protection,” *Coatings*, vol. 8, no. 5, doi: 10.3390/coatings8050185.
- [3] P. Yu, Y. Lei, Z. Luan, Y. Zhao, and H. Peng, 2022, “Effect on the Surface Anticorrosion and Corrosion Protection Mechanism of Integrated Rust Conversion Coating for Enhanced Corrosion Protection,” *ACS Omega*, vol. 7, no. 10, pp. 8995–9003, doi: 10.1021/acsomega.2c00172.
- [4] H. H. Uhlig and R. W. Revie, 1985. “Corrosion and corrosion control. An introduction to corrosion science and engineering. Third Edition,” in *Wiley Interscience*, Wiley.
- [5] D. E. Septiyani Arifin, D. Muliastri, R. Rudiana, and F. N. I. Sari, 2021, “Green Corrosion Inhibitors to Head Off the Corrosion Rate of ST 37 Steels,” *Curr. J. Int. J. Appl. Technol. Res.*, vol. 2, no. 1, pp. 21–28, doi: 10.35313/ijatr.v2i1.40.
- [6] S. *et al.*, 2022, “Study on Developments in Protection Coating Techniques for Steel,” *Adv. Mater. Sci. Eng.*, doi: 10.1155/2022/2843043.

- [7] D. Muliastri, D. E. Septiyani, N. Afif, V. T. Sirenden, and J. N. R. Suprihartini, 2021, "Application of Organic Inhibitors to the Corrosion of Materials AISI 1070 Steel," *Curr. J. Int. J. Appl. Technol. Res.*, vol. 2, no. 1, pp. 12–20, doi: 10.35313/ijatr.v2i1.39.
- [8] M. Juhl, M. Hauschild, and K. Dam-Johansen, 2024, "Sustainability of corrosion protection for offshore wind turbine towers," *Prog. Org. Coatings*, doi: 10.1016/j.porgcoat.2023.107998.
- [9] Y. Kurniawan Afandi, I. Syarif Arief, and Amiadji, 2015. "Analisa Laju Korosi pada Pelat Baja Karbon dengan Variasi Ketebalan Coating," *J. Tek. Its*, vol. 4, no. 1, pp. 1–5,
- [10] V. Sharun *et al.*, 2022, "Study on Developments in Protection Coating Techniques for Steel," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2022, doi: 10.1155/2022/2843043.
- [11] S. Galedari, A. Mahdavi, F. Azarmi, Y. Huang, and A. McDonald, 2019, "A Comprehensive Review of Corrosion Resistance of Thermally-Sprayed and Thermally-Diffused Protective Coatings on Steel Structures," *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 28, pp. 645–677, doi: 10.1007/s11666-019-00855-3.
- [12] N. Bogatu *et al.*, 2025, "Assessment of the Effectiveness of Protective Coatings in Preventing Steel Corrosion in the Marine Environment," *Polymers (Basel)*, vol. 17, doi: 10.3390/polym17030378.
- [13] S. Sulardi, 2019, "Pengurangan Korosi di Bawah Fire Proofing dengan Metode Primer Coating," *Media Ilm. Tek. Sipil*, vol. 7, no. 2, pp. 71–77, doi: 10.33084/mits.v7i2.839.
- [14] N. Bogatu *et al.*, 2025, "Assessment of the Effectiveness of Protective Coatings in Preventing Steel Corrosion in the Marine Environment," *Polymers (Basel)*, vol. 17, no. 3, doi: 10.3390/polym17030378.
- [15] X. Dai, J. Qian, J. Qin, X.-W. Jia, and H. Tang, 2024, "Preparation and properties of gradient fire & corrosion protection magnesium phosphate cement coatings," *Dev. Built Environ.*, doi: 10.1016/j.dibe.2024.100327.
- [16] U. B. Heraldito Petra Sumintono, Parlindungan Manik, 2017, "Analisis Pengaruh Ketebalan Coating Terhadap Laju Korosi Pada Baja ST42 Sebagai Material Daun Kemudi Pada Perairan Dengan Tingkat Salinitas Yang Bervariasi," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 5, no. 4, p. 785, [Online]. Available: <http://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>
- [17] J. Prasetyanto, 2020, "PENGADAAN PEKERJAAN COATING EKSTERNAL TANGKI RAW , TREATED , PIPE RACK DAN REINJECTION PIPELINE PLTP PATUHA UNIT 1," in *PT Geo Dipa Energi*, pp. 1–27.
- [18] G. V. G. Ngoro, 2019. "ANALISA TEMPERATUR OPTIMAL PADA PROSES PELEPASAN DAYA REKAT COATING EPOXY DAN PLASTIK DI PERMUKAAN BETON/SEMENTEN DENGAN METODE INDUKSI PANAS," *J. Tek. Mesin*, vol. 08, no. 1, pp. 40–55.
- [19] B. Peng *et al.*, 2025, "Deterioration of Protective Coating on Steel Structures in Harbor Attacked via Water and Sediment Erosion," *J. Mar. Sci. Eng.*, doi: 10.3390/jmse13040683.
- [20] P. Lin and X. Chen, 2024, "Experimental and Modeling Analysis of the Tensile Properties of Heavy-Duty Coatings for Steel Structures," *Coatings*, doi: 10.3390/coatings14101289.
- [21] S. S. Jamali and D. J. Mills, "Steel surface preparation prior to painting and its impact on protective performance of organic coating, 2014," *Prog. Org. Coatings*, vol. 77, no. PB, pp. 2091–2099, doi: 10.1016/j.porgcoat.2014.08.001.

- [22] Tsaniyah Maulida Alfainy and Bellina Yunitasari, 2023. “Pengaruh Variasi Sudut Dan Jarak Sandblasting Terhadap Nilai Kekasaran Permukaan Material Sa516 Grade 70 Air Receiver Smelter SMELTER,” *J. Tek. Mesin*, vol. 11, no. 3, pp. 109–114.
- [23] J. Zhang, T. Liu, X. Hu, R. Raffik, M. W. Bhatt, and I. Ofori, 2022 “Anti-cracking performance test of thick steel structure fireproof coating under vibration fatigue load for critical health infrastructure,” *J. Eng.*, vol. 2022, no. 11, pp. 1086–1094, doi: 10.1049/tje2.12179.
- [24] S. Bhoi *et al.*, 2022, “Performance Evaluation of Different Coating Materials in Delamination for Micro-Milling Applications on High-Speed Steel Substrate,” *Micromachines*, vol. 13, no. 8, pp. 1–19, doi: 10.3390/mi13081277.
- [25] V. S. Sam, A. Nammalvar, A. Iswarary, D. Andrushia, G. B. G. Ananthi, and K. Roy, 2025, “Effect of Protective Coatings on Post-Fire Performance and Behavior of Mild Steel-Based Cold-Formed Steel Back-to-Back Channel Columns with Bolted Connections,” *Fire*, vol. 8, no. 3, pp. 1–35, doi: 10.3390/fire8030107.
- [26] L. Zhang *et al.*, 2021 “Assessment of Structural Steel Coating Applications,” *Florida Dep. Transp.*, p. 115p, [Online]. Available: https://fdotwww.blob.core.windows.net/sitefinity/docs/default-source/research/reports/fdot-be935-rpt.pdf?sfvrsn=38f5389e_2%0Ahttps://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/62600%0Ahttps://trid.trb.org/view/1983994
- [27] Abdel Salam Hamdy Makhlouf, 2014. *Handbook of Smart Coating for Materials Application*, vol. 53, no. 9..
- [28] K. Kere and Q. Huang, 2019, “Life-Cycle Cost Comparison of Corrosion Management Strategies for Steel Bridges,” *J. Bridg. Eng.*, doi: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001361.
- [29] G. Venkateela and P. Balaguru, 2020, “A New Protocol for Evaluating the Effectiveness of Coatings Used to Reduce Corrosion of Steel Structures,” *Coatings+2020*, doi: 10.5006/s2020-00070.
- [30] S. Touati *et al.*, 2025, “Performance analysis of steel W18CR4V grinding using RSM, DNN-GA, KNN, LM, DT, SVM models, and optimization via desirability function and MOGWO,” *Heliyon*, vol. 11, no. 4, p. e42640, doi: 10.1016/j.heliyon.2025.e42640.
- [31] T. Kondo, H. Hotta, H. Matsuno, T. Matsumoto, and K. Yamamoto, 2021, “Degradation factors of a metal spraying system for steel bridges,” pp. 3555–3564, doi: 10.1201/9780429279119-481.
- [32] S. Szalai, B. F. Szívós, D. Kurhan, A. Németh, M. Sysyn, and S. Fischer, 2023, “Optimization of Surface Preparation and Painting Processes for Railway and Automotive Steel Sheets,” *Infrastructures*, vol. 8, no. 2, doi: 10.3390/infrastructures8020028.
- [33] SSPC, 2000. “PAINT APPLICATION SPECIFICATION NO. 1 Shop, Field, and Maintenance Painting of Steel,” *Soc. Prot. Coatings*, no. 1.
- [34] SSPC, 2018. “SSPC-SP3: The Society for Protective Coatings SURFACE PREPARATION STANDARD NO. 3 Power Tool Cleaning,” *Soc. Prot. Coatings*, vol. i, no. 1, pp. 1–4.
- [35] E. Doluk, A. Rudawska, D. Stancekova, and J. Mrazik, 2021, “Influence of Surface Treatment on the Strength of Adhesive Joints,” *Manuf. Technol.*, vol. 21, no. 5, pp. 585–591, doi: 10.21062/mft.2021.068.
- [36] National Association of Corrosion Engineers, 2007. “Design, Fabrication, and Surface Finish Practices for Tanks and Vessels to Be Lined for Immersion Service,” in *NACE*

SP0178.

- [37] V. Sekatskii, O. Gavrilova, N. Merzlikina, Y. Pikalov, Y. Pikalov, and I. Kaposzko, 2019, “Two-point calibration of coating thickness gauges: what needs to be considered to improve measurement accuracy,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 537, doi: 10.1088/1757-899X/537/3/032068.
- [38] U. Hudomalj, F. Sichani, L. Weiss, M. Nabavi, and K. Wegener, 2022, “Analysis and Comparison of Two Different Sensing Techniques for In Situ Coating Thickness Measurements,” *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 32, pp. 673–680, doi: 10.1007/s11666-022-01508-8.
- [39] International Organization for Standardization, 2004. “Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems — Measurement of, and acceptance criteria for, the dry film thickness,” *19840, ISO*, vol. 2, p. 13,
- [40] N. Akafuah, S. Poozesh, A. Salaimah, G. Patrick, K. Lawler, and K. Saito, 2016, “Evolution of the Automotive Body Coating Process—A Review,” *THE Coatings*, vol. 6, p. 24, doi: 10.3390/COATINGS6020024.
- [41] A. Waqar *et al.*, 2024, “Modeling of success factors of using PU coats in concrete construction projects,” *Heliyon*, vol. 10, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e28908.
- [42] A. Waqar, I. Othman, K. Skrzypkowski, and A. Ghumman, 2023, “Evaluation of Success of Superhydrophobic Coatings in the Oil and Gas Construction Industry Using Structural Equation Modeling,” *Coatings*, doi: 10.3390/coatings13030526.
- [43] S. Khodakarami, H. Zhao, K. Rabbi, and N. Miljkovic, 2021, “Scalable Corrosion-Resistant Coatings for Thermal Applications,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, doi: 10.1021/acsami.0c19683.